XII Congreso Ibérico de Agroingeniería

XII Congresso Ibérico de Agroengenharia

4-6 septiembre 2023



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Junta de Andalucía

AGRO Ingeniería

SCAP

SOCIEDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DE PORTUGAL

SEER - Secção Especializada de Engenharia Rural

Libro de actas · Livro de atas



XII Congreso Ibérico de Agroineniería
XII Congresso Ibérico de Agroengenharia

4-6 septiembre 2023

Título: Proceedings of the 12th Iberian Agroengineering Congress.
(Libro de actas del XII Congreso Ibérico de Agroingeniria)
(Livro de atas del XII Congreso Ibérico de Agroengenharia)

Editores: Manuel Pérez Ruiz, Gregorio Egea Cegarra, Luis Pérez Urrestarazu, Isabel Díaz de la Torre, Antonio Rodríguez Lizana, Antonio Franco Salas, Manuel Jesús González Ortega, Rocío Pineda Martos y Alejandro Prior Fernández. Universidad de Sevilla, España.

Publicado: Servicio de Publicaciones de la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía

Edita: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Universidad de Sevilla.

Impresión: Gandulfo Impresores, S.L.

ISBN: 978-84-09-53018-2

Depósito Legal: SE 1503-2023

1ª Edición. Sevilla, 2023

SPONSORS - PATROCINADORES



















































SALUDA DEL EXCMO. SR. PRESIDENTE DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA.

XII CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA



En los primeros días de septiembre de 2023, la Universidad de Sevilla va a ser anfitriona de este importante XII Congreso Ibérico de Agroingeniería. Es por ello por lo que me gustaría que mis primeras palabras fuesen un agradecimiento y un reconocimiento a todas aquellas personas que con su esfuerzo, profesionalidad y conocimientos van a hacer posible su celebración. Y por supuesto a los anfitriones, que hacen que la ciudad de Sevilla y Andalucía sean referentes de los avances que en esta materia se vienen produciendo, así como en lo que se refiere al importante intercambio de conocimientos entre países amigos como España y Portugal.

Son muchos los puntos que nos unen más allá del territorio ibérico, de sus recursos naturales o de paisajes como la dehesa, que de por sí aportan un carácter especial a estas tierras y un sinfín de posibilidades. España y Portugal, y desde nuestro ámbito Andalucía y el Algarve y el Alentejo, están llamados a incrementar cada vez más sus puntos de encuentro hasta alcanzar una cooperación permanente. Históricamente nuestros pueblos han vivido en unas buenas relaciones de vecindad. Las comunidades rurales del entorno del Guadiana, en especial, no conocen fronteras, pues han apostado siempre por la colaboración. No obstante, sigue siendo primordial intensificar y favorecer esta cooperación, y esto es tarea de todos, también de las administraciones, las cuales tenemos que facilitar los medios y las estructuras necesarias para conseguirlo.

Vivimos un momento especialmente complicado, con crisis continuadas, de distinta naturaleza e imprevisibles, como una guerra en territorio europeo o una inflación que hacía décadas que no vivíamos. Pero desde el Gobierno andaluz estamos sumamente comprometidos, empleando todo nuestro esfuerzo y trabajo en seguir construyendo una tierra de progreso, de bienestar y de futuro para nuestros pueblos.

Y sin duda, la agroingeniería es una herramienta fundamental para gestionar este futuro. Miramos con especial interés las actuaciones que en estas regiones tienen que ver con infraestructuras hídricas, la apuesta por la digitalización, las nuevas prácticas agrícolas, la agricultura regenerativa, la economía circular en el ámbito del sector primario o la mejor gestión de la tierra y de la agricultura de precisión. Estamos llamados a compartir nuestros conocimientos para conseguir el desarrollo económico que todos deseamos, para lo que necesitamos un regadío eficiente, una apuesta por el olivar superintensivo, por los frutos rojos o por la ganadería extensiva de ovino y porcino ibérico, asociada a la dehesa española y el montado portugués.

En definitiva, necesitamos ser cada vez más eficientes en la internacionalización, en la necesidad de obtener más valor añadido, más calidad, más y mejores nuevas tecnologías y unas prácticas agronómicas más productivas y, siempre, más sostenibles, siendo esto sólo posible con el conocimiento aplicado de la agroingeniería.

La universidad, los expertos, los técnicos y la colaboración público-privada son imprescindibles para afrontar los retos que se nos presentan, por lo que estoy plenamente convencido del éxito de este XII Congreso Ibérico de Agroingeniería, deseándoos de corazón que viváis unas fructíferas jornadas.

Juan Manuel Moreno Bonilla

PRESENTACIÓN

El interés que origina la I+D+i en los diversos y complejos campos de la Agroingeniería es esencial en la búsqueda del conocimiento y el avance de las sociedades actuales. Por ello, el XII Congreso Ibérico de Agroingeniería se ha concebido como un foro de encuentro y reflexión, en torno a la ciencia, la técnica y la práctica del sector, donde analizar, desde una perspectiva multidisciplinar, la situación actual de la Agroingeniería en la Península Ibérica.

Esta compilación de artículos es el resultado de un esfuerzo colaborativo, que refleja la dedicación y la pasión de quienes, con su autoría y sus investigaciones, han contribuido a la evolución y a los avances en nuestras áreas de estudio.

El propósito fundamental de este libro es proporcionar una ventana al trabajo que habéis realizado, condensando años de investigación en estos artículos concisos y claros. Estos trabajos representan el núcleo de ideas que inspiran, desafían y expanden los límites de lo que sabemos.



Además, me gustaría reconocer públicamente la esmerada labor de las personas participantes en el comité organizador y el comité científico quienes, con su tiempo, dedicación y experiencia, han hecho posible la materialización de este documento. Cada paso del proceso ha sido meticulosamente supervisado, desde la recepción de los artículos, hasta su revisión y posterior publicación.

Confío en que este libro sirva como valiosa herramienta a quienes buscan respuestas a preguntas específicas, a quienes esperan

inspiración para sus futuras investigaciones, o simplemente a quienes les mueve un deseo insaciable de aprender. Que estos artículos sean la chispa que encienda debates, inspire nuevos proyectos y conduzca a descubrimientos aún más grandes.

Finalmente, desde la organización queríamos expresar nuestro más sincero agradecimiento, a la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía por la publicación de este libro de artículos. Es una valiosa contribución a la investigación, a la innovación y al patrimonio intelectual de nuestra comunidad: gracias a su apoyo e impulso, enriquecen y promueven el Conocimiento para que, desde Andalucía, llegue a toda la Península.

D. Manuel Pérez Ruiz
Presidente del Comité Organizador.

COMITE ORGANIZADOR / COMISSAO ORGANIZADORA

Presidente: Manuel Pérez Ruiz
Secretario/ Secretário: Gregorio Egea Cegarra
Vocales / Vogais: Pérez Urrestarazu, Luís
Franco Salas, Antonio
Pineda Martos, Rocío
Díaz de la Torre, Isabel
Prior Fernández, Alejandro
Rodríguez Lizana, Antonio
González Ortega, Manuel Jesús

COMITÉ CIENTIFICO /COMISSAO CIENTIFICA

Sociedad Española de Agroingeniería

Pedro Aguado Rodríguez - Universidad de León
Juan Manuel Antolín Rodríguez - Universidad de Valladolid
Silvia Arazuri Garín - Universidad Pública de Navarra
Esperanza Ayuga Téllez - Universidad Politécnica de Madrid
Francisco Ayuga Téllez - Universidad Politécnica de Madrid
Martín Barrasa Rioja - Universidad de Santiago de Compostela
Pilar Barreiro Elorza - Universidad Politécnica de Madrid
José Blasco Ivars - Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias
Antonio Brasa Ramos - Universidad de Castilla - La Mancha
Javier Bueno Lema - Universidad de Santiago de Compostela
Salvador Calvet Sanz - Universidad Politécnica de Valencia
Emilio Camacho Poyato - Universidad de Córdoba
José Casanova Gascón - Universidad de Zaragoza
Rosario Castro Abengoza - Universidad de León
Adriana Correa Guimaraes - Universidad de Valladolid
José Antonio Cuchí Oterino - Universidad de Zaragoza
José Antonio Flores Yepes - Universidad Miguel Hernández de Elche
José Luis García Fernández - Universidad Politécnica de Madrid
Ana Isabel García García - Universidad Politécnica de Madrid
Francisco Javier García Ramos - Universidad de Zaragoza
María Ángeles Grande Ortíz - Universidad Politécnica de Madrid
Hugo Malón Litago - Universidad de Zaragoza
Ana Martí de Olives - Universidad Miguel Hernández
Pablo Martín-Ramos - Universidad de Valladolid
Victoriano Martínez Álvarez - Universidad Politécnica de Cartagena
Andrés Martínez Rodríguez - Universidad de Valladolid
Pablo Melgarejo Moreno - Universidad Miguel Hernández
Miguel Ángel Moreno Hidalgo - Universidad de Castilla-La Mancha
Manuel Moya Ignacio - Universidad de Extremadura
Luis Manuel Navas Gracia - Universidad de Valladolid
Coral Ortíz Sánchez - Universidad Politécnica de Valencia
Carmen Rocamora Osorio - Universidad Miguel Hernández de Elche
Juan Agüera Vega - Universidad de Córdoba
Diego Valera Martínez - Universidad de Almería
Antonio Delgado García - Universidad de Sevilla
María Dolores Pérez Marín - Universidad de Córdoba
Eva Sánchez-Hernández - Universidad de Valladolid
Manuel Avilés Guerrero - Universidad de Sevilla
Emilio Gil - Universidad Politécnica de Cataluña

Secção Especializada de Engenharia Rural de la Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal

Adélia Sousa – Universidad de Évora
António Bento Dias – Universidad de Évora
António Castro Ribeiro – Instituto Politécnico de Bragança
Arlindo Almeida - Instituto Politécnico de Bragança
Fatima Baptista – Universidad de Évora
João Lopes Rolim – Universidad de Lisboa
João Manuel Serrano – Universidad de Évora
José Carlos Barbosa – Instituto Politécnico de Bragança
Jose Manuel Gonçalves – Escola Superior Agrária de Coimbra
José Silvestre - Instituto Nacional de Investigación Agraria y Veterinario
José Rafael Marques da Silva – Universidad de Évora
Luis Alcino da Conceição – Instituto Politécnico de Portalegre
Luis Leopoldo Silva – Universidad de Évora
Miguel Leão – Instituto Nacional de Investigación Agraria y Veterinario
Teresa Paço – Universidad de Lisboa
Vasco Fitas da Cruz – Universidad de Évora



ÍNDICE

Área temática: Agricultura de Precisión/ Agricultura de precisão

Cosechando datos de maíz forrajero: primeros resultados 19

Evaluación del efecto de la fertilización con nitrógeno protegido sobre el rendimiento en cultivo de arroz (Oryza sativa L.) mediante observaciones Sentinel-2 29

Comparación de la densidad de siembra en cultivo de arroz (Oryza sativa L.) mediante observaciones Sentinel-2 39

Efectos de diversos tipos de luz artificial sobre los fitoquímicos de Lactuca sativa L. var. Great Lakes 118 49

Diseño y aplicación de un sistema inteligente de pulverización variable para tratamientos fitosanitarios en viña y olivo – PIVOS y ADOPTA 57

Vineyard management zones: A case study based on soil apparent electrical conductivity survey 67

Can sheep livestock systems based on dynamic grazing influence soil compaction? A case study on dryland pastures in the Mediterranean Montado ecosystem 75

Riego de pomelo con agua marina desalinizada: efectos fisiológicos, agronómicos y económicos a corto plazo 83

Reducción de boro en agua marina desalinizada para el riego agrícola: análisis regional en el sureste español 91

Nueva metodología de cultivo de garbanzo (Cicer arietinum L.) para la adaptación al cambio climático, el empleo de bioestimulantes 99

Técnicas sensoriais de avaliação não-destrutiva do estado nutricional das culturas em modelos de crescimento: state-of-the-art 107

Influencia del caudal de aire de un pulverizador de bajantes verticales en la deposición de producto en viñedo 117

Modelo de integración de tecnologías habilitadoras para la digitalización en invernaderos 125

Towards a sustainable water use in apple orchards with permanent mulch: a study case on Lis Valley, Portugal 133

Estimación del volumen de copas en plantaciones frutales de olivo (Olea europaea L.), a partir de datos LIDAR aerotransportados 143

Reducción de la exposición humana a fitosanitarios con el uso de CitrusVol y boquillas de baja deriva en cítricos 153

Composición y grupos funcionales del aceite de Moringa oleifera de Colombia: un estudio comparativo con aceites vegetales de España y Portugal 161

Estimación de los niveles nutricionales de hojas de cítricos mediante análisis no destructivo aplicando técnicas de aprendizaje automático 169

Shock-absorbing effect of air dampers to attenuate the pulsating effect of PWM nozzles in blast sprayers 177

Aplicaciones de la inteligencia artificial y análisis de imagen para previsión de cosecha en la uva embolsada de mesa del Vinalopó 187

Detección de objetos mediante IA para la caracterización de flotantes en el río Segura 197

Evaluación comparativa de modelos de inteligencia artificial aplicados a la detección y clasificación de tomates 207

Design and Validation of a Phenotyping Platform for Industrial Tomato Cultivation 215

Área temática: Construcciones e Infraestructuras Rurales/ Construção e Infra-Estruturas Rurais

Medición de presiones y tasa de descarga en un silo experimental con paredes de chapa ondulada....225
Optimización de la geometría de cartelas de rigidez en bases de pilares mediante modelos de elementos finitos....233
Análisis de las cargas de viento transversal por CFD en invernaderos multitunel de cubierta curva....247
Optimización de cubierta con vigas peraltadas de madera laminada: Ecuaciones de diseño....253
Influencia del contenido de humedad en las propiedades mecánicas del trigo....263
Coeficientes de rozamiento del castaño (Castanea Sativa Mill.) aserrado para clase de servicio II....273
Evaluación del proceso cíclico en los tableros sin adhesivos elaborados con tronco de palmera canaria (Phoenix canariensis....283
Valoración de tableros de partículas de residuos de podas de morera (Morus alba L)....293
Utilización de tableros multicapa de caña común (Arundo donax L.) para la rehabilitación de edificaciones tradicionales....303
Análisis del almidón de maíz como adhesivo en los tableros aglomerados de partículas de paja de arroz....313

Área temática: Energía/ Energia

Comparación de la eficiencia y rentabilidad de tres esquemas de estructuras soporte en instalaciones fotovoltaicas....325
Energía solar térmica para calentamiento de agua en bodegas....335
Reducción de las emisiones de CO2 en cultivo de maíz a través de la agricultura de precisión.... 343
Efecto de la adición de partículas en el proceso de digestión anaerobia de paja de trigo para la mejora de la producción de metano....351
Evaluación del Ciclo de Vida de la planta solar fotovoltaica de la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir (Sevilla)....357
Land use by photovoltaic installations and comparative studies in agrivoltaics at three locations in Iberian Peninsula....369

Área temática: Innovación Educativa en Agroingeniería/ Inovação Educativa em Agro-engenharia

Mapeo de los ODS y sus Metas en Competencias Curriculares de asignaturas vinculadas al Medio Natural, Agrario y Forestal de la Universidad de Valladolid....381
Domotic School Garden (DSG), alimentación saludable a través de la experimentación sensorial....391
Análisis de los planes de estudios y de las materias de construcción impartidas en los grados habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola de las universidades españolas....399
Experiencia de aprendizaje en el Domotic School Garden (ERASMUS+K2). Bancos de semillas....409
Construcción de hoteles de insectos: herramienta didáctica en huertos escolares agroecológicos....417
Experiencia de aprendizaje en el Domotic School Garden (ERASMUS+K2). Estación Agrometeorológica y actividades asociadas....425

Área temática: Mecanización y Seguridad y Salud en el Trabajo/ Mecanização e Saúde e Segurança no Trabalho

¿Afectan las boquillas de pulverización hidráulica a la eficacia de Beauveria bassiana?....437
Análisis de la siniestralidad por vuelco de tractor en el período 2017-2021....445
Estado actual de la protección frente al vuelco de quad....453

Registro de accidentes de tractores y maquinaria agrícola y forestal 461

Forecasting Agricultural Tractor Wholesale and Retail Remaining Value using Parametric and Non-parametric Models 469

Estudio del riesgo de incendio en empacadoras agrícolas 485

Evaluation of the Ground Speed Effect on the Performance of the Row-Side Continuous Canopy Shaking Harvester Prototype in a High-Density Olive Grove 493

Área temática: Proyectos, Medio Ambiente y Territorio/ Projectos, Ambiente e Território

Efecto de un fitofortificante en las propiedades de suelo, producción y calidad del cultivo de melón 476

Desarrollo y Evaluación de Redes Neuronales Artificiales para la Predicción de Temperaturas en Parques y Huertos Urbanos de la ciudad de Valladolid, Castilla y León, España. 513

Public perception of and involvement in Urban Agriculture and Food Security 523

Analysis of forest mass growth based on data obtained from LiDAR flights. 533

Establishing a Sustainable and Healthy Local Food System through the Establishment of Urban Spaces within two cities in Spain 541

Perfil fitoquímico y actividad antimicrobiana de un extracto amoniacal de carpóforos de Ganoderma lucidum 549

Impacto ambiental del cultivo de pomelo regado con agua de mar desalinizada en el sureste de España 559

Variación temporal de la humedad del combustible fino vivo (HCFV) de cuatro especies vegetales del Parque Regional de la Sierra del Valle y Carrascoy (Región de Murcia) 569

Phytoremediation potential of native plants species in mine soils polluted by metal(loid)s and rare earth elements 579

Native plants and mycorrhizal fungi reduce hydrophobicity and total petroleum hydrocarbons in an agricultural polluted soil 589

Nitrogen assessment in amended mining soils sown with Coronilla juncea and Piptatherum miliaceum 599

An evaluation of sustainability in wineries based on their performance in compliance with food safety. 609

La gran oportunidad para una nueva economía social sostenible en la España vacía tras la COVID-19 615

Obtención de los factores empleados en la valoración de árboles ornamentales no sustituibles en la última versión de la Norma Granada 523

El bosque de alimentos urbano con arreglo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Agenda 2030, ONU): el caso del BA de la Coop La Morera e Isla de Tercia (Sevilla) 533

Explotaciones Porcinas en la Provincia de Albacete: Localización, Caracterización y Producción de Estiércol 539

Área temática: Suelo y Aguas/ Solo e água

Efficiency of large-scale aided phytostabilization in a mining pond 649

Comparativa de biofertilizantes para el cultivó de Helianthus annuus 659

Modelización de los fenómenos de nitrificación en redes de distribución de aguas regeneradas 667

Respuesta al riego deficitario de los componentes de cosecha en olivar 675

Efecto del contralavado en la retención de sólidos a lo largo del medio filtrante en filtros de arena 683

Caracterización de filtros granulares en retrolavado con arena de sílice y microesferas de vidrio 691

Monitoring technologies in paddy rice fields. Case study in Lower Mondego Valley 699

Análisis multidisciplinar de la sustitución de recursos hídricos convencionales por no convencionales en los cultivos de la cuenca del Segura 707

Sistema de tratamiento de purín de cerdo mediante humedad artificial de flujo horizontal en serie 715

Optimización del riego en la producción de tomate de industria en la Vega Media del Guadalquivir: análisis de la huella hídrica. 727

Manejo del riego en el cultivo del almendro afectado por heladas. 737

Adaptability of pitaya (Hylocereus spp.) to aquaponic production in the first stages of growth 747

Respuesta del pepino a recortes severos del riego antes de cosecha 755

Área temática: Tecnología de la Información, Control de Procesos y Automatización/ Tecnologia da Informação, Controlo e Automatização de Processos

Diseño y construcción de sensores de humedad de bajo coste para uso en riego: validación y comparación con sensores comerciales 765

Estimación de los niveles nutricionales de hojas de cítricos mediante análisis no destructivo aplicando técnicas de aprendizaje automático 773

Desarrollo de un sistema de detección de 4 tipos malezas en el cultivo de Maíz (Zea mays L.) bajo invernadero utilizando el modelo YOLOv5 v7.0 781

Área temática: Tecnología de la Producción Animal y Acuicultura/ Tecnologia de Produção Animal e Aquicultura

Validación de sistemas de posicionamiento en interiores para granjas lecheras. Estudio de caso. 793

Depurado de los registros de estaciones electrónicas de alimentación en porcino: estimaciones de eficiencia 803

Área temática: Tecnología de Poscosecha/ Tecnologia Pós-colheita

Aprovechamiento de residuos de aguacate para la obtención de octoxinoles y ácido cianúrico, y su valorización como biorracionales 813

Consecuencias ambientales de la extensión de la vida útil: envasado convencional versus activo para ensaladas 821

Encapsulación de extractos de Uncaria tomentosa en nanotransportadores para el control de Botrytis cinerea en fresa 829

Influencia de factores de cultivo y conservación en el contenido en azúcares reductores en patata 837

Determinación de la textura en caqui 'Rojo brillante' mediante imagen hiperspectral Vis-NIR 845

Uso de imagen hiperespectral para la discriminación en postcosecha de variedades similares de níspero 855

Área temática: Tecnología de Invernadero/ Tecnologia de estufas

Constituyentes fitoquímicos y actividad antimicrobiana de extractos de Euphorbia serrata L. para la protección de cultivos de Borago officinalis L. 865

Análisis de sistema de enfriamiento evaporativo en invernadero con sistema de distribución de aire 875

Ajuste y validación de un modelo dinámico de balance de energía para estimar la temperatura en un invernadero colombiano de cubierta plástica. 883

Evaluación experimental de un sistema de calefacción pasiva adaptado a un invernadero de cubierta plástica. 893



Agricultura de Precisión / Agricultura de precisão



Cosechando datos de maíz forrajero: primeros resultados

J. Bueno[1], M.A. Vilar[2], J.M. Edreira[1], C. Irimia[1], J.M. Pereira[1], M. Dugo[1], T. Cuesta[1], J. Dafonte[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidade de Santiago de Compostela, Campus Terra, Lugo; javier.bueno@usc.es
[2] Departamento de Matemática Aplicada, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidade de Santiago de Compostela, Campus Terra, Lugo.

Abstract: In the last five years yield maps have begun to be obtained with Self-Propelled Forage Harvesters (SPFH) by contractors in northwest Spain. Data recorded with SPFH needs to be converted into useful information that can be used to improve the efficiency of forage production. But for this purpose, it is necessary to use a procedure for cleaning and processing the yield data files adapted to the typology of livestock farms in northwestern Spain. In the present work, the first tests are carried out to process the data files recorded by the forage choppers, where difficulties are detected due to compatibility between machines of different commercial brands and between different file formats. Also, the software applications to be used need to be tested with the different yield data formats. The first results confirm the need to clean the errors that are detected in the raw yield monitor data to obtain good yield maps with accurate information. The yield maps obtained after the data cleaning process will allow the adoption of Precision Agriculture technologies in the silage corn crop. This is the case of Variable Rate Applications (VRA) of seed and fertilizers, technologies with an incipient demand from contractors.

Palabras clave: Agricultura de precisión, maíz forrajero, mapas de rendimiento

1. Introducción

Las cosechadoras autopropulsadas de forraje, conocidas popularmente como picadoras de forraje, se han convertido en las máquinas más utilizadas por las empresas de servicios y cooperativas de utilización de maquinaria agrícola (CUMA) en las campañas de recolección de forraje que tienen lugar en las explotaciones ganaderas del noroeste de España.

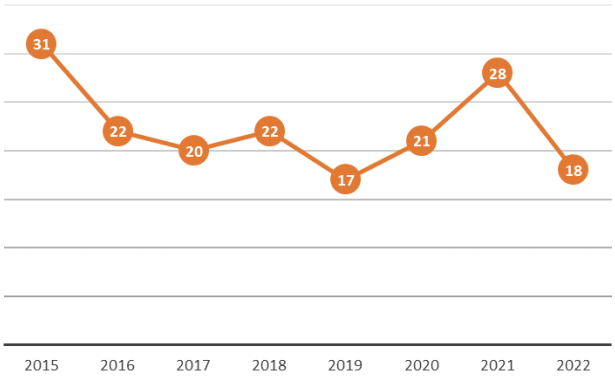


Figura 1. Inscripciones anuales de picadoras de forraje nuevas en el ROMA

En España, la media de unidades nuevas inscritas en el Registro Oficial de Maquinaria Agrícola (ROMA) en los últimos ocho años (2015-2022) ha sido de 22 máquinas anuales, de las que aproximadamente la mitad se inscriben en Galicia (48%). Como vemos en la evolución de las

inscripciones de la **Figura 1**, el número de unidades nuevas inscritas en el ROMA cada año es reducido en comparación con los principales mercados europeos. Por ejemplo, en Alemania se venden anualmente más de 500 unidades nuevas y en Francia más de 300.

En este tipo de máquinas el mercado de unidades de segunda mano es mucho mayor que el de unidades nuevas. En el año 2022, sobre un total de 98 máquinas inscritas en el ROMA, solo 18 (18,4%) fueron unidades nuevas, siendo el resto (80 unidades) cambios de titularidad o importaciones de máquinas usadas [1].

En los últimos cinco años las cosechadoras autopropulsadas de forraje de nueva adquisición han comenzado a disponer de sensores que miden la producción de forraje y su contenido en humedad, con lo que georreferenciando estos datos con las posiciones calculadas por un receptor GNSS situado encima de la cabina, permiten obtener mapas de rendimiento. Diversos sensores para la medida del rendimiento en las cosechadoras de forraje fueron probados entre finales de los años 90 y principios de los 2000. Finalmente, la solución adoptada por todos los modelos comerciales de picadoras de forraje fue el sistema de medida del desplazamiento en los rodillos de alimentación [2].

Para la medida del contenido de humedad se utilizan dos tipos de sensores, los de tipo capacitivo y los que se basan en espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) [3]. Estos últimos tienen un coste mucho mayor y también pueden determinar otras propiedades cualitativas del forraje (proteína, almidón, azúcar, fibra, cenizas…).

Dependiendo de la marca de la picadora de forraje, esta información se almacena en el sistema informático de la máquina en un formato diferente. En el mercado español el 59% de las unidades nuevas vendidas en los últimos 8 años son del modelo Jaguar de la casa comercial Claas. New Holland con un 26%, John Deere con un 11% y Krone con un 4% son las otras tres casas comerciales con unidades nuevas inscritas entre 2015 y 2022, pero con unas cuotas de mercado mucho más bajas.

Los mapas de rendimiento obtenidos por las cosechadoras pueden ser utilizados para optimizar las dosis de siembra y de fertilizantes mediante técnicas de Aplicación a Dosis Variable (ADV). Para ello es necesario cargar mapas de prescripción, obtenidos a partir del procesamiento de los mapas de rendimiento, en los ordenadores de los tractores que controlan las abonadoras y sembradoras. Como las marcas comerciales de tractores más vendidas no coinciden con las de picadoras de forraje (en el año 2022 Claas sólo tuvo un 2,5% de cuota de mercado en tractores), hay que solucionar el problema de la compatibilidad de archivos entre tractores y cosechadoras para poder utilizar técnicas de Agricultura de Precisión en cultivos forrajeros.

Aunque en el mercado se ha llegado a comercializar alguna iniciativa para facilitar el intercambio de los datos más relevantes de las máquinas agrícolas entre distintas marcas comerciales, éstos se limitan a posiciones de las máquinas, velocidades, estado del trabajo y niveles de combustible [4]. Los archivos de documentación, como es el caso de los datos de rendimiento, aún no son compatibles entre las distintas plataformas digitales asociadas a las casas comerciales.

Por otro lado, en los archivos con los datos de rendimiento en bruto generados por las cosechadoras, se detectan una serie de errores debidos a la georreferenciación, los sensores utilizados y factores operacionales [5]. Para obtener mapas de rendimiento fiables es necesario limpiar los archivos en bruto para depurar los errores y poder definir con precisión las zonas de gestión diferenciada en las parcelas. Las aplicaciones de software comerciales más utilizadas por los usuarios que realizan mapas de prescripción a partir de datos de producción con cultivos forrajeros, no ofrecen información clara de cómo realizan esta depuración de errores y, por lo tanto, sobre qué datos eliminan de los archivos en bruto obtenidos por las cosechadoras.

En la presente comunicación se exponen los primeros resultados obtenidos del análisis de los datos de dos empresas de servicios que quieren comenzar a ofertar técnicas de ADV en el cultivo del maíz forrajero a partir de los mapas de producción documentados con las

cosechadoras autopropulsadas de forraje. Ambas empresas utilizan para la documentación de sus operaciones mecanizadas el Centro de Operaciones de la casa comercial John Deere (COJD), al realizar dichas operaciones con tractores de la citada marca. Sin embargo, para las operaciones de recolección del maíz forrajero, las dos utilizan cosechadoras autopropulsadas de la casa comercial Claas, por lo que necesitan traducir los archivos de datos de cosecha generados en la picadora a un formato compatible con el COJD. Este proceso tiene que ser lo más simple y automatizado posible, con el fin de hacerlo compatible con la actividad comercial de estas empresas de servicios de maquinaria durante las campañas de recolección del forraje.

2. Materiales y métodos

Los datos utilizados en el presente trabajo fueron recogidos en dos empresas de servicios de maquinaria agrícola con sede en el noroeste de España. Las dos realizan operaciones mecanizadas en zonas ganaderas en las que destaca la recolección de forraje, para lo cual cuentan en sus parques con tres cosechadoras autopropulsadas de forraje cada una, todas modelos Jaguar 970 y 980 de la casa comercial Claas. También las dos utilizan una flota de tractores de la marca John Deere equipados con monitores que documentan las operaciones en archivos que son subidos posteriormente a la aplicación en la nube denominada Centro de Operaciones. Las dos empresas cosechan anualmente en torno a 1.000 ha de maíz forrajero repartidas en un elevado número de parcelas de reducida superficie.

Para la medida de la producción cosechada y el contenido de humedad del forraje se activó el sensor que mide el desplazamiento entre los rodillos de alimentación (que ya viene montado de serie en las picadoras) y se instaló el sensor capacitivo de medida del contenido de humedad en el tubo de descarga (ver **Figura 2**). Para la adquisición de los datos de producción, las cosechadoras de forraje se equiparon en sus cabinas con monitores John Deere (4600 y 4640) que por medio de un puente de la casa comercial Agra-GPS se conectaron con el Can-Bus de la máquina Claas y obtuvieron los archivos de rendimiento en formato jdl (John Deere Link) para poder ser subidos al Centro de Operaciones. En una de las empresas los datos se descargan de los monitores manualmente por medio de memorias USB tipo *pen drive* mientras que en la otra la descarga se realizaba telemáticamente por medio de un modem directamente a la nube. Para la georreferenciación de los datos, todas las cosechadoras iban equipadas con receptores GNSS John Deere Starfire 6000 y 7000 conectados a los monitores.



Figura 2. Sensores y equipos adicionales instalados en las cosechadoras autopropulsadas Izquierda: sensor de humedad del forraje en el tubo de descarga. Derecha: equipos instalados en cabina para la adquisición, georreferenciación y transmisión de los datos.

Para la descarga de los archivos con los datos de cosecha desde el Centro de Operaciones de cada empresa se utilizó la plataforma AgFiniti de la casa comercial Ag Leader. Esta aplicación en nube permite su sincronización con el Centro de Operaciones de John Deere y descargar automáticamente los archivos que cada empresa vaya subiendo al mismo. Posteriormente los datos brutos de rendimiento de cada parcela y campaña fueron importados en el software SMS (Spatial Management System), también de la casa comercial Ag Leader. Con el SMS se realizó una primera edición de los archivos consistente en ordenar correctamente las parcelas por clientes, granjas, campos y años, así como revisar sus límites, separar parcelas que aparecían juntas en un mismo archivo, juntar trozos de parcela que aparecían separados en distintos archivos y eliminar los datos con una humedad inferior al 46%. Tras ello los archivos fueron exportados en formato texto de Ag Leader Advanced (ALA.txt) para ser limpiados con el software Yield Editor 2.07 [6], que posee una serie de filtros y herramientas para depurar los errores típicos que aparecen en los mapas de rendimiento.

Los archivos de datos con problemas en el formato numérico de la columna de la duración del intervalo de medida de cada data registrado fueron corregidos utilizando el software Access de Microsoft. En total fueron procesados 372 archivos procedentes de 100 parcelas distintas pertenecientes a 36 explotaciones ganaderas diferentes de las provincias de Lugo y Asturias. En todas las parcelas se obtuvieron datos de producción de maíz forrajero con un mínimo de tres campañas cosechadas entre los años 2018 y 2022, dando lugar a entre 3 y 5 archivos distintos por parcela. La superficie de las parcelas analizadas estuvo comprendida entre la 1,8 y las 19,2 ha, con una media de 3,5 ha.

3. Resultados y discusión

3.1. Comportamiento de los equipos instalados en las cosechadoras

Los sensores y equipos instalados en las cosechadoras autopropulsadas de forraje permitieron adquirir los archivos con los datos de rendimiento georreferenciados de una forma satisfactoria. Además, al funcionar correctamente el puente Agra-GPS instalado entre la picadora Claas y el monitor 4640 de John Deere, la información adquirida se cargó correctamente en el Centro de Operaciones. Esta solución facilita la gestión y el análisis posterior de los datos al permitir utilizar una sola plataforma para toda la información, independientemente de que los archivos provengan de los trabajos realizados con los tractores o las cosechadoras. Para el técnico de la empresa de servicios es más cómodo trabajar con una única aplicación informática en lugar de tener que aprender el manejo de dos diferentes que, aunque permitan la exportación de sus archivos de una a otra, complican el aprendizaje y su uso diario.

3.2. Descarga de los archivos del Centro de Operaciones

Una vez que la empresa concede los permisos necesarios para establecer la conexión entre su Centro de Operaciones John Deere (COJD) y la plataforma AgFiniti, comienzan a descargarse de forma automática todos los archivos que se han subido al COJD desde el año que se establezca en la configuración. A partir de ahí, de cada nuevo archivo que la empresa sube al COJD se realiza una copia de forma automática e inmediata en la nube de AgFiniti. Este proceso funcionó de forma satisfactoria y permitio utilizar AgFiniti como una pasarela para descargar los archivos en el sofware SMS.

La descarga de los archivos de cosecha en el programa SMS desde AgFiniti también se realizó de una forma satisfactoria, aunque con problemas para ordenar correctamente los datos en el cliente, granja y campo correctos. Esto creemos que fue debido principalmente a carencias de la base de datos original creada por la empresa en el Centro de Operaciones. En campaña, al

trabajar con múltiples operarios, se producen errores como documentar la información de una misma parcela con diferentes denominaciones, agrupar parcelas diferentes en un mismo archivo o utilizar nombres de campos y de granjas idénticos para distintos clientes, que después dificultan la correcta identificación de los archivos por parte del software SMS. La organización metódica de la base de datos es un requisito a respetar escrupulosamente para despuès poder tener la información correctamente ordenada y poder gestionarla adecuadamente para la toma de decisiones.

Esta colocación incorrecta de algunos archivos obligó a realizar una primera edición de los mismos en el SMS. Las principales actuaciones consistieron en colocar los datos de cosecha en el cliente y campo correctos, separar parcelas que figuraban juntas en un mismo archivo o unir trozos de una misma parcela que aparecían en archivos diferentes. Mediante estos trabajos de edición se consiguieron obtener 365 archivos de datos (datasets) completos procedentes de la descarga automática desde el COJD por medio de la sincronización de AgFiniti y SMS. Solo 7 archivos (1,9%) necesitaron ser descargados manualmente desde el COJD al no ser encontrados en el SMS. Probablemente estos archivos también fuesen correctamente descargados por el procedimiento automático de sincronización de SMS con AgFiniti, pero por los problemas de colocación en un cliente y campo incorrecto, no se haya podido encontrarlos.

3.3. Limpieza de los archivos de datos de rendimiento

Una vez organizados todos los archivos de datos en bruto de cosecha en el programa SMS, se procedió a realizar su limpieza para eliminar los errores tomando como referencia el protocolo de procesado y limpieza establecido por Kharel et al. [7]. Para ello se procedió a exportar todos los archivos de datos en el formato Ag Leader Advanced (ALA) de archivo de texto (txt). Este es uno de los dos únicos formatos que admite el software Yield Editor, programa utilizado para aplicar los filtros para eliminar los errores que aparecen en los datos en bruto.

En este proceso de exportación se detectó un problema con el formato numérico de los datos de tiempo del intervalo de medida en el que se registra cada punto de rendimiento. Las cosechadoras trabajaron registrando los datos de rendimiento con un frecuencia de 1 Hz (1 dato por segundo), pero en la columna del archivo de datos en la que se reflejaba este atributo el valor numérico era una cifra decimal que no siempre coincidía con el valor de 1 segundo exacto. En la **Tabla 1** vemos las 10 primeras filas de parte de un archivo de datos exportado en formato csv en donde en la columna siete apreciamos estos valores decimales del intervalo de medida en segundos.

Tabla 1. Dataset en formato csv

Longitud (°)	Latitud (°)	Parcela	Producto	Obj. Id	Tiempo	Duración (s)
-7.2383179	43.48997345	Monte	Ensilado de maíz	13	9/22/2020	1
-7.23833145	43.48996829	Monte	Ensilado de maíz	14	9/22/2020	1
-7.23834361	43.48996196	Monte	Ensilado de maíz	15	9/22/2020	0.999
-7.23835439	43.48995515	Monte	Ensilado de maíz	16	9/22/2020	1.001
-7.23836744	43.48994973	Monte	Ensilado de maíz	17	9/22/2020	0.999
-7.23838079	43.48994589	Monte	Ensilado de maíz	18	9/22/2020	1.001

-7.23839766	43.48994066	Monte	Ensilado de maíz	19	9/22/2020	1.001
-7.23841491	43.48993646	Monte	Ensilado de maíz	20	9/22/2020	0.999
-7.23842848	43.48993251	Monte	Ensilado de maíz	21	9/22/2020	1
-7.23844234	43.48992849	Monte	Ensilado de maíz	22	9/22/2020	1

Cuando este mismo archivo de datos se exporta en formato txt ALA el resultado lo vemos en la **Tabla 2**, en donde en la cuarta columna observamos que los valores decimales anteriores del intervalo de medida han sido convertidos en números enteros, lo cual genera muchos valores iguales a cero. Esto provoca que cuando se calcula la producción por hectarea si multiplicamos el flujo medido en los rodillos de alimentación por un tiempo de medida igual a cero, nos da como resultado una producción también igual a cero. Por este motivo estos archivos en formato ALA txt han tenido que corregirse sustituyendo los ceros por intervalos de medida de 1 segundo para poder ser procesados por el software Yield Editor. Pero el redondeo realizado con todos los valores de la duración del intervalo de medida por el formato ALA txt, va a provocar que los datos de producción por hectárea no van a coincidir con los calculados con los valores decimales. Esto tiene como consecuencia que las producciones que calcula el programa Yield Editor difieren de las calculadas tanto en el Centro de Operaciones de John Deere como en el software SMS. Esta circunstancia, además de las limitaciones de sólo aceptar dos formatos de archivos muy concretos (ALA txt y John Deere Greenstar txt) y no aceptar datasets con los datos en unidades del sistema métrico, hacen que la utilización de Yield Editor como programa de referencia para la limpieza de archivos no parezca lo más conveniente en nuestro contexto geográfico.

Tabla 2. Dataset en formato Ag Leader Advanced txt

Longitud (°)	Latitud (°)	Flujo (lb/s)	Tiempo GPS (s)	Duración (s)
-7.238318	43.489973	67.37	1600786807	0
-7.238331	43.489968	81.34	1600786808	0
-7.238344	43.489962	79.89	1600786809	0
-7.238354	43.489955	43.94	1600786810	1
-7.238367	43.48995	56.31	1600786811	0
-7.238381	43.489946	73.73	1600786812	1
-7.238398	43.489941	76.42	1600786813	1
-7.238415	43.489936	139.54	1600786814	0
-7.238428	43.489933	166.19	1600786815	0
-7.238442	43.489928	112.25	1600786816	1

A pesar de estas limitaciones detectadas, se ha realizado la limpieza de los errores en los archivos de datos brutos utilizando los filtros que proporciona el programa Yield Editor. La

limpieza automática que ofrece la versión 2.07 de Yield Editor denominada AYCE (Automated Yield Cleaning Expert), se toma como referencia para el desarrollo de procedimientos alternativos que simplifiquen este trabajo a realizar por las empresas de servicios. Como resultado de estas pruebas se constata la importancia de trabajar con archivos libres de errores para determinar las distintas zonas de manejo de una parcela para realizar, por ejemplo, aplicaciones a dosis variable.

En la **Figura 3** podemos ver un ejemplo de establecer tres zonas de manejo (baja, media y alta producción) en una parcela de 3,75 ha a partir de datos brutos y a partir de datos limpios con limpieza manual y automática. La superficie catalogada como de bajo potencial productivo en la zona sur de la parcela se aprecia que cambia a potencial medio tras el proceso de limpieza. En la zona norte en cambio, se reduce la superficie de alto potencial productivo al eliminarse unos datos anómalos de producciones excesivas. En este ejemplo en primer lugar se han eliminado los datos de producción en verde de maíz forrajero con un contenido de humedad inferior al 46% siguiendo lo aconsejado por el protocolo de Kharel et al. [7]. A continuación, en la limpieza manual, se han eliminado los datos con producciones cuyos valores se apartan en +/- 2 desviaciones típicas (STD) de la media, con lo que desaparecen valores anómalos con producciones muy altas o muy bajas. Por último se ha realizado una limpieza automática aplicando filtros de retraso del flujo, velocidades y producciones mínimas y máximas, solapes y +/- 3 STD.

La consecuencia de este filtrado se puede apreciar con claridad en los rangos de las leyendas de las zonas con bajo y alto rendimiento de los tres mapas de la Figura 3. En futuros trabajos se analizará la influencia del tamaño de la parcela en el número de STD a considerar para filtrar los datos de producción, que suponemos que aumentarán al aumentar el tamaño de la parcela. Cuanto más pequeñas e irregulares son las parcelas, más aumentan las maniobras por unidad de superficie y, probablemente, también los puntos de baja producción que aparecen en cabeceros y zonas próximas a los lindes. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Amiama *et al.* [8] que evidenciaron que la capacidad de trabajo efectiva de las cosechadoras autopropulsadas de forraje tiende a aumentar cuando la superficie de las parcelas aumenta.

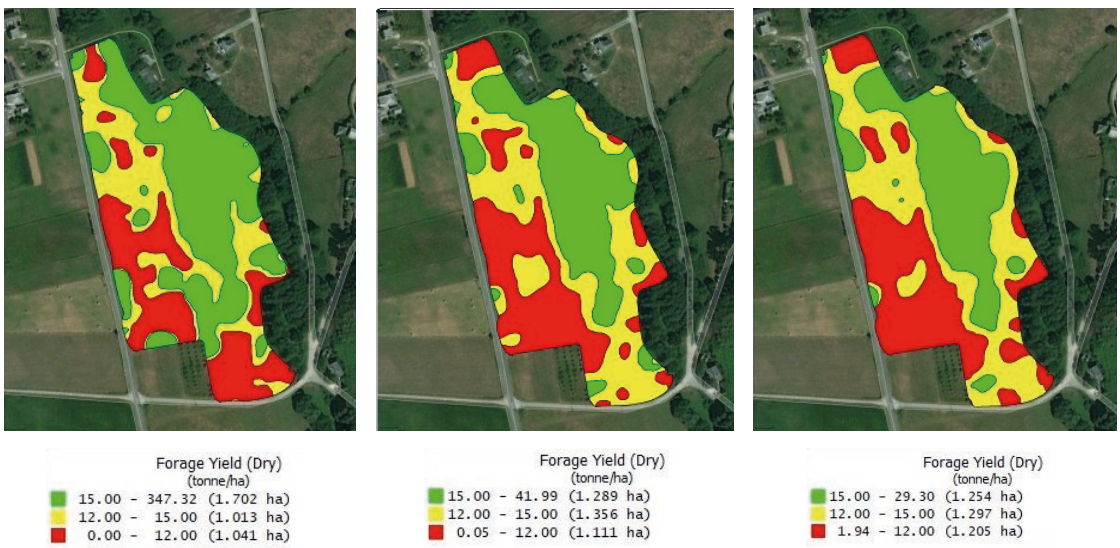


Figura 3. Mapas de rendimiento con tres zonas de manejo elaborados con un archivo sin limpiar (izquierda), con limpieza manual (centro) y con limpieza automática (derecha)

En la **Tabla 3** se muestran los resultados del proceso de limpieza sobre los datos brutos de partida. La combinación de descartar los datos con un contenido de humedad inferior al 46% junto con la limpieza manual o automática con el programa Yield Editor eliminó del 23%

(manual) al 29% (automática) de los datos, aumentando el rendimiento medio y disminuyendo el contenido medio de materia seca..

Tabla 3. Procesos de limpieza realizados (MV: materia verde, MS: materia seca)

Archivo	Nº datos	MV t/ha	MS t/ha	MS %	Datos eliminados	% eliminados
Datos brutos	3076	31.62	13.22	45.89	0	0%
Filtro Humedad < 46%	2428	33.95	13.62	40.65	648	21%
Limpieza manual	2383	33.88	13.59	40.64	693	23%
Limpieza automática	2198	34.03	13.64	40.51	878	29%

4. Conclusiones

Los primeros análisis de los datos de producción registrados por las cosechadoras autopropulsadas de forraje en el noroeste de España permiten intuir el gran potencial que su correcta interpretación puede tener para la optimización de la aplicación de insumos en las parcelas. El protocolo para la limpieza de archivos debe de ser adaptado a la estructura de las explotaciones en el área geográfica del presente estudio, donde la producción forrajera se basa en un elevado número de parcelas de reducida superficie.

5. Agradecimientos

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto "GO MilloPreciso – Agricultura de Precisión con maíz forrajero en Galicia", proyecto financiado por las ayudas para la ejecución de proyectos de los grupos operativos de la Asociación Europea de la Innovación (AEI), cofinanciadas en un 75% con el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) en el marco del Programa de desarrollo rural (PDR) de Galicia 2014-2020 con fondos propios de la Xunta de Galicia en un 22.5% y con fondos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en un 2.5%. La Consellería do Medio Rural es el órgano de la Administración gallega a la que le corresponde proponer y ejecutar las directrices generales en el ámbito rural, y engloba las competencias en materia de agricultura, ganadería, desarrollo rural y ordenación comarcal, estructuras rurales, industrias agroalimentarias y forestales, montes, prevención y defensa de los incendios forestales.

También ha contribuido en el presente estudio el proyecto colaborativo del Campus Terra "AgriPreMaF – Agricultura de Precisión con Maíz Forrajero", financiado en el marco del Convenio de Colaboración entre la USC y la Consellería de Cultura, Educación e Universidade de la Xunta de Galicia. Gracias, por último, a las empresas de servicios Agropres S.L. y Marcos Otero S.L. por su colaboración en estos dos proyectos.

Referencias

0. MAPA. Inscripciones de maquinaria agrícola. Año 2022. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 2023. 182 pp.

1. Digman M., Shinners K. Technology background and best practices: yield mapping in hay and forage. In: Proceedings, 2012 California Alfalfa and Grains Symposium, Sacramento, CA, 10-12 December, 2012.
2. Long E., Ketterings Q.M., Russell D., Vermeylen F., DeGloria S. Assessment of yield monitoring equipment for dry matter and yield of corn silage and alfalfa/grass. Precision Agriculture (2016) 17:546–563.
3. John Deere. DataConnect is now available globally across six major digital platforms. Press release. July 01,2021.
4. Kharel T.P., Swink S.N., Maresma A., Youngerman C., Kharel D., Czymmek K.J., Ketterings Q.M. Yield monitor data cleaning is essential for accurate corn grain and silage yield determination. Agronomy Journal 111: 509-516 (2019).
5. Sudduth K.A., Drummond S.T., Myers D.B. 2012. Yield editor 2.0: Software for automated removal of yield map errors. Paper No. 121338243. ASABE Annual International Meeting, Dallas, Texas.
6. Kharel T., Swink S.N., Youngerman C., Maresma A., Czymmek K.J., Ketterings Q.M., Kyveryga P., Lory J., Musket T.A., and Hubbard V. (2018). Processing/Cleaning Corn Silage and Grain Yield Monitor Data for Standardized Yield Maps across Farms, Fields, and Years. Cornell University, Nutrient Management Spear Program, Department of Animal Science, Ithaca NY.
7. Amiama C., Bueno J., Álvarez C.J. Influence of the physical parameters of fields and of crop yield on the effective field capacity of a self-propelled forage harvester. Biosystems Engineering 100 (2008) 198 – 205.



Evaluación del efecto de la fertilización con nitrógeno protegido sobre el rendimiento en cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) mediante observaciones Sentinel-2

Diana Carolina Polania[1], Juan Gonzalo Ardila[1], Luciano Orden[2,3], Néstor Alejandro Pezzola[2], Luis Manuel Navas-Gracia[4]

[1] Programa de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Cra.5 No. 23-40, Neiva, Colombia: carolina.polania@usco.edu.co; juan.ardila@usco.edu.co;
[2] Estación Experimental Agropecuaria INTA Ascasubi (EEA INTA Ascasubi), Ruta 3 Km 794, Hilario Ascasubi 8142, Buenos Aires, Argentina: ordenluciano4@gmail.com; alejandro.pezzola@gmail.com
[3] Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Grupo de investigación GIAAMA, Universidad Miguel Hernández, Carretera de Beniel Km, 03312 Orihuela, España: ordenluciano4@gmail.com
[4] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Grupo de investigación GIR-TADRUS, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid 50, 34004 Palencia, España: luismanuel.navas@uva.es

Abstract: Nitrogen is one of the essential nutrients in fertilization during rice (*Oriza sativa* L.) cultivation, but it is also the one that is most lost through volatilization, nitrification, and denitrification. On the market there are alternatives of fertilizers with nitrogen protected with coatings that block the cofactors responsible for the losses or the active sites of the urease enzyme. This study aims to evaluate the effect of fertilizers that incorporate protected nitrogen in two experimental plots of rice cultivation in the Experimental Farm of the Surcolombiana University in Palermo (Huila). For the comparison, satellite images and spectral vegetation indices adjusted to the soil (Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI) and improved (Enhanced Vegetation Index - EVI) were used to corroborate the manifest differences in the vigor of the plants in the plots under study. The results were affected by the fact that the broadcast planting method did not guarantee uniformity in the initial population, being 9.1% higher in the plot treated with conventional fertilizer, and even so, greater tillering and more pronounced growth was evidenced in the treated plot with protected nitrogen fertilizers, with 7.3% higher production in this plot. The spectral monitoring with SAVI and EVI carried out at the beginning and at the end of tillering showed a significant difference in the entire evaluated area, always showing greater vigor in the plot treated with protected nitrogen fertilizer. It was concluded that protected nitrogen fertilizers reduce nitrogen losses, increasing its availability to plants and improving their development and crop yield.

Palabras clave: abono, fertilizantes nitrogenados de liberación lenta, agricultura de precisión, índices multiespectrales, índices de vegetación, teledetección.

1. Introducción

El arroz (Oryza sativa L.) es el alimento básico de la mitad de la población y juega un papel clave en el mantenimiento de la seguridad alimentaria [1], [2]. El nitrógeno (N) es el nutriente más importante en la producción de arroz [3]. Pero resulta ser el nutriente más deficiente en los suelos por su alto potencial de pérdidas, y es el que se aplica en mayor cantidad [4]. Las vías de

pérdida de N en los sistemas de arroz son la volatilización y la nitrificación-desnitrificación, además de la lixiviación y la misma erosión del suelo [5]. Para el manejo eficiente de N deben controlarse: la tasa, la fuente y el momento de aplicación durante el ciclo fenológico. Fertilizantes nitrogenados de mayor eficiencia (Enhanced Efficiency Nitrogen Fertilizers - EENF) están formulados para reducir las pérdidas de N al medio ambiente al inhibir la actividad de la ureasa, o limitar la volatilización del NH_3 [4]. En el presente estudio se evaluó el uso de N protegido mediante dos productos: 1. La Urea Nutrisphere®, que es urea granulada recubierta con polímero que protege al N bloqueando los tres cofactores responsables de sus pérdidas: Fe, Ni y Cu; 2. El Nitroextend+Mg®, que utiliza N protegido para evitar las pérdidas por volatilización, y funciona bloqueando temporalmente el sitio activo de la enzima ureasa retardando de esta forma la hidrólisis de la urea.

La teledetección de arrozales plantados en regiones tropicales y subtropicales suele ser compleja debido a las condiciones climáticas (p. ej., la cobertura de nubes y sus sombras) y los múltiples sistemas de cultivo; aun así, los índices de vegetación (IV) se reconocen como indicadores robustos para monitorear la dinámica de los cultivos de arroz. El usó del IV ajustado al suelo (Soil Adjusted Vegetation index - SAVI) y el IV mejorado (Enhanced Vegetation Index – EVI) se han utilizado en múltiples investigaciones [6]–[24].

Teniendo en cuenta la amplia aceptación que ha tenido el uso de SAVI y EVI en el seguimiento de la dinámica fenológica y el rendimiento del cultivo de arroz, la presente investigación realizó evaluación a dos parcelas experimentales en el cultivo de la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana (USCO) en las que se evaluó el uso de fertilizantes con N protegido contra convencionales, mediante observaciones satelitales de Sentinel-2 en dos fechas claves del desarrollo del cultivo para verificar la evolución de los IV y determinar su utilidad como método de control no destructivo que permita la comparación de lotes de investigación.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización

En la Figura 1 pueden apreciarse las parcelas experimentales en la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana, ubicada en las coordenadas 2°53'9.12"N, 75°18'26.09"O en el municipio de Palermo (Huila), vereda San Miguel, Distrito de Riego El Juncal que fueron estudiadas en el presente proyecto.

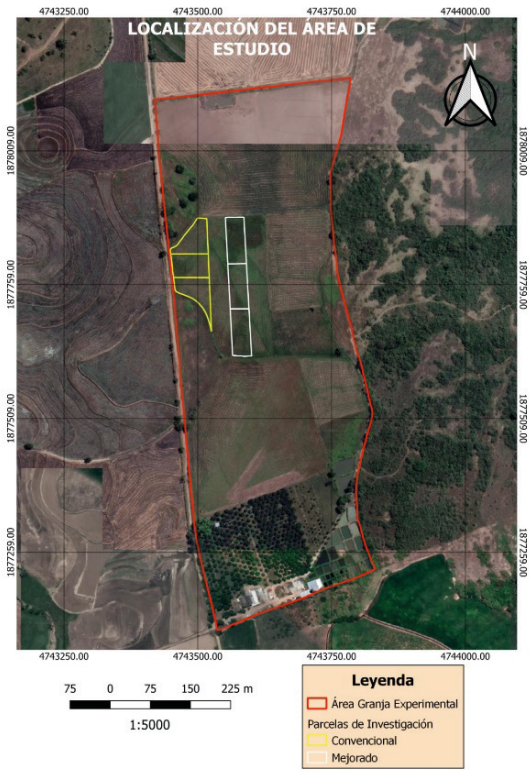


Figura 1. Localización parcelas experimentales.

2.2. Cultivo

Para caracterizar el suelo se midieron sus principales propiedades fisicoquímicas tomando tres muestras por parcela según recomendaciones de Sosa [25]. Se tomaron un total de 6 muestras, una por subparcela, entre los 15 y 20 cm de profundidad por medio de un palín, tomando entre 0.5 y 1.0 kg de suelo, para luego ser transportadas en bolsas herméticas hasta el Laboratorio de Recursos Geoagroambientales de la Universidad Surcolombiana. Allí se realizaron los debidos tratamientos de secado, tamizado y análisis. Los ensayos fueron: (1) Propiedades físicas: Textura Bouyoucos, Densidad Aparente, Densidad Real, Capacidad de campo, Punto de marchitez (IGAC). Y (2) Propiedades químicas: pH (NTC 5264), carbono orgánico (NTC 5403 modificado), fósforo disponible (NTC 5350 modificado), calcio, magnesio, potasio, sodio, aluminio (NTC 5349 modificado) + menores (hierro, manganeso, zinc, cobre) (NTC 5526 modificado), azufre (NTC 5402 modificado), capacidad de intercambio catiónico (NTC 5268 modificado), Conductividad Eléctrica, y Boro (Método H2O caliente).

Se realizó labranza primaria mediante 3 pases de rastra, y adecuación con 2 pases de microniveladora y caballoneo con curvas de nivel para la instalación del riego por inundación, lo que ayuda a mejorar la distribución del agua en las melgas, disminuyendo la escorrentía y favoreciendo la infiltración [26]. Cuando se realizó el proceso de siembra, aproximadamente 4 días después se aplicó el riego, durante dos días consecutivos el lote quedó saturado y con lámina de agua entre 2 a 3 cm.

El método de siembra empleado fue al voleo con 150 kg ha^{-1} de semilla certificada variedad Fedearroz FL 2020, pero las siembras al voleo son más irregulares y la germinación de la semilla no es uniforme, y dado que se evidenció que en el mes de diciembre del año 2021 se presentó una precipitación media de 211.4 mm, se pudo ocasionar un lavado de la semilla por precipitaciones que la pueden arrastrar en caso de no encontrarse tapada. Se esperaban entre 250 y 300 plantas m^{-2} para obtener entre 450 y 500 panículas m^{-2} [26], aunque 150 kg ha^{-1} representan unas 500 semillas m^{-2}.

Para el cultivo de arroz, el abonado debe ser rico en Nitrógeno, Potasio, Fósforo, Calcio, Magnesio y Azufre. En este estudio se utilizó una variedad de ciclo corto y se aplicaron 4 abonadas. Según la ficha técnica suministrada por Fedearroz, su variedad requiere 19 a 22 kg Ton^{-1} de Nitrógeno, 20 a 25 kg Ton^{-1} de Potasio y 3 a 5 kg Ton^{-1} de Fósforo. De acuerdo con los ensayos de laboratorio realizados y según el estado evidenciado del cultivo en visitas semanales se establecieron los planes de manejo, incluida la fertilización para cada tratamiento. El plan de fertilización realizado para cada tratamiento puede apreciarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Plan de fertilización: Convencional y con Nitrógeno protegido.

Abonada (fecha)	Convencional		N Protegido	
	Producto	[50 kg ha^{-1}]	Producto	[50 kg ha^{-1}]
Primera (10/01/22)	Urea Granulada 46-0-0®	2	Urea Granulada 46-0-0®	2
	Olafos – S®	1	Solufos 44®	0.5
	Agrimins Granulado®	1	NPK 6-6-6-5®	1
Segunda (21/02/22)	Urea Granulada 46-0-0®	2	Urea Nutrisphere®	2.5
	Olafos – S®	1	Solufos 44®	0.5
	KCL Granulado®	1.5	NPK 6-6-6-5®	1
	Terrabiol®	1.5	Trimag®	1
Tercera (16/03/22)	SAM®	1	Nitroextend+Mg®	2
	Dap Granulado®	2	Solufos 44®	1
	KCL Granulado®	2	Trimak®	2
	Sulcamag®	1	Nitrabor®	1
Cuarta (23/03/22)	Urea Granulada 46-0-0®	2	Nitroextend+Mg®	2
	SAM®	1	Trimak®	3
	KCL Granulado®	1.5	Nitrabor®	1

Las malezas constituyen el principal problema en el cultivo de arroz. Dada la alta población de arroz espontáneo y malezas varias detectada previamente al inicio de la campaña, se sugirió realizar tres quemas químicas el 21/09/21, 21/10/21 y 16/11/21. Los insumos empleados fueron: En la primera Glifofed 480® 5 l ha^{-1}, Fedeamina® 0.5 l ha^{-1}, Trauco – Goal® 0.33 l ha^{-1} y Natural Oil® 0.33 l ha^{-1}, para la segunda se usaron los mismos, pero 1.5, 1, 0.65 y 0.65 l ha^{-1}, respectivamente, y para la tercera se aplicaron Glifogan® 1.5 l ha^{-1}, Finale® 1.5 l ha^{-1}, Cletodim® 0.5 l ha^{-1}, Carrier® 0.33 l ha^{-1}, Trauco – Goal® 0.33 l ha^{-1}, y Metsulfed® 1 dosis. Es de mucha importancia proteger el cultivo de arroz cuando se encuentre en la etapa final de maduración contra los patógenos. Las aplicaciones de fungicidas se hicieron para la protección de la espiga. Los insumos utilizados fueron: Agrostick® 0.3 l ha^{-1}, Amistar Top® 0.5 l ha^{-1}, Cumbia (Triciclazol)® 0.3 kg ha-1 y Engeo® 0.3 l ha^{-1}, cuya fecha de aplicación fue el 24/03/22. Dados los buenos resultados de estos tratamientos, durante el desarrollo del proyecto no se evidenciaron plagas, ni enfermedades que pudieran afectar la producción obtenida.

Por último, la cosecha se realizó el 14/04/2022 con cosechadora Massey Ferguson 5650 con sus respectivas calibraciones y mediciones en campo.

2.3. Índices espectrales

El índice de vegetación SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) se introdujó por Huete [27] para mitigar el impacto del brillo del suelo añadiendo un factor de ajuste del suelo, que varía entre -1 y +1, a la ecuación del NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). L depende de la densidad de vegetación verde de la zona en cuestión, cuando es mucha se usa cero (SAVI = NDVI), y se usa uno para las zonas de vegetación verde baja. Lo habitual es usar L = 0,5 para ajustarse a la mayoría de suelos, así queda definido como en la Ecuación (1). Su uso se recomienda, como en el presente estudio, para el análisis de cultivos jóvenes en regiones áridas con vegetación escasa (menos del 15% de la superficie total) y superficies de suelo expuestas.

$$SAVI = (1 + L)\left(\frac{NIR-RED}{NIR+RED+L}\right) = 1{,}5\left(\frac{B8A-B04}{B8A+B04+0{,}5}\right) \quad (1)$$

Huete, Liu y van Leeuwen [28] introdujeron el índice de vegetación EVI (Enhanced Vegetation Index) para ajustar el NDVI a ruidos atmosféricos y del suelo, especialmente en las zonas de vegetación densa, así como para mitigar la saturación. Su rango de valores también es de -1 a +1 pero, específicamente, para la vegetación sana varía entre 0,2 y 0,8 como se midió en el presente estudio. El índice contiene los coeficientes C1 y C2 para corregir la dispersión de los aerosoles presentes en la atmósfera y L para ajustar el fondo del suelo y del dosel de la vegetación. Tradicionalmente C1 = 6, C2 = 7,5 y L = 1 se recomiendan al usar datos de Sentinel-2, por eso el modelo empleado en este estudio se describe mediante la Ecuación (2). El EVI se recomienda en zonas donde hay mucha clorofila, preferiblemente, con mínimos efectos topográficos (regiones no montañosas).

$$EVI = 2{,}5\left(\frac{NIR-RED}{NIR+C_1RED-C_2BLUE+L}\right) = 2{,}5\left(\frac{B8A-B04}{B8A+6(B04)-7{,}5(B02)+1}\right) \quad (2)$$

2.4. Observaciones satelitales

Para la obtención de las imágenes se utilizó el visor Land Viewer® de EOS Data Analytics, donde se seleccionó el área de estudio como se presentó en la Figura 1, para descargar las bandas espectrales disponibles para días sin nubosidad y en función de la resolución temporal del sensor Sentinel-2, que es de 10 días y 5 días de revisita, y teniendo en cuenta las fechas de seguimiento fenológico, siendo buenas las de 22 de febrero: inicio de macollamiento y las de 14 de marzo: finalización del macollamiento. Luego se procedió al postprocesamiento en el software QGIS®. En cuanto a la obtención de los índices, primero, por medio del complemento de clasificación semiautomática (Semi-Automatic Classification Plugin – SCP) se transformaron los datos de las imágenes a reflectancia y se realizó una corrección atmosférica, y luego se emplearon las herramientas Raster-Calculator y SCP, en las cuales se programaron las Ecuaciones (1) y (2). Posteriormente se creó una capa de puntos regulares espaciados cada 10 m, tal que coincidieran con los centroides de los píxeles, dada la resolución espacial del sensor empleado. Los puntos establecidos para la evaluación de las ecuaciones se presentan en la Figura 2.



Figura 2. Puntos de muestreo de índices espectrales.

Una vez obtenidos los datos se realizó el análisis estadístico descriptivo (Box plot), de varianza (ANOVA), y diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, para considerar si los tratamientos eran significativamente diferentes, lo que permitió identificar y cuantificar el efecto del estudio experimental con un nivel de confianza del 95% y determinar la existencia de diferencias significativas en cada uno de los índices analizados por parcelas (entre tratamientos), realizando un análisis espacial, y luego temporal.

3. Resultados y discusión

El uso de los índices espectrales SAVI y EVI, obtenidos con el software libre QGIS® a partir de observaciones Sentinel-2, manifiesta ser una herramienta de fácil acceso, útil y versátil para el seguimiento al desarrollo de cultivos, especialmente el de arroz en la zona de estudio. En la Figura 3 se presentan los diagramas de cajas de los datos observados en las parcelas experimentales. En la parcela que recibió tratamiento de nutrición convencional se localizaron inicialmente 87 puntos para el seguimiento satelital, mientras que en la parcela con N protegido fueron 86 puntos, al principio del macollamiento los promedios de SAVI y EVI fueron 0,099 y 0,093, respectivamente, para el tratamiento convencional, mientras se reportó 0,220 y 0,225 en promedio para el tratamiento con N protegido. Siendo bajo el vigor en esta edad temprana del cultivo, pero significativamente diferente como se estableció con ANOVA y LSD, siendo 132% mayor en promedio para N protegido. Los datos tuvieron una variabilidad considerable en un amplio rango, sobre todo en la parcela con N protegido, pero el ANOVA demostró la diferencia significativa entre medias con valores de 310,2 (p-value 2,9E-40) y 283,8 (p-value 3,7E-38) para el estadístico de prueba F para SAVI y EDI, respectivamente, siendo el valor crítico de tan solo 3,9. Además se calculó la diferencia mínima significativa entre medias por el método de Fisher, está resultó ser de 0,014 para SAVI y 0,015 para EVI, mientras la diferencia entre medias era de 0,126 y 0,127, respectivamente, aceptando nuevamente la hipótesis alternativa de diferencia de medias.

En la Figura 4 puede apreciarse el mapa de la distribución de ambos índices en este momento del seguimiento.

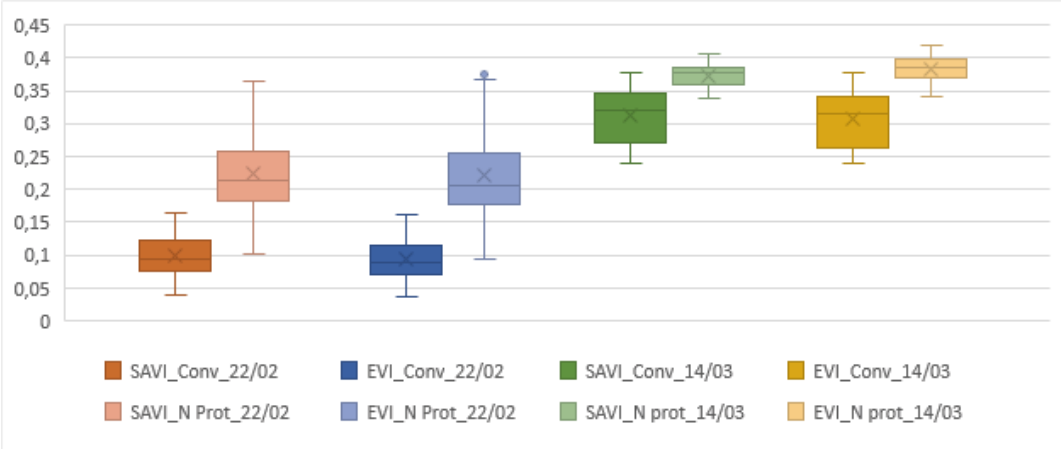


Figura 3. Diagramas de caja índices SAVI y EVI en parcelas experimentales.

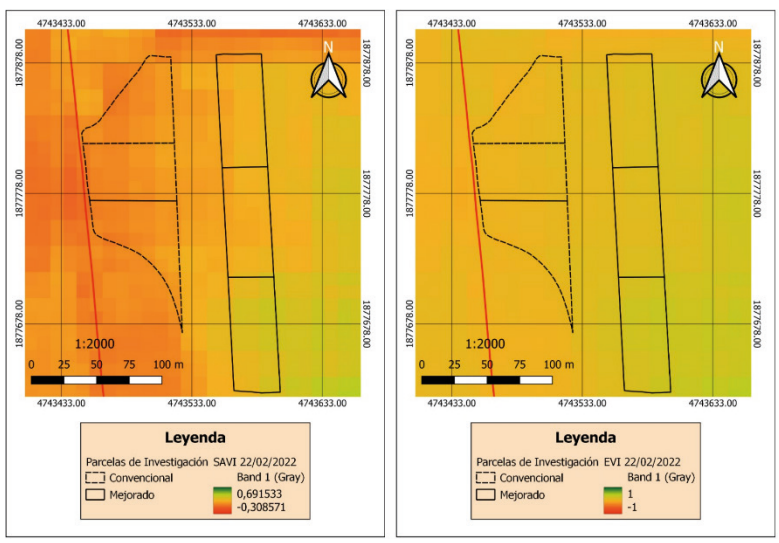


Figura 4. Mapas SAVI y EVI en parcelas experimentales al inicio del macollamiento.

Para el seguimiento realizado tras el máximo embuchamiento (momento en que la panícula alcanza la vaina de la hoja bandera, justo antes de emerger), al inicio de la floración, se utilizaron 26 puntos para tratamiento convencional y 28 para N protegido. Ahora los promedios de SAVI y EVI fueron 0,311 y 0,307 para el testigo, y de 0,373 y 0,383 para el tratamiento alternativo. Como se apreció en la Figura 3. Evidentemente aumentó el vigor en ambas parcelas, disminuyó la amplitud del rango de los datos medidos, y la diferencia entre tratamientos también disminuyó, pero las pruebas estadísticas demostraron que seguía siendo significativa, y aproximadamente 23% mayor en promedio con N protegido. Con ANOVA el estadístico F resultó en 51,81 (p-value 2,4E-9) y 74,07 (p-value 1,4E-11) para SAVI y EVI, respectivamente, cuando el valor crítico fue 4,03, validando la hipótesis alternativa de diferencia de medias. Igualmente se calculó la mínima diferencia que resultaría significativa, siendo 0,017 para SAVI y 0,018 para EVI, cuyas medias diferían 0,061 y 0,075, respectivamente. En la Figura 5 puede apreciarse el mapa de la distribución de ambos índices en este momento del seguimiento.

El vigor reportado siempre fue bajo, esto pudo obedecer a la baja densidad de siembra asociada a las pérdidas propias del método al voleo, pero los IV siempre mostraron una diferencia significativa entre las parcelas experimentales, más notoria al principio de la fase de

macollamiento y, no tanto, al final. Aun así, la producción de la parcela tratada con N protegido superó ligeramente a la fertilizada de forma convencional.

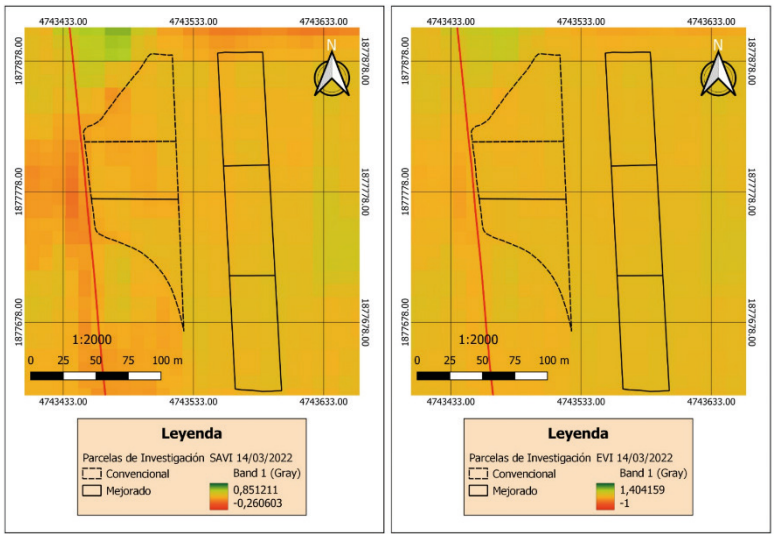


Figura 5. Mapas SAVI y EVI en parcelas experimentales al final del macollamiento.

4. Conclusiones

El uso de fertilizantes con N protegido disminuye las pérdidas por volatilización y nitrificación-desnitrificación permitiendo que haya más N disponible para el desarrollo de las plantas en el cultivo de arroz (Oriza sativa L.), beneficiando su evolución en las fases fenológicas de macollamiento y floración, y durante la formación de panículas y el llenado de grado, lo que conlleva a una mayor producción implementando estos fertilizantes.

Los IV: SAVI y EVI permiten evidenciar las diferencias causadas por el uso de fertilizantes mejorados contra convencionales al indicar cambios en el vigor medido en las áreas experimentales dedicadas a los estudios, siendo pruebas no invasivas ni destructivas que no afectan al cultivo como tal. Pero conseguir las imágenes satelitales resulta difícil por la nubosidad permanente en estas regiones tropicales, así que no se puede garantizar la disponibilidad de buenas imágenes en las fechas cruciales del proceso de desarrollo fenológico del cultivo.

5. Agradecimientos

A la Universidad Surcolombiana por proveer los recursos físicos y talento humano para el desarrollo de la investigación, y a la Universidad de Valladolid por proveer talento humano. A la Unión Europea, Programa Horizon Europe (HORIZONCL6-2022-FARM2FORK-01, Proyecto CIRAWA: Agro-ecological strategies for resilient farming in West Africa, ID 101084398), por el soporte financiero proporcionado.

Referencias

1. W. Hou et al., “Nitrogen rate and plant density interaction enhances radiation interception, yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice,” Agric. Ecosyst. Environ., vol. 269, no. October 2018, pp. 183–192, 2019, doi: 10.1016/j.agee.2018.10.001.
2. T. Mandana, G. Akif, Amiri Ebrahim, and N. Z. Azin, “Effect of nitrogen on rice yield, yield components and quality parameters,” African J. Biotechnol., vol. 13, no. 1, pp. 91–105, 2014, doi: 10.5897/ajb11.2298.

3. C. M. Perez, B. O. Juliano, S. P. Liboon, J. M. Alcantara, and K. G. Cassman, "Effects of late nitrogen fertilizer application on head rice yield, protein content, and grain quality of rice," Cereal Chem., vol. 73, no. 5, pp. 556–560, 1996.
4. B. A. Linquist, L. Liu, C. van Kessel, and K. J. van Groenigen, "Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: Meta-analysis of yield and nitrogen uptake," F. Crop. Res., vol. 154, pp. 246–254, 2013, doi: 10.1016/j.fcr.2013.08.014.
5. N. K. Fageria, A. Moreira, and A. M. Coelho, "Yield and yield components of upland rice as influenced by nitrogen sources," J. Plant Nutr., vol. 34, no. 3, pp. 361–370, 2011, doi: 10.1080/01904167.2011.536878.
6. P. Li, C. Xiao, and Z. Feng, "Mapping rice planted area using a new normalized EVI and SAVI (NVI) derived from landsat-8 OLI," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 15, no. 12, pp. 1822–1826, 2018, doi: 10.1109/LGRS.2018.2865516.
7. S. Phadikar and J. Goswami, "Vegetation indices-based segmentation for automatic classification of brown spot and blast diseases of rice," 2016 3rd Int. Conf. Recent Adv. Inf. Technol. RAIT 2016, pp. 284–289, 2016, doi: 10.1109/RAIT.2016.7507917.
8. Y. Oguro, Y. Suga, S. Takeuchi, M. Ogawa, T. Konishi, and K. Tsuchiya, "Comparison of SAR and optical sensor data for monitoring of rice plant around Hiroshima," Adv. Sp. Res., vol. 28, no. 1, pp. 195–200, 2001, doi: 10.1016/S0273-1177(01)00345-3.
9. N. T. Son, C. F. Chen, C. R. Chen, L. Y. Chang, H. N. Duc, and L. D. Nguyen, "Prediction of rice crop yield using MODIS EVI-LAI data in the Mekong Delta, Vietnam," Int. J. Remote Sens., vol. 34, no. 20, pp. 7275–7292, 2013, doi: 10.1080/01431161.2013.818258.
10. N. T. Son, C. F. Chen, C. R. Chen, V. Q. Minh, and N. H. Trung, "A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation," Agric. For. Meteorol., vol. 197, pp. 52–64, 2014, doi: 10.1016/j.agrformet.2014.06.007.
11. L. Shihua, X. Jiangtao, N. Ping, Z. Jing, and W. Hongshu, "Monitoring paddy rice phenology using time series modis data over Jiangxi province, China," Int. J. Agric. Biol. Eng., vol. 7, no. 6, pp. 28–36, 2014, doi: 10.3965/j.ijabe.20140706.005.
12. J. Zhang, J. Zhang, and Y. Xu, "Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China," 2012 2nd Int. Conf. Remote Sensing, Environ. Transp. Eng. RSETE 2012 - Proc., pp. 1–4, 2012, doi: 10.1109/RSETE.2012.6260530.
13. S. Liu, X. Liu, M. Liu, L. Wu, C. Ding, and Z. Huang, "Extraction of rice phenological differences under heavy metal stress using EVI time-series from HJ-1A/B data," Sensors (Switzerland), vol. 17, no. 6, pp. 1–17, 2017, doi: 10.3390/s17061243.
14. M. Boschetti, F. Nutini, G. Manfron, P. A. Brivio, and A. Nelson, "Comparative analysis of normalised difference spectral indices derived from MODIS for detecting surface water in flooded rice cropping systems," PLoS One, vol. 9, no. 2, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0088741.
15. X. Xiao et al., "Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images," Remote Sens. Environ., vol. 95, no. 4, pp. 480–492, 2005, doi: 10.1016/j.rse.2004.12.009.
16. G. Zhang et al., "Mapping paddy rice planting areas through time series analysis of MODIS land surface temperature and vegetation index data," ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., vol. 106, pp. 157–171, 2015, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.05.011.
17. R. Kimura, S. Okada, H. Miura, and M. Kamichika, "Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field," Agric. Water Manag., vol. 69, no. 2, pp. 83–100, 2004, doi: 10.1016/j.agwat.2004.04.009.
18. X. Li-Hong, C. Wei-Xing, L. Wei-Hong, and W. Shao-Hua, "Relationship Between Spectral Vegetation Indices and LAI in Rice," Chinese J. Plant Ecol., vol. 28, no. 1, pp. 47–52, 2004, doi: 10.17521/cjpe.2004.0007.

19. S. Liu et al., "Simulating the Leaf Area Index of Rice from Multispectral Images," Remote Sens., vol. 13, no. 18, p. 3663, 2021, doi: 10.3390/rs13183663.
20. J. Lu et al., "Evaluating an unmanned aerial vehicle-based remote sensing system for estimation of rice nitrogen status," 2015 4th Int. Conf. Agro-Geoinformatics, Agro-Geoinformatics 2015, pp. 198–203, 2015, doi: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2015.7248117.
21. W. Wang et al., "Common Spectral Bands and Optimum Vegetation Indices for Monitoring Leaf Nitrogen Accumulation in Rice and Wheat," J. Integr. Agric., vol. 11, no. 12, pp. 2001–2012, 2012, doi: 10.1016/S2095-3119(12)60457-2.
22. X. Li-Hong, L. Ping, Y. Lin-Zhang, S. Yu-Hua, F. Xiao-Hui, and H. Yong, "Estimation of Soil Nitrogen Status with Canopy Reflectance Spectra in Rice," Chinese J. Plant Ecol., vol. 30, no. 4, pp. 675–681, 2006, doi: 10.17521/cjpe.2006.0088.
23. M. Aboelghar et al., "Using SPOT data and leaf area index for rice yield estimation in Egyptian Nile delta," Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci., vol. 14, no. 2, pp. 81–89, 2011, doi: 10.1016/j.ejrs.2011.09.002.
24. H. Naito et al., "Estimating rice yield related traits and quantitative trait loci analysis under different nitrogen treatments using a simple tower-based field phenotyping system with modified single-lens reflex cameras," ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., vol. 125, pp. 50–62, 2017, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2017.01.010.
25. D. A. Sosa, "Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos," Instituo Nac. Tecnol igía Agropecu., pp. 1–5, 2012.
26. D. Fernando Pineda Suárez and H. Morales Montaña, Principios básicos para el manejo eficiente del agua en el cultivo de arroz en Colombia. Bogotá D.C.: FEDEARROZ - Fondo Nacional del Arroz, 2017.
27. A. R. Huete, "A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)," Remote Sens. Environ., vol. 25, pp. 295–309, 1988.
28. A. R. Huete, H. Q. Liu, and W. J. D. van Leeuwen, "Use of vegetation indices in forested regions: Issues of linearity and saturation," Int. Geosci. Remote Sens. Symp., vol. 4, no. 1, pp. 1966–1968, 1997, doi: 10.1109/igarss.1997.609169.

Comparación de la densidad de siembra en cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) mediante observaciones Sentinel-2

Juan Gonzalo Ardila[1], Diana Carolina Polania[1], Luciano Orden[2,3], Néstor Alejandro Pezzola[2], Luis Manuel Navas-Gracia[4]

[1] Programa de Ingeniería Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Cra.5 No. 23-40, Neiva, Colombia: juan.ardila@usco.edu.co; carolina.polania@usco.edu.co
[2] Estación Experimental Agropecuaria INTA Ascasubi (EEA INTA Ascasubi), Ruta 3 Km 794, Hilario Ascasubi 8142, Buenos Aires, Argentina: ordenluciano4@gmail.com; alejandro.pezzola@gmail.com
[3] Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Grupo de investigación GIAAMA, Universidad Miguel Hernández, Carretera de Beniel Km, 03312 Orihuela, España: ordenluciano4@gmail.com
[4] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Grupo de investigación GIR-TADRUS, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid 50, 34004 Palencia, España: luismanuel.navas@uva.es

Abstract: The sustainability of rice (*Oryza sativa* L.) cultivation is at risk because many current production practices and technologies are inadequate, leading to high cost and inefficient use of resources such as water, labor, and energy. This reality has promoted the expansion of the technique of implementing the crop through direct mechanized dry sowing. In this project, monitoring was carried out via satellite images, to two experimental plots in the Experimental Farm of the Surcolombiana University in Palermo (Huila) in which 150 kg ha^{-1} were sown using two different techniques: direct broadcast wet sowing and sowing direct dry machining. For the comparison, follow-up was carried out by means of an initial population count, two bunches counts, and a panicle count. And in parallel to this monitoring, satellite images and the spectral indices of normalized difference vegetation (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) and Green NDVI (Green NDVI - GNDVI) were used to corroborate the manifest differences in the density and vigor of the plants in the study plots. The results showed that, although the same amount of seed was applied, in the broadcast plot only 156 plants m^{-2} germinated, on average, while in the mechanized plot there were 218. Phenological monitoring, both manual and via spectral indices, showed more vigor and better development in the mechanized plot, but the low sowing density in the broadcast plot allowed better panicle formation and grain filling, which led to a similar production in both plots.

Palabras clave: mecanización agrícola, agricultura de precisión, índices multiespectrales, índices de vegetación, teledetección.

1. Introducción

Se debe garantizar un suministro sostenible de arroz (*Oryza sativa* L.) [1]. Se ha dado el paso de los métodos de trasplante a los de siembra directa, además, los métodos de siembra en seco, permiten mayor eficiencia en el uso del agua [2]. El método para siembra directa en seco tradicional es la siembra al voleo manual en suelo labrado, pero la siembra mecánica en hileras logra reducir los requisitos de mano de obra y mejorar la emergencia [3]. Fukai (2019) explican que la siembra mecanizada requiere menos semilla (40 a 50 kg/ha) en comparación con el voleo (120 kg/ha) y reduce los problemas de malezas [4].

La densidad de siembra es un factor clave en el crecimiento de las plantas, una densidad baja reduce la competencia aérea y subterránea entre plantas, aumentando su crecimiento, no por unidad de área de tierra pues son menos plantas, pero de mayor tamaño individual. El rendimiento del arroz está relacionado positivamente con el número de panículas, el aumento de la densidad conduce a un mayor número de plantas por unidad de área de tierra, y tiene un efecto negativo sobre el macollamiento [5–7]. En el caso específico del arroz, el rendimiento está relacionado de manera positiva con el número de panículas, pero no siempre es así. Un aumento de la densidad de siembra conduce a un mayor número de plantas por unidad de área de tierra lo que a su vez puede aumentar el número total de panículas y, potencialmente, aumentar el rendimiento. Sin embargo, también se ha observado que un aumento excesivo en la densidad de siembra puede tener un efecto negativo en el macollamiento del arroz. Un menor macollamiento puede limitar la producción de panículas y, por lo tanto, afectar negativamente el rendimiento.

Es importante brindarles a los productores de arroz una herramienta que permita la comparación entre el rendimiento real y el estimado, que les permita una estimación precisa, rápida y económica, sabiendo que un levantamiento manual requiere una gran cantidad de esfuerzo y tiempo [8]. A lo largo de los años se han estudiado muchas metodologías de estimación del rendimiento del arroz que utilizan imágenes e índices espectrales de vegetación [8–14].

Teniendo en cuenta la amplia aceptación que ha tenido el uso de NDVI y GNDVI en la densidad de siembra [15–18], la presente investigación realizó seguimiento vía imágenes satelitales de Sentinel-2 en tres fechas claves del desarrollo del cultivo a dos parcelas experimentales en el cultivo de la Granja experimental de la Universidad Surcolombiana (USCO) en las que se evaluó la siembra directa en húmedo al voleo, en una parcela donde no era recomendable introducir la máquina sembradora, contra una parcela donde se sembró con la Sembradora SEMEATO SSM-23 aplicando la técnica de siembra directa en seco.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización

En la Figura 1 pueden apreciarse las parcelas experimentales en la Granja Experimental de la Universidad Surcolombiana, ubicada en las coordenadas 2°53'9.12"N, 75°18'26.09"O en el municipio de Palermo (Huila), vereda San Miguel, Distrito de Riego El Juncal que fueron estudiadas en el presente proyecto.

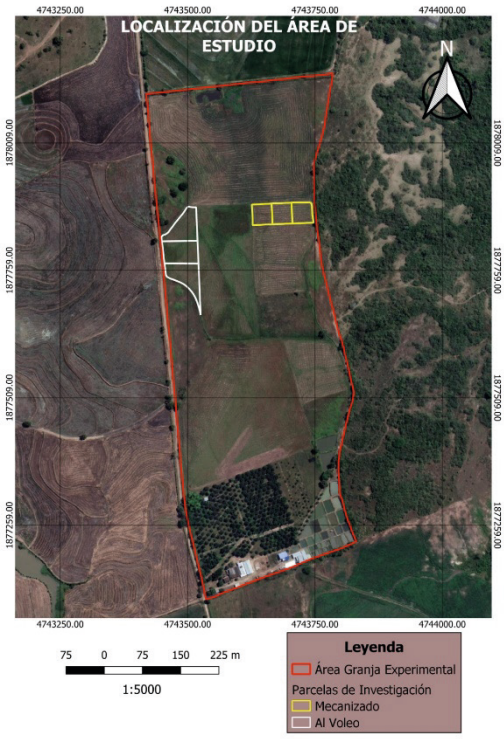


Figura 1. Localización parcelas experimentales.

2.2. Cultivo

El tractor empleado para la preparación y la adecuación de las parcelas fue un New Holland 8030 de 124 C.V. La preparación consistió en 3 pases de rastra con profundidades de trabajo de hasta 20 cm para el arado de disco, y la adecuación se realizó mediante 2 pases de microniveladora y caballoneo con curvas de nivel para la instalación del riego por inundación. Se aplicó el riego por contorno teniendo en cuenta las curvas de nivel, ya que el terreno no cuenta con un mejoramiento de pendiente, para trabajarlo por melgas o piscinas. Cuando se realizó el proceso de siembra, aproximadamente 4 días después se aplicó el riego, durante dos días constantes el lote quedó saturado y con lámina de agua entre 2 a 3 cm. Cuando el arroz estaba en etapa vegetativa, se realizaron mojas rápidas y la lámina de agua fue delgada, porque se necesitaba que la semilla tuviera humedad, pero también calor [19].

La densidad de siembra sugerida fue de 150 kg ha^{-1} con semilla certificada variedad de ciclo corto Fedearroz FL 2020. Los métodos de siembra empleados para evaluar en este estudio fueron: (1) Al voleo, con una expectativa inicial de un 10% de pérdida, ya que las siembras al voleo son irregulares y la germinación no es uniforme, pero la causa de esta decisión fue el encharcamiento que se presentó en esa parcela experimental específicamente, pues se evidenció que en el mes de diciembre del año 2021 se presentó una precipitación media de 211.4 mm y el lugar no tiene buen drenaje por su pendiente y tipo de suelo, además esto pudo ocasionar un lavado de la semilla por precipitaciones empeorando la condición de pérdidas asociadas al método. Teniendo en cuenta que es suelo franco-arenoso nivelado con pendiente 3% aproximadamente. Y (2) Con sembradora mecánica de grano fino Semeato SSM-23. Al verificar la densidad de siembra durante el conteo poblacional se tuvo en cuenta que, según [20], para un óptimo rendimiento se deben establecer entre 250 y 300 plantas m^{-2} para obtener entre 450 y 500 panículas m^{-2}, sabiendo que para la densidad de siembra establecida de 150 kg ha^{-1} se estiman unas 500 semillas m^{-2}.

De acuerdo con el estado evidenciado del cultivo en visitas semanales se establecieron los planes de manejo, incluida la fertilización para cada tratamiento, el plan de fertilización y el cronograma de actividades se realizó de la misma manera para toda el área experimental, siendo

diferente entre sí, solo la técnica de siembra. Las malezas constituyen el principal problema en el cultivo de arroz. Dada la alta población de arroz espontáneo y malezas varias detectada previamente al inicio de la campaña, se sugirió realizar tres quemas químicas. El abono se utiliza para enriquecer las propiedades minerales y la calidad del suelo destinado al cultivo de arroz, y debe ser rico en Nitrógeno, Potasio, Fósforo, Calcio, Magnesio y Azufre. Según Fedearroz, la variedad empleada requiere 19 a 22 kg Ton-1 de Nitrógeno, 20 a 25 kg Ton-1 de Potasio y 3 a 5 kg Ton-1 de Fósforo. Es de mucha importancia proteger el cultivo de arroz cuando se encuentre en la etapa final de maduración contra los patógenos. Las aplicaciones de fungicidas se hicieron para la protección de la espiga. Dados los buenos resultados de estos tratamientos, durante el desarrollo del proyecto no se evidenciaron plagas, ni enfermedades que pudieran afectar la producción obtenida.

Por último, la cosecha se realizó el 14/04/2022 con cosechadora Massey Ferguson 5650 con sus respectivas calibraciones y mediciones en campo.

2.3. Índices espectrales

Entre los índices espectrales de vegetación típicos, el NDVI es uno de los más adecuados para seguir la dinámica de desarrollo de la vegetación, ya que mide la biomasa fotosintéticamente activa de las plantas. Su primer usó es reportado por [21]. El NDVI es el índice de vegetación más común en teledetección, sus valores son más precisos a mediados del cultivo, en la fase de crecimiento activo. No debe usarse cuando la vegetación y su cubierta vegetal es demasiado escasa, ya que su reflectancia espectral es demasiado baja, porque este índice es bastante sensible a la luminosidad del suelo y a los efectos atmosféricos. El modelo empleado en este estudio se describe mediante la Ecuación (1).

$$NDVI = \left(\frac{NIR-RED}{NIR+RED}\right) = \left(\frac{B8A-B04}{B8A+B04}\right) \qquad (1)$$

El índice GNDVI es una modificación del NDVI que también utiliza el infrarrojo cercano, pero sustituye el verde visible por el rojo visible (540 a 570 nm). Mide el contenido de clorofila con mayor precisión que el NDVI. Se usa para detectar y monitorizar cultivos marchitos o envejecidos y medir el contenido de nitrógeno en las hojas cuando no se dispone de un canal rojo extremo. El modelo empleado en este estudio se describe mediante la Ecuación (2) tal como lo propuso [22].

$$NDVI\ (Sentinel-2) = \left(\frac{NIR-GREEN}{NIR+GREEN}\right) = \left(\frac{B8-B3}{B8+B3}\right) \qquad (2)$$

2.4. Observaciones satelitales

Para la obtención de las imágenes se utilizó el visor Land Viewer® de EOS Data Analytics, donde se seleccionó el área de estudio como se presentó en la Figura 1, para descargar las bandas espectrales disponibles para días sin nubosidad y en función de la resolución temporal del sensor Sentinel-2, que es de 10 días y 5 días de revisita, y teniendo en cuenta las fechas de seguimiento fenológico, siendo buenas las de 22 de febrero: macollamiento y las de 14 de marzo: embuchamiento y las de 3 de abril: madurez. Luego se procedió al postprocesamiento en el software QGIS®.

En cuanto a la obtención de los índices, primero, por medio del complemento de clasificación semiautomática (Semi-Automatic Classification Plugin – SCP) se transformaron los datos de las imágenes a reflectancia y se realizó una corrección atmosférica, y luego se emplearon las herramientas Raster-Calculator y SCP, en las cuales se programaron las Ecuaciones de los índices NDVI y GNDVI. Para poder realizar la corrección atmosférica se accedió a la sección preprocesamiento del SCP y se incorporaron las bandas de trabajo indicando la ruta donde se encontraban y la ruta del archivo de metadatos, dentro de las funciones de procesado se buscó la opción aplicar corrección atmosférica DOS1. Posteriormente se creó una capa de puntos regulares

espaciados cada 10 m, tal que coincidieran con los centroides de los píxeles, dada la resolución espacial del sensor empleado. Los puntos establecidos para la evaluación de las ecuaciones se presentan en la Figura 2.



Figura 2. Puntos de muestreo de índices espectrales.

3. Resultados y discusión

En la Figura 3 se presentan los diagramas de cajas de los datos observados en las parcelas experimentales en las 3 fechas en las que fue posible obtener buenas imágenes. En la parcela que fue sembrada al voleo se localizaron 87 puntos para el seguimiento satelital (Figura 3), mientras que en la parcela con siembra mecanizada fueron 47 puntos por ser de menor área, durante el macollamiento los promedios de NDVI fueron 0,47 para la siembra a voleo y 0,63 para la siembra mecanizada, durante el embuchamiento subieron a 0,77 y 0,83, respectivamente, y en la madurez bajaron a 0,68 y 0,80. Siendo bajo el vigor en la primera medición por ser una edad temprana del cultivo en la que parte del píxel tiene suelo, durante el embuchamiento se evidencia el máximo vigor, pero en madurez ya se inició la senescencia y las hojas ya están cloróticas por lo vuelve a bajar el índice de vigor del cultivo. En los tres momentos, esos promedios son significativamente diferentes como se estableció con ANOVA, siendo 34,0% mayor para la parcela mecanizada en macollamiento, 7,8% en embuchamiento y 17,6% a la madurez. El ANOVA demostró la diferencia significativa entre medias con valores de 86,1, 36,6 y 133,2 para el estadístico de prueba F en cada fase de evaluación, respectivamente, siendo el valor crítico de tan solo 3,9, aceptando la hipótesis alternativa de diferencia de medias. Este resultado se consideró evidencia de diferencia en los conteos poblacionales, aunque se esparciera la misma cantidad de semilla, la diferencia en la densidad de siembra obedeció a la implementación de diferentes métodos de siembra. En la Figura 4 puede apreciarse el mapa de la distribución del NDVI en cada momento del seguimiento.

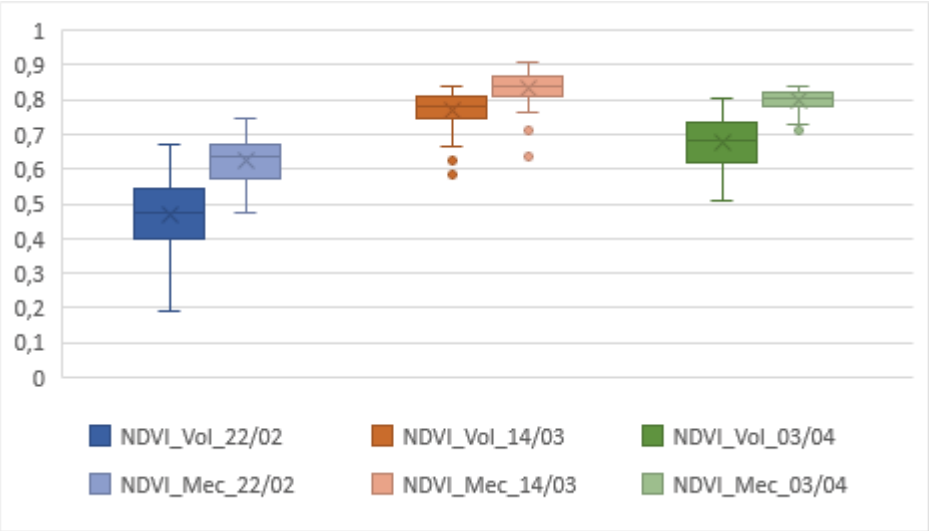


Figura 3. Diagramas de caja índice NDVI en parcelas experimentales durante el desarrollo del cultivo de arroz.

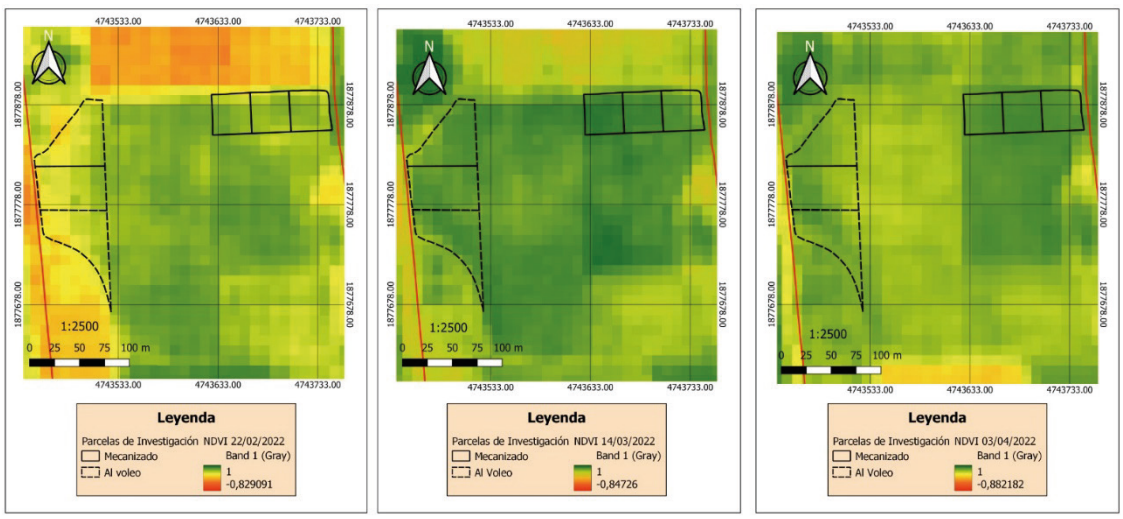


Figura 4. Mapas NDVI en parcelas experimentales durante el desarrollo del cultivo de arroz.

En la Figura 5 pueden apreciarse los resultados del seguimiento realizado al índice GNDVI. Durante el macollamiento los promedios fueron 0,50 para la siembra a voleo y 0,59 para la siembra mecanizada, durante el embuchamiento subieron a 0,71 y 0,81, respectivamente, y en la madurez bajaron a 0,68 y 0,76. Mostrando el mismo comportamiento que NDVI, reforzando igualmente la conclusión sobre las diferentes densidades de siembras, es decir la alta pérdidad de semilla por siembra al voleo, y nuevamente se estableció diferencia significativa con ANOVA, siendo 18,0% mayor para la parcela mecanizada en macollamiento, 14,1% en embuchamiento y 11,8% a la madurez, estas diferencias porcentuales resultan diferentes a las NDVI por la sensibilidad de este índice a la clorofila, nótese que la diferencia es menor cuando hay menos clorofila en macollamiento y madurez, pero resulta mayor en el momento de máximo vigor. El ANOVA demostró la diferencia significativa entre medias con valores de 67,4, 111,4 y 125,0 para el estadístico de prueba F en cada fase de evaluación, respectivamente, siendo el valor crítico de tan solo 3,9, aceptando la hipótesis alternativa de diferencia de medias, y se soporta de nuevo que el índice GNDVI es más sensible a la presencia de clorofila que el índice NDVI. En la Figura 6 puede apreciarse el mapa de la distribución del GNDVI en cada momento del seguimiento.

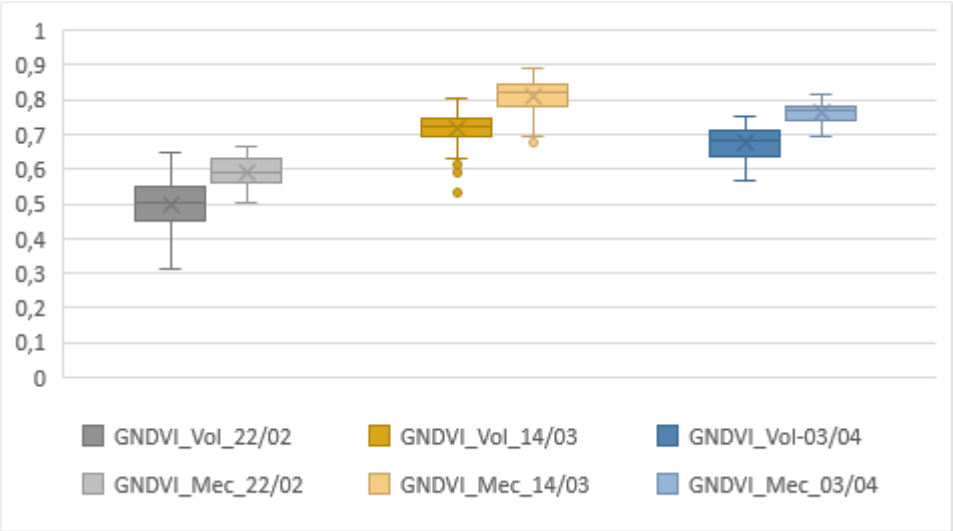


Figura 5. Diagramas de caja índice GNDVI en parcelas experimentales durante el desarrollo del cultivo de arroz.

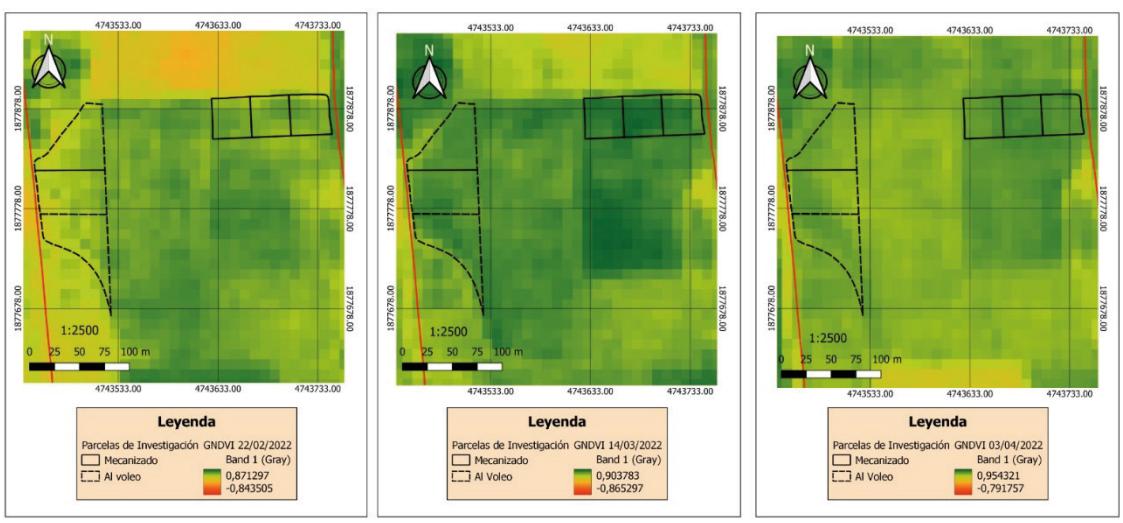


Figura 6. Mapas GNDVI en parcelas experimentales durante el desarrollo del cultivo de arroz.

Se logró verificar que la siembra directa mecanizada causó mayor densidad de siembra, pero que esto afectó el llenado de grano y se obtuvo una producción similar, concluyendo que es mejor la siembra mecanizada, pero con menor densidad; también se determinó la utilidad del seguimiento con imágenes satelitales e índices de vegetación como método no destructivo de fácil implementación.

Los resultados mostraron que, aunque se aplicó la misma cantidad de semilla, en la parcela al voleo solo germinaron, en promedio, unas 156 plantas m-2, mientras en la parcela mecanizada llegaron a ser 218. El seguimiento fenológico, tanto manual como vía índices espectrales, mostró más vigor y mejor desarrollo en la parcela mecanizada, pero la baja densidad de siembra en la parcela al voleo permitió mejor formación de panículas y llenado de grano, lo que llevó a una producción similar en ambas parcelas. Por otro lado, el parámetro de rendimiento del peso de 1000 granos reportó incidencia del tratamiento, el peso promedio fue de 32.98 y 27.11 gr para siembra al voleo y mecanizada, respectivamente. El dato superior a los 30 gramos en el tratamiento de siembra al voleo concuerda con la expectativa para un cultivo bien nutrido, pero la lectura inferior para el tratamiento de siembra mecanizada se contradice con la evolución fenológica donde el tratamiento de mayor densidad de siembra reportó mejor macollamiento y

embuchamiento, pero demostró falencias en el llenado de grano, aunque, como se ha explicado, recibió el mismo manejo agronómico. Este resultado conllevó a que, al realizar la extrapolación del peso de los granos llenos de cada aforador, descontando los granos vanos, a unidades de bultos ha^{-1} de cada subparcela, teniendo en cuenta que el peso de cada bulto es de 62.5 kg, no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos. Pero, curiosamente, la ligera diferencia entre promedios generales de 116.5 y 106.7 bultos ha-1 para siembra al voleo y siembra mecanizada, respectivamente, favoreció al tratamiento de siembra al voleo, nuevamente la diferencia en la densidad de siembra pudo favorecer el rendimiento por disminuir la competencia por nutrientes y aumentar el área disponible para crecimiento de las plantas, pero los resultados presentados previamente no auguraban este suceso.

4. Conclusiones

La siembra al voleo en el cultivo de arroz (Oriza sativa L.) causa pérdidas de semilla que conllevan una menor densidad de siembra si se usa la misma cantidad de semilla que en siembra mecanizada, y resulta en una distribución no uniforme que dificulta el control de maleza al compararla con la distribución organizada por hileras que se consigue con la máquina.

La pérdida de semilla causada por el método de siembra al voleo representa un sobrecosto para el agricultor, y podría conllevar a una disminución en la producción si no se logrará una densidad de siembra adecuada.

Una baja densidad de siembra beneficia la formación de panículas y el llenado de grado en las plantas individuales, lo que conlleva a una mayor producción, es importante establecer la densidad de siembra apropiada a cada variedad de semilla empleada. Es más fácil garantizar una densidad de siembra dada implementando la siembra mecanizada que al voleo.

Los IV: NDVI y GNDVI permiten evidenciar las diferencias causadas por la densidad de siembra al indicar cambios en el vigor medido en las áreas experimentales dedicadas a los estudios, siendo pruebas no invasivas ni destructivas que no afectan al cultivo como tal. Pero no evidencian procesos como el llenado de grano, así que no permiten predecir exactamente la producción que se obtendrá.

5. Agradecimientos

A la Universidad Surcolombiana por proveer los recursos físicos y talento humano para el desarrollo de la investigación, y a la Universidad de Valladolid por proveer talento humano. A la Unión Europea, Programa Horizon Europe (HORIZONCL6-2022-FARM2FORK-01, Proyecto CIRAWA: Agro-ecological strategies for resilient farming in West Africa, ID 101084398), por el soporte financiero proporcionado.

Referencias

[1] R. K. Jat, V. S. Meena, M. Kumar, V. S. Jakkula, I. R. Reddy, and A. C. Pandey, "Direct Seeded Rice: Strategies to Improve Crop Resilience and Food Security under Adverse Climatic Conditions," *Land*, vol. 11, no. 3, 2022, doi: 10.3390/land11030382.

[2] S. Pandey, M. Mortimer, L. Wade, T. P. Tuong, K. Lopez, and B. Hardy, *Direct Seeding: Research Strategies and Opprtunities*, vol. 13, no. 1. Makati City, Philippines: IRRI, 2002.

[3] R. R. Bakker, M. A. Bell, and J. F. Rickman, "Mechanization issues in tillage and crop establishment for dry direct seeded rice," in *Direct Seeding: Research Strategise and Opportunities*, IRRI, 2002, pp. 219–230.

[4] S. Fukai, P. Xangsayasane, D. Manikham, and J. Mitchell, "Research strategies for mechanised production of rice in transition from subsistence to commercial agriculture: a case study from Khammouan in Lao PDR," *Plant Prod. Sci.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–11, 2019, doi:

10.1080/1343943X.2018.1561199.

[5] H. Shimono, "Rice genotypes that respond strongly to elevated CO2 also respond strongly to low planting density," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 141, no. 1–2, pp. 240–243, 2011, doi: 10.1016/j.agee.2011.02.028.

[6] S. Hayashi, A. Kamoshita, and J. Yamagishi, "Effect of planting density on grain yield and water productivity of rice (Oryza sativa L.) grown in flooded and non-flooded fields in Japan," *Plant Prod. Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 298–311, 2006, doi: 10.1626/pps.9.298.

[7] M. Huang, C. Yang, Q. Ji, L. Jiang, J. Tan, and Y. Li, "Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of southern China," *F. Crop. Res.*, vol. 149, pp. 187–192, 2013, doi: 10.1016/j.fcr.2013.04.029.

[8] K. Yawata, T. Yamamoto, N. Hashimoto, R. Ishida, and H. Yoshikawa, "Mixed model estimation of rice yield based on NDVI and GNDVI using a satellite image," in *Proc.SPIE*, Oct. 2019, vol. 11149, p. 1114918, doi: 10.1117/12.2532108.

[9] F. Wang, J. Huang, Y. Tang, and X. Wang, "New Vegetation Index and Its Application in Estimating Leaf Area Index of Rice," *Rice Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 195–203, 2007, doi: 10.1016/s1672-6308(07)60027-4.

[10] R. Kimura, S. Okada, H. Miura, and M. Kamichika, "Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field," *Agric. Water Manag.*, vol. 69, no. 2, pp. 83–100, 2004, doi: 10.1016/j.agwat.2004.04.009.

[11] Y. C. Tian, X. Yao, J. Yang, W. X. Cao, D. B. Hannaway, and Y. Zhu, "Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance," *F. Crop. Res.*, vol. 120, no. 2, pp. 299–310, 2011, doi: 10.1016/j.fcr.2010.11.002.

[12] S. Phadikar and J. Goswami, "Vegetation indices based segmentation for automatic classification of brown spot and blast diseases of rice," *2016 3rd Int. Conf. Recent Adv. Inf. Technol. RAIT 2016*, pp. 284–289, 2016, doi: 10.1109/RAIT.2016.7507917.

[13] D. A. García Cárdenas, J. A. Ramón Valencia, D. F. Alzate Velásquez, and J. R. Palacios Gonzalez, "Dynamics of the Indices NDVI and GNDVI in a Rice Growing in Its Reproduction Phase from Multi-spectral Aerial Images Taken by Drones BT - Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change II," 2019, pp. 106–119.

[14] S. Candiago, F. Remondino, M. De Giglio, M. Dubbini, and M. Gattelli, "Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images," *Remote Sens.*, vol. 7, no. 4, pp. 4026–4047, 2015, doi: 10.3390/rs70404026.

[15] A. Kross, H. McNairn, D. Lapen, M. Sunohara, and C. Champagne, "Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 34, no. 1, pp. 235–248, 2015, doi: 10.1016/j.jag.2014.08.002.

[16] B. Boiarskii, "Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content," *J. Mech. Contin. Math. Sci.*, vol. spl1, no. 4, 2019, doi: 10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003.

[17] H. Qi *et al.*, "Monitoring of peanut leaves chlorophyll content based on drone-based multispectral image feature extraction," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 187, no. June, p. 106292, 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106292.

[18] L. J. Mangewa *et al.*, "Comparative Assessment of UAV and Sentinel-2 NDVI and GNDVI for Preliminary Diagnosis of Habitat Conditions in Burunge Wildlife Management Area, Tanzania,"

Earth (Switzerland), vol. 3, no. 3, pp. 769–787, 2022, doi: 10.3390/earth3030044.

[19] G. Lopesierra Marzal and O. Molina Castro, "Comportamiento fisiológico de las variedades de arroz (Oryza sativa L.) Colombia XXI, Fedearroz 50 y Fedearroz 2000 bajo la influencia de los factores climáticos (humedad relativa, temperatura, radiación solar) en el municipio de Aracataca Magdalena," Universidad del Magdalena, 2006.

[20] I. C. Ávila Cortes, "Adopcion Masiva de Tecnología," Bogotá, DC, Colombia, 2015.

[21] J. . Rouse, R. H. Haas, J. A. Scheel, and D. W. Deering, "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS," in *3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1974, vol. 24, no. 1, pp. 48–62, doi: 10.1021/jf60203a024.

[22] A. A. Gitelson, Y. J. Kaufman, and M. N. Merzlyak, "Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS," *Remote Sens. Environ.*, vol. 58, no. 3, pp. 289–298, 1996, doi: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.

Efectos de diversos tipos de luz artificial sobre los fitoquímicos de *Lactuca sativa* L. var. *Great Lakes 118*

Luisa Fernanda Lozano-Castellanos[1], Eva Sánchez-Hernández[1], Adriana Correa-Guimaraes[1], Luis Manuel Navas-Gracia[1], Jesús Martín-Gil[1] y Pablo Martín-Ramos[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia; luisafernanda.lozano@uva.es (L.F.L.-C.); eva.sanchez.hernandez@uva.es (E.S.-H.); adriana.correa@uva.es (A.C.-G.); luismanuel.navas@uva.es (L.M.N.-G.); mgil@iaf.uva.es (J.M.-G.); pmr@uva.es (P.M.-R.)

Abstract: The worldwide demand for Great Lakes 118 lettuce (Lactuca sativa L.) is increasing and information on the effects of different light wavelengths on its phytochemical composition is required. In the present study, hydromethanolic extracts of lettuce grown under white, blue, and red artificial irradiation were characterized by vibrational spectroscopy and gas chromatography-mass spectroscopy (GC-MS) techniques. Based on GC-MS results, it is shown that white or blue light irradiation of this lettuce leads to higher neophytadiene yields, while blue or red-light irradiation results in a significant presence of fatty acid methyl esters (palmitic, linoleic, and linolenic).

Palabras clave: GC-MS, FAMEs, irradiación artificial, lechuga, neofitadieno

1. Introducción

La luz es una de las variables ambientales más importantes para regular el crecimiento, desarrollo y acumulación de fitoquímicos en las plantas, especialmente para las verduras producidas en un ambiente controlado. Así, la iluminación artificial desempeña un papel esencial en horticultura al posibilitar la producción ininterrumpida de cultivos y alcanzar mayores rendimientos a lo largo del año [1]. Este logro se debe a la capacidad de proporcionar una adecuada y controlada cantidad de radiación lumínica, emitida en forma de luz visible, para el crecimiento y óptimo desarrollo de las plantas [2,3]. La influencia de diferentes longitudes de onda, que corresponden a los diferentes colores visibles, ha sido objeto de estudio en investigaciones recientes [4-6]. De este modo, la luz roja y azul, comunes en horticultura, se perciben como óptimas para el crecimiento de las plantas porque, en el laboratorio, las clorofilas absorben principalmente en esos rangos del espectro y la curva de McCree muestra que la eficiencia cuántica de la fotosíntesis resulta mayor que con la luz blanca.

La lechuga (*Lactuca sativa L.*) ha sido uno de los cultivos de interés y varias investigaciones [7,8] han revelado los efectos que la composición del espectro y la duración de la exposición tienen en la síntesis y acumulación de metabolitos para maximizar su rendimiento y calidad nutricional. La luz roja e infrarroja (620–1000 nm) se han asociado con la estimulación de la fotosíntesis y la acumulación de pigmentos y antioxidantes [9-11], y la luz azul (450–495 nm), con la síntesis de compuestos nutricionales y bioactivos con propiedades antimicrobianas [11,12]. No solo la luz blanca (400–700 nm), con su amplia gama de longitudes de onda, es susceptible a influir en múltiples procesos metabólicos en las plantas, sino que también las luces monocromáticas son capaces de estimular un aumento significativo en la producción y concentración de estos compuestos orgánicos [13]. Esto sugiere que la luz LED monocromática puede ser utilizada como una estrategia para incrementar la acumulación de metabolitos secundarios, lo cual podría tener implicaciones en términos de su potencial antioxidante, antimicrobiano u otras propiedades deseables.

La información sobre los roles que juegan las luces blanca, roja y azul sobre composición en fitoquímicos de las plantas es limitada. Samuolienė *et al.* [14], demostraron que la concentración de fenoles en lechugas de hoja roja y verde se incrementó en 52,7 y 14,5 %, respectivamente, cuando se aplicó luz LED roja durante 16 h antes de la cosecha; sin embargo, este no fue el caso de la lechuga de hoja verde. En la revisión realizada por Bian *et al.* [15], la luz roja, azul y UV-A parecen ser efectivas para aumentar la biosíntesis y acumulación de antocianinas.

En este contexto, la presente investigación estudia el efecto de la iluminación artificial, específicamente de la luz roja-infrarroja, azul y blanca sobre la generación de metabolitos en lechugas cultivadas bajo sistema de cultivo aeropónico, un método que permite el crecimiento de plantas sin utilizar suelo al aplicar una neblina de nutrientes directamente sobre las raíces. La demanda de lechuga está aumentando, y la investigación sobre la variedad iceberg *'Great Lakes 118'* parece obligada.

2. Materiales y métodos

2.1. Reactivos y material vegetal

El metanol (grado HPLC ≥ 99,8%) se adquirió a Sigma Aldrich Química S.A. (Madrid).

Las semillas y plantas de lechuga variedad "Great Lakes 118" utilizadas en los experimentos fueron suministradas por FITOPAL (Palencia). Las semillas fueron germinadas en bloques de lana de roca y recolectadas a los 41 días de ser irradiadas (llamadas en adelante "lechugas pequeñas"); y las plántulas de lechuga (llamadas en adelante "lechugas grandes") fueron adquiridas con 15 días de crecimiento en sustrato y recolectadas a los 20 días de ser irradiadas. Los rastros de sustrato en las raíces fueron eliminados antes de disponer las lechugas en bloques de lana de roca.

2.2. Condiciones de cultivo

El experimento se llevó a cabo en un sistema aeropónico con 3 unidades de producción aisladas por una lámina de policarbonato celular blanco y una cubierta negra. Cada unidad cuenta con 4 cámaras de crecimiento de polipropileno donde se insertan 2 plantas de lechuga a una distancia de 20 cm. Un nebulizador CoolNET PRO (Regaber, Barcelona) de doble boquilla fue insertado en la zona central interna de cada cámara, proporcionando un tamaño de gota de 65 micras bajo una presión de 4,0 bar. La nebulización duró 5 min con intervalos de 1 h antes de nebulizar nuevamente. Se utilizó 50 mL de fertilizante biomineral Aero Supermix (GroHo Hidroponía, Madrid) por cada 25 L de agua, el cual fue reciclado a través de un sistema de recirculación cerrado.

El sistema de iluminación artificial (Boos Technical Lighting SL, Valladolid) se caracteriza por 2 luminarias instaladas en cada unidad de producción, con 4 placas de circuito impreso (PCB) con 9 luces LED rojas, azules, infrarrojas y blancas cada una. Los tratamientos de irradiación para cada unidad fueron: Roja-Infrarroja con Flujo de Fotones de 49,14 μMol/s.m^2, Azul con 23,44 μMol/s.m^2, y Blanca con 67,40 μMol/s.m^2. Las plantas tuvieron ciclo de luz/oscuridad de 12 h/12 h. Los espectros de luz se midieron usando un espectrómetro StarLine AvaSpec-ULS2048CL, EVO Series con detector CMOS (Avantes, Apeldoorn, Países Bajos) y una fibra óptica FC-UVIR400-2 (fibra de 400 μm, 2 m, terminación SMA), con tiempo de integración de 9 μs – 59 s y velocidad de muestreo con promedio integrado de 0.38 ms para rangos espectrales de 360 a 1100 nm.

2.3. Procedimiento de extracción

Se mezclaron distintos especímenes según la condición y crecimiento para obtener muestras representativas, que se secaron a la sombra, se pulverizaron hasta obtener un polvo fino en un molino triturador, se homogeneizaron y se tamizaron (malla de 1 mm). 45 g y 7,5 g de polvo de lechuga grande y pequeña irradiada con luz blanca se dispersaron en una solución metanol/agua (1:1 *v/v*, 50 mL de H2O + 50 mL de MeOH), y se calentaron en un baño de agua a 50 °C durante

30 min, seguido de sonicación durante 5 min en modo de pulso con una parada de 1 min cada 2,5 min, utilizando un ultrasonicador tipo sonda modelo UIP1000 hdT de Hielscher Ultrasonics (Teltow, Alemania). A continuación, la solución se centrifugó a 9000 rpm durante 15 min y el sobrenadante se filtró a través de papel Whatman n.º 1. Se liofilizaron alícuotas del extracto para su caracterización vibracional y mediante cromatografía de gases-espectroscopía de masas (GC–MS), en estado sólido y en una disolución de 5 mg del liofilizado en 1 mL de MeOH para obtener una solución de 5 $mg \cdot mL^{-1}$, respectivamente. Se realizó el mismo procedimiento para el polvo de lechugas grandes y pequeñas irradiadas con luz azul (25,3 g y 15,7 g, respectivamente) y para aquellas irradiadas con luz roja e infrarroja (23,2 g y 3,6 g, respectivamente).

2.4. Caracterización

La medición de clorofila (CHL), flavonoles (FLAV), antocianinas (ANTH), e índice de equilibrio de nitrógeno (NBI) se realizó con el sensor foliar Dualex METOS® (Pessl Instruments, Werksweg, Austria) bajo sistema de medición por transmitancia y fluorescencia de la clorofila.

Se utilizó un espectrómetro de infrarrojos con transformada de Fourier (FTIR) Nicolet iS50 de Thermo Scientific (Waltham, MA, EE.UU.) con un sistema de reflexión total atenuada (ATR) de diamante incorporado para recoger los espectros vibracionales infrarrojos de los extractos liofilizados. Los espectros se registraron entre 400 y 4000 cm^{-1}, con una resolución espectral de 1 cm^{-1}, combinando 64 barridos.

Los extractos hidrometanólicos de las lechugas se analizaron por GC–MS en los Servicios de Apoyo a la Investigación (STI) de la Universidad de Alicante utilizando un cromatógrafo de gases Agilent Technologies modelo 7890A acoplado a un espectrómetro de masas de cuatro polos modelo 5975C. Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: volumen de inyección = 1 µL; temperatura del inyector = 280 °C, en modo *splitless*; temperatura inicial del horno = 60 °C, durante 2 min, seguida de una rampa de 10 °C/min hasta una temperatura final de 300 °C, durante 15 min. La columna cromatográfica utilizada para la separación de los compuestos fue una columna HP-5MS UI de Agilent Technologies con una longitud de 30 m, un diámetro de 0,250 mm y un espesor de película de 0,25 µm. Las condiciones del espectrómetro de masas fueron las siguientes: temperatura de la fuente de impacto de electrones del espectrómetro de masas = 230 °C; temperatura del cuadrupolo = 150 °C; energía de ionización = 70 eV. La identificación de los componentes se basó en la comparación de sus espectros de masas y tiempos de retención con los de los compuestos auténticos y en el cotejo informático con la base de datos del National Institute of Standards and Technology (NIST11).

3. Resultados

3.1. Caracterización de clorofila y polifenoles

La exposición a la luz azul y blanca demostró una respuesta favorable en lechugas grandes y pequeñas, frente a los índices de NBI y CHL, los cuales están asociados al adecuado desarrollo y crecimiento de las plantas, así como con niveles elevados de contenido de nitrógeno [16-18]. Se encontró una relación directa entre el aumento en la concentración de FLV en las lechugas expuestas a la luz roja-infrarroja y un crecimiento desfavorable en las plantas pequeñas, lo cual se asocia a niveles reducidos de NBI y nitrógeno debido a la exposición a una iluminación de mayor intensidad [17,18]. Los niveles de antocianina también aumentaron bajo la influencia de esta luz, alcanzando valores superiores a los observados con la luz blanca y azul [19].

3.2. Caracterización vibracional FTIR

Los espectros de los extractos liofilizados de lechugas cultivadas bajo diferentes regímenes de iluminación muestran diferencias significativas en la posición e intensidad de las bandas

(Figura 1 y Tabla 1). Hallazgos diferenciales entre la iluminación con luz blanca y luz roja son: *(a)* el desplazamiento a menores números de onda de la banda a 1622 cm^{-1} (hasta 1600 cm^{-1}); *(b)* el desplazamiento a mayores números de onda de la banda a 1235-1242 cm^{-1} (hasta 1254 cm^{-1}); y *(c)* la presencia de una banda a 1351 cm^{-1} atribuida a ésteres metílicos de ácidos grasos (FAMEs). Bandas características bajo irradiación con luz azul son las de 1436 cm^{-1} y 1378 cm^{-1}, las cuales también han sido asignadas en la bibliografía a FAMEs [20].

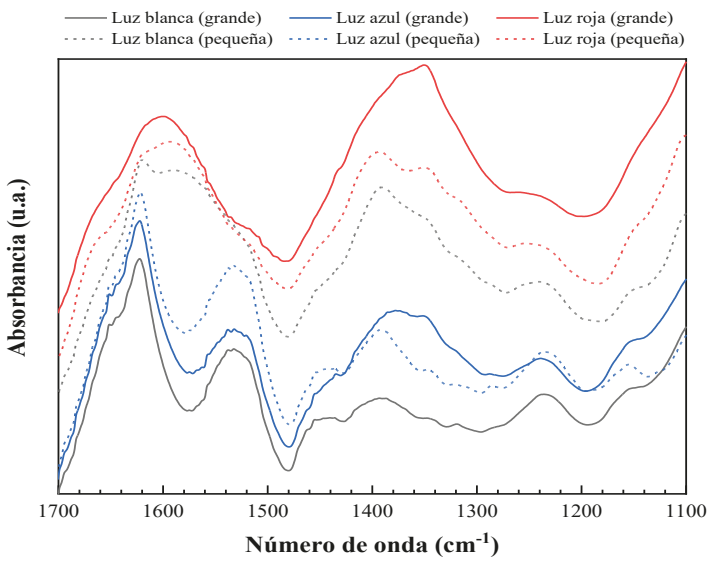


Figura 1. Detalle de los espectros infrarrojos de los extractos de lechugas liofilizados en el rango 1100-1700 cm^{-1}.

Tabla 1. Principales bandas de los espectros infrarrojos de los extractos liofilizados de lechugas sometidas a distintas condiciones de irradiación. Los números de onda están expresados en cm^{-1}.

Luz blanca		Luz azul		Luz roja		Asignación
tamaño grande	tamaño pequeño	tamaño grande	tamaño pequeño	tamaño grande	tamaño pequeño	
3275	3273	3275	3274	3273	3270	grupos OH; enlace de hidrógeno
2918	2923	2919	2023	2921	2922	tensión asimétrica -CH_2- alifáticos
2849	2850	2850	2851	2851	2852	tensión simétrica -CH_2- alifáticos
1622	1620	1622	1622	1601	1594	tensión C=C anillo benceno
1532		1532	1532			enlaces C=C aromáticos
			1436			C=C aromáticos; flexión asimétr. C-H
1393	1389		1393			tensión COO^-
		1378				O-CH_2
			1347	1351	1351	flexión simétrica C-H
1235	1242	1239	1236		1254	C-H; tensión C-O (hemicelulosa)
1057	1054	1066	1058	1058	1055	O-H; C-O (vibraciones glicosídicas)
		824		824	824	flexión C-H anillo fuera del plano
525	521	560	525	539	522	flexión grupo CO

3.3. Caracterización por GC-MS

Los cromatogramas de los extractos de lechugas han evidenciado la presencia de neofitadieno, 8-metoxi-2,4-difenilquinolina, 2-(*p*-fluorofenil)-2-oxazolina, ácido 5-hidroxiindol-3-carboxílico, y varios ésteres metílicos de ácidos grasos (FAEMs).

El fitocomponente más significativo de los extractos es el diterpeno 1,7,11,15-trimetil-3-metilidenehexadec-1-eno, más conocido como neofitadieno. Este sesquiterpenoide se encuentra en porcentajes entre el 2,7% y el 33,4%, y el máximo contenido aparece en especímenes irradiados con luz blanca o azul.

En relación con otros constituyentes, es preciso destacar, en especímenes irradiados con luz roja, la presencia de 8-metoxi-2,4-difenilquinolina (24,3%); y, común a los especímenes irradiados con luz azul o roja, 2-(*p*-fluorofenil)-2-oxazolina (2,7%-15%), ácido 5-hidroxiindol-3-carboxílico (2,5%-4,5%), y varios FAMEs. Respecto a estos últimos, los más abundantes son el éster metílico del ácido hexadecanoico (palmitato de metilo), presente, junto con su ácido precursor, en proporciones entre el 2,4% y el 8,1%, y los de los ácidos 9,12,15-octadecatrienoico o linolénico (1,8%-3,4%) y 9,12-octadecadienoico o linoleico (2%).

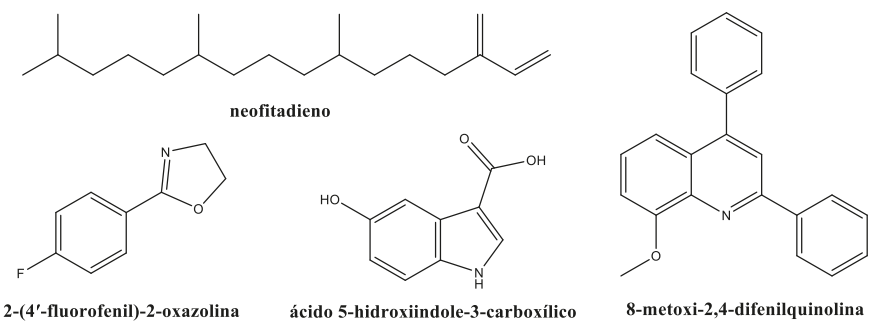


Figura 2. Estructuras de algunas de las especies químicas identificadas mediante GC-MS en los extractos de las lechugas.

4. Discusión

4.1. Sobre la caracterización de clorofila y polifenoles

La exposición a la radiación de luz azul y blanca promovió un desarrollo favorable en las lechugas grandes y pequeñas, evidenciado por los altos índices de NBI y CHL. En contraste, la luz roja-infrarroja resultó en un crecimiento desfavorable en las lechugas pequeñas, con niveles reducidos de NBI y CHL, pero con altos niveles de ANTH y FLAV.

4.2. Sobre la caracterización por espectroscopía vibracional

Los espectros ATR-FTIR son concluyentes en evidenciar, a través de la presencia de los modos de vibración característicos de los FAMEs, la presencia de ácidos grasos saturados e insaturados tanto en especímenes irradiados con luz roja como con luz azul.

4.3. Sobre el perfil de fitoquímicos por GC-MS

El principal fitoquímico de los cromatogramas, neofitadieno, ha sido descrito como metabolito de algunas algas, como *Turbinaria ornata* [21], y caracterizado en extractos de *Phaseolus vulgaris* [22], *Thymus vulgaris* [23], *Crataeva nurvala* [24] y *Blumea lacera* [25]. El neofitadieno tiene un efecto protector contra el estrés oxidativo, principalmente basado en su capacidad para mantener el potencial de la membrana mitocondrial y reducir la producción de especies reactivas de oxígeno. Muestra propiedades analgésicas, antipiréticas y antiinflamatorias [26-28]. Asimismo, en estudios *in vitro*, el neofitadieno ha demostrado actividad antimicrobiana contra bacterias Gram positivas (*Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*) y Gram negativas (*Escherichia coli*, *Pseudomonas. aeruginosa*), y hongos (*Candida albicans*, *Mucor circinelloides*) [27,29,30].

El ácido hexadecanoico es un ácido graso saturado de cadena larga con presencia en plantas como *Armeria maritima* [31], *Equisetum arvense* [32], *Limonium binervosum* [33], *Hibiscus syriacus*

[34], y *Kigelia africana* [35], así como en algas como *T. ornata* [36] y *Amphiroa zonata* [37]. Los ácidos grados poliinsaturados 9,12-octadecatrienoico y 9,12,15-octadecatrienoico se han identificado en extractos de *H. syriacus* [34], *L. binervosum* [33], *L. gmelinii* y *L. popovii* [38]. El ácido hexadecanoico y sus ésteres se consideran antifúngicos y antioxidantes [39]. Lo mismo ocurre con los ácidos grasos poliinsaturados como el linoleico [40,41]. Sin embargo, cabe señalar que la detección de ácidos grasos en forma de FAMEs podría ser debida al uso de metanol como disolvente para los análisis GC-MS [42].

La identificación como fitoquímicos de 8-metoxi-2,4-difenilquinolina y 2-(*p*-fluorofenil)-2-oxazolina no ha podido ser establecida, pero sí la del ácido 5-hidroxiindol-3-carboxílico, un producto natural hallado, por ejemplo, en *Tetrastigma hemsleyanum* [43]. Derivados del ácido 5-hidroxi-1H-indol-3-carboxílico poseen propiedades antivirales, en relación con la diarrea vírica bovina, la hepatitis C y la gripe A [44].

El perfil fitoquímico de los extractos de *L. sativa*, rico en neofitadieno y ácidos palmítico, linoleico y linolénico, ha resultado ser muy afín al de los extractos del alga *Ulva lactuca* (cuyos dos principales componentes del extracto metanólico, en términos de áreas de pico en GC-MS, fueron neofitadieno y ácido linoleico). Dado que neofitadieno es capaz de enlazar con ácidos grasos y carotenoides, la presencia conjunta de neofitadieno y ácidos grasos en los extractos de *L. sativa* tiene connotaciones positivas en cuanto a efectos cardioprotectores se refiere.

5. Conclusiones

Resultados del análisis infrarrojo de los extractos de hojas de *L. sativa* aseguran la presencia significativa de ésteres de ácidos grasos en los especímenes irradiados con luz roja y azul, pero no en los irradiados con luz blanca. Otro es el caso para el sesquiterpenoide neofitadieno, cuya presencia en los extractos de lechuga *Great Lakes 118* es mayor en especímenes irradiados con luz blanca o azul que en especímenes sometidos a luz roja. La presencia concurrente de los ácidos grasos referidos y neofitadieno, también observada en el alga *U. lactuca*, es sugestiva de aplicación en procesos de estrés oxidativo e inflamatorio.

6. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Unión Europea a través del Programa Horizonte Europa (HORIZON-CL6-2022-FARM2FORK-01), con el proyecto "Agro-ecological strategies for resilient farming in West Africa (CIRAWA)", ID 101084398. L.F.L.-C. ha sido financiada dentro de la convocatoria de contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciada por el Fondo Social Europeo y la Consejería de Educación Junta de Castilla y León (España).

Referencias

1. Celina, G.; Luigi Gennaro, I. Increasing efficiency of crop production with LEDs. *AIMS Agriculture and Food* 2018, *3*, 135-153, doi:10.3934/agrfood.2018.2.135.
2. van Iersel, M.W. Optimizing LED lighting in controlled environment agriculture. In *Light emitting diodes for agriculture: Smart lighting*, Dutta Gupta, S., Ed. Springer: Singapore, 2017; 10.1007/978-981-10-5807-3_4pp. 59-80.
3. Liu, X.; Xu, Y.; Wang, Y.; Yang, Q.; Li, Q. Rerouting artificial light for efficient crops production: A review of lighting strategy in PFALs. *Agronomy* 2022, *12*, 1021-1030, doi:10.3390/agronomy12051021.
4. Trivellini, A.; Toscano, S.; Romano, D.; Ferrante, A. LED lighting to produce high-quality ornamental plants. *Plants* 2023, *12*, 1667-1685, doi:10.3390/plants12081667.
5. Cavallaro, V.; Muleo, R. The effects of LED light spectra and intensities on plant growth. *Plants* 2022, *11*, 1911, doi:10.3390/plants11151911.
6. Ptushenko, O.S.; Ptushenko, V.V.; Solovchenko, A.E. Spectrum of light as a determinant of plant functioning: A historical perspective. *Life* 2020, *10*, 25-43, doi:10.3390/life10030025.
7. Ju, J.-H.; Yoon, Y.-H.; Shin, S.-H.; Ju, S.-Y.; Yeum, K.-J. Recent trends in urban agriculture to improve bioactive content of plant foods. *Horticulturae* 2022, *8*, 767-781, doi:10.3390/horticulturae8090767.

8. Al Murad, M.; Razi, K.; Jeong, B.R.; Samy, P.M.A.; Muneer, S. Light emitting diodes (LEDs) as agricultural lighting: Impact and its potential on improving physiology, flowering, and secondary metabolites of crops. *Sustainability* 2021, *13*, 1985-2010, doi:10.3390/su13041985.
9. Liu, J.; van Iersel, M.W. Far-red light effects on lettuce growth and morphology in indoor production are cultivar specific. *Plants* 2022, *11*, 2714-2735, doi:10.3390/plants11202714.
10. Legendre, R.; van Iersel, M.W. Supplemental far-red light stimulates lettuce growth: Disentangling morphological and physiological effects. *Plants* 2021, *10*, 166-187, doi:10.3390/plants10010166.
11. Trivellini, A.; Toscano, S.; Romano, D.; Ferrante, A. The role of blue and red light in the orchestration of secondary metabolites, nutrient transport and plant quality. *Plants* 2023, *12*, 2026-2043, doi:10.3390/plants12102026.
12. Ouzounis, T.; Razi Parjikolaei, B.; Fretté, X.; Rosenqvist, E.; Ottosen, C.-O. Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in *Lactuca sativa*. *Frontiers in Plant Science* 2015, *6*, 19, doi:10.3389/fpls.2015.00019.
13. Landi, M.; Zivcak, M.; Sytar, O.; Brestic, M.; Allakhverdiev, S.I. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* 2020, *1861*, 148131, doi:10.1016/j.bbabio.2019.148131.
14. Samuolienė, G.; Viršilė, A.; Brazaitytė, A.; Jankauskienė, J.; Duchovskis, P.; Novičkovas, A.; Bliznikas, Z.; Zukauskas, A. Effect of supplementary pre-harvest LED lighting on the antioxidant and nutritional properties of green vegetables. In Proceedings of XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 939, Lisbon, Portugal; pp. 85-91.doi:10.17660/ActaHortic.2012.939.10.
15. Bian, Z.H.; Yang, Q.C.; Liu, W.K. Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: A review. *J. Sci. Food Agric.* 2015, *95*, 869-877, doi:10.1002/jsfa.6789.
16. Matysiak, B.; Kaniszewski, S.; Mieszczakowska-Fr ¸ac, M. Growth and Quality of Leaf and Romaine Lettuce Grown on a Vertical Farm in an Aquaponics System: Results of Farm Research. Agriculture 2023, 13, 897. https://doi.org/10.3390/ agriculture13040897
17. Viršilė, A., Brazaitytė, A., Vaštakaitė-Kairienė, V., Miliauskienė, J., Jankauskienė, J., Novičkovas, A. and Samuolienė, G. Lighting intensity and photoperiod serves tailoring nitrate assimilation indices in red and green baby leaf lettuce. *J. Sci. Food Agric.*, 2019, 99: 6608-6619. https://doi.org/10.1002/jsfa.9948
18. Matysiak, B.; Kaniszewski, S.; Dy´sko, J.; Kowalczyk, W.; Kowalski, A.; Grzegorzewska, M. The Impact of LED Light Spectrum on the Growth, Morphological Traits, and Nutritional Status of 'Elizium' Romaine Lettuce Grown in an Indoor Controlled Environment. *Agriculture* 2021, 11, 1133. https://doi.org/ 10.3390/agriculture11111133
19. Ruangrak, Eaknarin & Khummueng, Weeraya. Effects of artificial light sources on accumulation of phytochemical contents in hydroponic lettuce. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2018, 94. 1-11. 10.1080/14620316.2018.1504630.
20. Yuan, T.; Akochi-Koble, E.; Pinchuk, D.; de Voort, F. FTIR on-line monitoring of biodiesel transesterification. *International Journal of Renewable Energy and Biofuels* 2014, 10.5171/2014.178474, 1-13, doi:10.5171/2014.178474.
21. Bhardwaj, M.; Sali, V.K.; Mani, S.; Vasanthi, H.R. Neophytadiene from *Turbinaria ornata* suppresses LPS-induced inflammatory response in RAW 264.7 macrophages and Sprague Dawley rats. *Inflammation* 2020, *43*, 937-950, doi:10.1007/s10753-020-01179-z.
22. Adewole, E.; Ogola-Emma, E.; Ojo, A.; Adegbite, S. GC-MS compound identification in *Phaseolus vulgaris* - A low-cost cataract prevention food. *Food Science and Technology* 2022, *10*, 112-119, doi:10.13189/fst.2022.100304
23. Saleem, A.; Afzal, M.; Naveed, M.; Makhdoom, S.I.; Mazhar, M.; Aziz, T.; Khan, A.A.; Kamal, Z.; Shahzad, M.; Alharbi, M.; Alshammari, A. HPLC, FTIR and GC-MS analyses of *Thymus vulgaris* phytochemicals executing *in vitro* and *in vivo* biological activities and effects on COX-1, COX-2 and gastric cancer genes computationally. *Molecules* 2022, *27*, 8512, doi:10.3390/molecules27238512.
24. Moniruzzaman, M.; Mannan, M.A.; Hossen Khan, M.F.; Abir, A.B.; Afroze, M. The leaves of *Crataeva nurvala* Buch-Ham. modulate locomotor and anxiety behaviors possibly through GABAergic system. *BMC Complementary and Alternative Medicine* 2018, *18*, 283, doi:10.1186/s12906-018-2338-y.
25. Hossen, M.A.; Ali Reza, A.S.M.; Amin, M.B.; Nasrin, M.S.; Khan, T.A.; Rajib, M.H.R.; Tareq, A.M.; Haque, M.A.; Rahman, M.A.; Haque, M.A. Bioactive metabolites of *Blumea lacera* attenuate anxiety and depression in rodents and computer-aided model. *Food Science & Nutrition* 2021, *9*, 3836-3851, doi:10.1002/fsn3.2362.
26. Chandan, G.; Kumar, C.; Verma, M.K.; Satti, N.K.; Saini, A.K.; Saini, R.V. *Datura stramonium* essential oil composition and its immunostimulatory potential against colon cancer cells. *3 Biotech* 2020, *10*, 451, doi:10.1007/s13205-020-02438-4.

27. Ngobeni, B.; Mashele, S.S.; Malebo, N.J.; van der Watt, E.; Manduna, I.T. Disruption of microbial cell morphology by *Buxus macowanii*. *BMC Complement Altern. Med.* 2020, *20*, 266, doi:10.1186/s12906-020-03049-5.
28. Sajid, M.; Khan, M.R.; Ijaz, M.U.; Ismail, H.; Bhatti, M.Z.; Shah, S.A.; Ali, S.; Tareen, M.U.; Alotaibi, S.S.; Albogami, S.M.; Batiha, G.E.-S. Evaluation of phytochemistry and pharmacological properties of *Alnus nitida*. *Molecules* 2022, *27*, 4582, doi:10.3390/molecules27144582.
29. Al-Rajhi, A.M.H.; Qanash, H.; Almuhayawi, M.S.; Al Jaouni, S.K.; Bakri, M.M.; Ganash, M.; Salama, H.M.; Selim, S.; Abdelghany, T.M. Molecular interaction studies and phytochemical characterization of *Mentha pulegium* L. constituents with multiple biological utilities as antioxidant, antimicrobial, anticancer and anti-hemolytic agents. *Molecules* 2022, *27*, 4824, doi:10.3390/molecules27154824.
30. Raman, B.V.; Samuel, L.; Saradhi, M.P.; Rao, B.N.; Krishna, N.; Sudhakar, M.; Radhakrishnan, T. Antibacterial, antioxidant activity and GC-MS analysis of *Eupatorium odoratum*. *Asian J Pharm Clin Res* 2012, *5*, 99-106.
31. Sánchez-Hernández, E.; Martín-Ramos, P.; Navas Gracia, L.M.; Martín-Gil, J.; Garcés-Claver, A.; Flores-León, A.; González-García, V. *Armeria maritima* (Mill.) Willd. flower hydromethanolic extract for cucurbitaceae fungal diseases control. *Molecules* 2023, *28*, 3730, doi:10.3390/molecules28093730.
32. Langa-Lomba, N.; Buzón-Durán, L.; Martín-Ramos, P.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Sánchez-Hernández, E.; González-García, V. Assessment of conjugate complexes of chitosan and *Urtica dioica* or *Equisetum arvense* extracts for the control of grapevine trunk pathogens. *Agronomy* 2021, *11*, doi:10.3390/agronomy11050976.
33. Sánchez-Hernández, E.; Buzón-Durán, L.; Langa-Lomba, N.; Casanova-Gascón, J.; Lorenzo-Vidal, B.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Characterization and antimicrobial activity of a halophyte from the Asturian coast (Spain): *Limonium binervosum* (G.E.Sm.) C.E.Salmon. *Plants* 2021, *10*, 1852, doi:10.3390/plants10091852.
34. Sánchez-Hernández, E.; Buzón-Durán, L.; Lorenzo-Vidal, B.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Physicochemical characterization and antimicrobial activity against *Erwinia amylovora, Erwinia vitivora*, and *Diplodia seriata* of a light purple *Hibiscus syriacus* L. cultivar. *Plants* 2021, *10*, 1876, doi:10.3390/plants10091876.
35. Ravi, L.; Krishnan, K. Research article cytotoxic potential of N-hexadecanoic acid extracted from *Kigelia pinnata* leaves. *Asian J. Cell Biol* 2017, *12*, 20-27, doi:10.3923/ajcb.2017.20.27.
36. Lalhruaizela, L.; Marak, B.N.; Gogoi, D.; Dowarah, J.; Sran, B.S.; Pachuau, Z.; Singh, V.P. Study of supramolecular self-assembly of pyridone and dihydropyridone co-crystal: Synthesis, crystal structure, Hirshfeld surface, DFT and molecular docking studies. *J. Mol. Struct.* 2021, *1235*, 130214, doi:10.1016/j.molstruc.2021.130214.
37. Harada, H.; Yamashita, U.; Kurihara, H.; Fukushi, E.; Kawabata, J.; Kamei, Y. Antitumor activity of palmitic acid found as a selective cytotoxic substance in a marine red alga. *Anticancer Res.* 2002, *22*, 2587-2590.
38. Korul'kina, L.M.; Zhusupova, G.E.; Shul'ts, E.E.; Erzhanov, K.B. Fatty-acid composition of two *Limonium* plant species. *Chem. Nat. Compd.* 2004, *40*, 417-419, doi:10.1007/s10600-005-0002-5.
39. Pinto, M.E.A.; Araújo, S.G.; Morais, M.I.; Sá, N.P.; Lima, C.M.; Rosa, C.A.; Siqueira, E.P.; Johann, S.; Lima, L.A.R.S. Antifungal and antioxidant activity of fatty acid methyl esters from vegetable oils. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 2017, *89*, 1671-1681, doi:10.1590/0001-3765201720160908.
40. Liu, S.; Ruan, W.; Li, J.; Xu, H.; Wang, J.; Gao, Y.; Wang, J. Biological control of phytopathogenic fungi by fatty acids. *Mycopathologia* 2008, *166*, 93-102, doi:10.1007/s11046-008-9124-1.
41. Zheng, C.J.; Yoo, J.-S.; Lee, T.-G.; Cho, H.-Y.; Kim, Y.-H.; Kim, W.-G. Fatty acid synthesis is a target for antibacterial activity of unsaturated fatty acids. *FEBS Lett.* 2005, *579*, 5157-5162, doi:10.1016/j.febslet.2005.08.028.
42. Venditti, A. What is and what should never be: artifacts, improbable phytochemicals, contaminants and natural products. *Natural Product Research* 2018, *34*, 1014-1031, doi:10.1080/14786419.2018.1543674.
43. Ji, T.; Ji, W.W.; Wang, J.; Chen, H.J.; Peng, X.; Cheng, K.J.; Qiu, D.; Yang, W.J. A comprehensive review on traditional uses, chemical compositions, pharmacology properties and toxicology of *Tetrastigma hemsleyanum*. *J. Ethnopharmacol.* 2021, *264*, 113247, doi:10.1016/j.jep.2020.113247.
44. Ivachtchenko, A.V.; Yamanushkin, P.M.; Mitkin, O.D.; Kisil, V.M.; Korzinov, O.M.; Vedenskii, V.Y.; Leneva, I.A.; Bulanova, E.A.; Bichko, V.V.; Okun', I.M.; Ivashchenko, A.A.; Ivanenkov, Y.A. Synthesis and antiviral activity of substituted ethyl-2-aminomethyl-5-hydroxy-1H-indole-3-carboxylic acids and their derivatives. *Pharm. Chem. J.* 2015, *49*, 151-162, doi:10.1007/s11094-015-1244-6.

Diseño y aplicación de un sistema inteligente de pulverización variable para tratamientos fitosanitarios en viña y olivo – PIVOS y ADOPTA

E. Gil[1], R. Salcedo[1], F. García-Ruiz[1], J. Biscamps[1], L. Xun[1], F. J. García-Ramos[2], M. Vidal[2], A. Vigo[2], G.L Blanco-Roldán[3], A. Rodríguez-Lizana[4], J. M. Mariscal[3], F. Rovira-Más[5], A. Cuenca[5], V. Saiz-Rubio[5], C. Ortiz[5], E. Ortí[5], M. Pérez[5], A. Torregrosa[5].

[1] Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España); emilio.gil@upc.edu
[2] Universidad de Zaragoza (Huesca, España); fjavier@unizar.es
[3] Universidad de Córdoba (Córdoba, España); ir3blrog@uco.es
[4] Universidad de Sevilla (Sevilla, España); arodriguez2@us.es
[5] Universitat Politècnica de València (València, España); frovira@dmta.upv.es

Abstract: Off-target losses to air and soil are frequently encountered during traditional olive and vineyard pesticide applications with conventional-rate airblast sprayers. Adjustment of the air assist system, use of prescription maps, and flow rate regulation using Pulse Width Modulation (PWM) solenoid valves enable for more precise treatments of crop protection products to surrounding conditions and less environmental potential hazards. The PIVOS national research project aims to demonstrate the benefits of the intelligent application of pesticides in the cultivation of vines and olive trees, reducing their impact on the environment and economic costs. This proposal is developing a novel system of variable-rate application based on the characteristics of the canopy structure and its intra-plot variation. A first version of the spray system proved to be capable of reading the prescription maps generated by remote sensing techniques and validated in the field. In each position of the plot, the prototype was at the corresponding flow rate to the vigor zone in which it was located the sprayer in that moment, with savings in the spray volume. However, future works are still necessary, such as the economical evaluation of saving and the biological efficiency within the new ADOPTA project.

Key words: Variable Rate Application, Pulse Width Modulation, vineyard, olive trees, canopy map, drones, satellites

1. Introducción

El uso correcto y sostenible de los productos fitosanitarios sigue siendo uno de los principales retos de la agricultura. Este aspecto es muy relevante en el caso de España, segundo país de Europa en superficie agraria y uno de los principales consumidores mundiales de estos productos [1]. Además, la mayor preocupación social en este tema, junto al empuje agroambiental de las políticas europeas, como el Pacto Verde Europeo [2] a través de través de la Estrategia "De la Granja a la Mesa" [3], obliga a acelerar la búsqueda de nuevas metodologías de aplicación. En este caso hay que buscar alternativas más contundentes, ya que la Unión Europea se ha fijado el objetivo de reducir el uso de productos fitosanitarios al 50% para el año 2030. Esto tiene especial relevancia en olivo y viñedo, dos de los cultivos de mayor impacto socioeconómico en nuestro país. Para conseguir esta meta, es necesario conocer los principales factores que influyen en la eficiencia de los tratamientos en estos cultivos: el viento [4], propiedades físico-químicas del caldo [5], parámetros ligados a la maquinaria [6] y las características de la vegetación [7].

La capacidad de penetración y recubrimiento de las gotas que salen de las boquillas a la copa dependerán de la forma, tamaño y densidad del árbol. Cuanto más grande sea la copa y/o más espesa sea la masa foliar, mayor son las posibilidades de retención de gotas, aunque por otro lado

las partículas pulverizadas tienen más dificultades para penetrar dentro de la vegetación. Por esa razón, muchos agricultores suelen seleccionar pulverizadores hidráulicos de chorro transportado (atomizadores) provistos de un sistema de aire que empuje y dirija las gotas hacia la copa y remueva ramas y hojas para facilitar su penetración, creando turbulencias que ayuden a homogeneizar la distribución de las partículas. Sin embargo, muchas veces se opta por trabajar con altos caudales de aire o escoger pulverizadores con ventiladores de grandes proporciones para garantizar la penetración total del producto entre las hojas. Paralelamente, estos pulverizadores trabajan con un volumen de aplicación constante que, en la mayoría de los casos, está basado en la propia experiencia del técnico o agricultor más que en las propuestas de adaptación de acuerdo a las dimensiones de la vegetación, tal y como recomiendan la Buenas Prácticas Agrícolas [8]. Por tanto, considerando la alta variabilidad existente entre árboles dentro de una misma plantación [9], el volumen de aplicación constante seleccionado y el inadecuado ajuste del aire, no se puede conseguir un tratamiento correcto, para los olivos y viñedos, en diferentes momentos de la campaña, provocándose aplicaciones excesivas y una cobertura desigual sobre las hojas [10]. Todo esto se puede agravar sin un correcto uso del equipo de ventilación [11] o haciendo aplicaciones en zonas sin presencia de vegetación de la copa, lo que resulta en pérdidas de producto innecesarias.

Para paliar los problemas anteriores, se recurre a las aplicaciones de volumen variable (VRT), en las que la máquina es equipada con un sistema inteligente para reconocer las características de la vegetación, y así poder aplicar un caudal acorde, aumentándose la eficiencia de los tratamientos sin mermas en la eficacia biológica [12]. Estos sistemas parten de la identificación previa de las características geométricas de la copa a la que se dirigen las gotas en una dosis adecuada; el perfil de líquido se ajusta más a la forma y densidad de la estructura arbórea, evitando utilizar más producto del necesario y disminuyendo las pérdidas fuera de objetivo.

La tecnología VRT puede realizarse en base a sensores o en base a mapas de prescripción. En el primer caso, se utilizan los conocidos sensores de detección de la presencia de vegetación arbórea, de tipo sensores de ultrasonidos [13] o dispositivos láser [14]. En el segundo caso, se parte de la obtención de imágenes con sensores de control remoto, tales como cámaras embarcadas en drones o los propios satélites. Esta metodología ha demostrado ser fiable, precisa y asequible [15], permitiendo cartografiar grandes extensiones con alta resolución espacial, usándose, posteriormente, para elaborar los mapas. Finalmente, el atomizador se equipa con un ordenador de "a bordo", que incorpora la información de los mapas, permitiendo el control automatizado del caudal [16-19].

Respecto al sistema de control de flujo, para que las boquillas produzcan caudales variables, se tiene el inconveniente de que la modificación basada en los cambios de presión requiere un tiempo de adaptación del régimen hidráulico y, además, puede variarse el tamaño de gota. Alternativamente, existen válvulas de modulación de ancho de pulso (PWM) que permiten un control más rápido del flujo intermitente en las boquillas mientras se mantiene la presión de trabajo correspondiente [20-23].

El proyecto PIVOS (PID2019-104289RB) es un proyecto nacional, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, que ha diseñado un sistema de pulverización inteligente, con toma de decisiones en base a la lectura de mapas y regulación de caudal con válvulas PWM (www.pivos.upc.edu). Este sistema se ha implementado en dos atomizadores comerciales orientados a la realización de tratamientos fitosanitarios en olivar y viña. La presente comunicación resume el trabajo realizado hasta la fecha, así como las perspectivas de un nuevo proyecto, ADOPTA (PDC2022-133395), derivado del anterior y dirigido a la prueba de concepto de los equipos desarrollados En este proyecto, que también cuenta con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación, se evaluarán los beneficios y la capacidad de aplicación de estos nuevos prototipos en colaboración con agricultores y en condiciones reales de funcionamiento.

2. Grupos de investigación integrantes

Tanto el proyecto PIVOS (Pulverización inteligente para un viñedo y olivar sostenibles (PIVOS), de la convocatoria 2019 de Proyectos de I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación, como el proyecto ADOPTA (Adopción de nuevas tecnologías para la reducción de fitosanitarios - Drones y satélites para aplicación variable en plantaciones de viñedo y olivo), de la convocatoria 2022 de Prueba de Concepto del mismo Ministerio, están liderados por el Grupo de Investigación de la Unidad de Mecanización Agraria (https://uma.deab.upc.edu/es) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Este grupo coordina las actividades propias y la de otros tres grupos miembros de ambos proyectos: el Laboratorio de Maquinaria Agrícola de la Universidad de Zaragoza (http://lamagri.unizar.es/), el Laboratorio de Robótica Agrícola de la Universidad Politécnica de Valencia (https://www.agriculturalroboticslab.upv.es/) y el Grupo AGR 126 "Mecanización y Tecnología Rural" de la Universidad de Córdoba (http://www.uco.es/).

El coordinador del proyecto tiene una gran experiencia en los aspectos relacionados con la aplicación por pulverización en viñedos: ensayos de campo, procedimientos de evaluación de deposición y deriva, y desarrollos electrónicos relacionados con el principio de aplicación de caudal variable. El subproyecto de la Universidad de Córdoba (UCO), liderado por dos investigadores, de la UCO y la Universidad de Sevilla (US), respectivamente, es el grupo de investigación de referencia en todos los aspectos relacionados con la producción olivarera. Este grupo ha llevado a cabo importantes proyectos de investigación y formación, como los de Compra Pública Precomercial (CPP) MECAOLIVAR e INNOLIVAR, con especial énfasis en su influencia y buena colaboración con los actores profesionales pertenecientes a la industria del aceite de oliva. La Universidad Politécnica de València (UPV) aporta su experiencia en el campo de las tecnologías digitales como la agricultura de precisión y la robótica agrícola aplicada a cultivos arbóreos. Finalmente, la Universidad de Zaragoza (UNIZAR) ha realizado muchas investigaciones en el campo de la asistencia de aire en atomizadores.

Dentro del proyecto PIVOS, la UPC, además de la coordinación, también es responsable del desarrollo de un protocolo estándar para construir mapas de prescripción de aplicación de volumen y de la cuantificación de los beneficios ambientales y económicos potenciales. La UCO supervisa el establecimiento del procedimiento más adecuado para la caracterización inteligente de la copa en vid y olivar, así como la validación en campo de los equipos. Por su parte, UNIZAR se encarga del desarrollo de un método estándar para elaborar mapas de prescripción de necesidades de asistencia de aire. Por último, la UPV se ocupa del diseño y funcionamiento del sistema de actuación inteligente acoplados en pulverizadores convencionales según mapas de prescripción. Todo esto evoluciona con el proyecto ADOPTA, donde se llevan tareas de planificación de campaña (UCO), generación y aplicación de mapas (UPV), implementación de tecnologías de caudal variable entre los agricultores (UPC) y jornadas y actividades de divulgación y formación (UNIZAR).

3. Elementos del prototipo

3.1 Pulverizadores hidroneumáticos

El prototipo consiste en un sistema inteligente de pulverización que puede instalarse en un equipo atomizador con asistencia de aire ya existente (Figura 1). Para los tratamientos en olivar, el sistema se ha instalado sobre un atomizador arrastrado Mañez Lozano modelo Twister S6 (Mañez y Lozano SL, Valencia, España). La máquina incluye un depósito con un volumen de 1500 L y un ventilador axial, con disposición en torre, como método de asistencia de aire. Hay 8 portaboquillas, con 3 boquillas cada uno, a cada lado de la máquina, estando los dos últimos ubicados sobre su propio deflector para así reducir el riesgo de deriva aérea. Los restantes portaboquillas se sitúan en la zona central de la salida de aire, constituida por rejillas giratorias

para forzar a la corriente a crear una turbulencia alrededor de la boquilla y ayudar a homogeneizar la nube de gotas.



Figura 1. Pulverizadores con el sistema inteligente de control de pulverización ~~ajustado~~: ~~para~~ equipo con torre para olivo (izquierda) y equipo multifila para viñedo (derecha).

Para las aplicaciones de producto en viñedo, se ha escogido un atomizador arrastrado multifila Hardi modelo Zaturn (ILEMO-HARDI, Lleida, España). Este equipo presenta un depósito de 1300 L y una turbina centrífuga para la generación de aire. El pulverizador incluye una barra metálica horizontal que está colocada en la zona de atrás del pulverizador. Ello permite la posibilidad de elevar y ajustar, mediante pistones, la altura y separación de seis bajantes verticales para la aplicación posterior de producto a ambos lados de la viña. Este pulverizador puede tratar hasta tres hileras de viñedo al mismo tiempo. Cada bajante está dotado de 6 portaboquillas. Cada boquilla se ubica junto a una salida individual de aire con abertura regulable.

3.2 Unidad de control y sensores de seguimiento

El sistema de interpretación de mapas y regulación de caudales está formado por un ordenador (Figura 2), una fuente de alimentación, un dispositivo auxiliar de disipación y salidas eléctricas para conectarse por cable con cada una de las secciones de cada máquina y, de esta manera, controlar el funcionamiento de las válvulas PWM. Además, el ordenador también está dotado con conexiones a sensores de medición. La presión y el caudal están continuamente monitorizados mediante transductores de presión y caudalímetros electrónicos. El sistema incorpora un receptor GPS en base al cual se identifica el punto de la parcela en el que está situado el atomizador y el caudal correspondiente a ese punto indicado en el mapa.

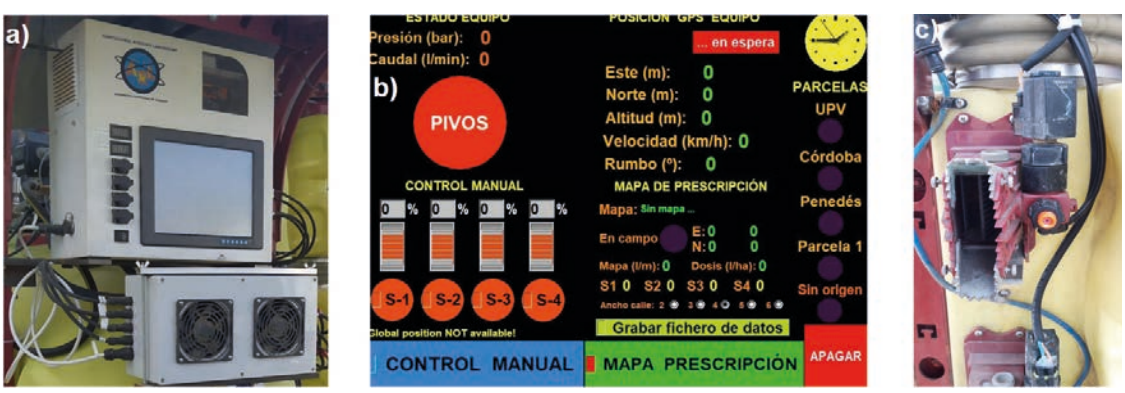


Figura 2. Elementos del sistema de pulverización: ordenador con disipador auxiliar y conexiones (a); interfaz del usuario; y boquilla regulada con válvula PWM (c).

Para las operaciones de campo, el ordenador cuenta con una interfaz táctil, que ofrece la posibilidad de hacer regulaciones con el equipo en posición estática o dinámica. Para las tareas de campo, el ordenador da la posibilidad de ajustar el ancho de calle y seleccionar previamente la parcela a tratar. También expone los datos de presión de trabajo, el caudal y las coordenadas geodésicas de la máquina durante el tratamiento.

3.4 Válvulas PWM

Para la regulación del caudal de las boquillas se seleccionaron válvulas solenoides electromecánicas Teejet (Spraying Systems Co., Wheaton, Estados Unidos) (Figura 2). Cada válvula PWM tiene una tuerca, un cuerpo eléctrico y conjunto de tubo con émbolo y un resorte en el interior. Una bobina es estimulada por una carga eléctrica para abrir la válvula, mientras que un resorte la cierra al retirar la carga. La frecuencia de trabajo seleccionada es de 10 Hz, que es una frecuencia habitual en atomizadores [24]. El ordenador fija las pulsaciones de las válvulas ligadas a un ciclo de trabajo específico, que vade de 0 a 100 ms. Cuando el ciclo de trabajo es del 100%, la válvula está completamente abierta, es decir, permanece abierta durante los 100 ms que dura cada intervalo. En ese tiempo, el muelle se retrotrae para permitir el paso continuo de flujo a la boquilla. Por el contrario, un ciclo de trabajo al 0% implica que la válvula está totalmente cerrada en todo ese tiempo.

4. Método de funcionamiento

Los prototipos desarrollados consisten en la transformación de sendos pulverizadores comerciales, de aplicación de caudal constante, en nuevas tecnologías de caudal variable (VRT). Ello supone convertir las máquinas que aplican un volumen idéntico durante todo el tratamiento en nuevos modelos en los que el volumen es regulado en tiempo real en función de las propiedades (volumen) de las copas de los árboles. La Figura 3 resume todos los pasos a seguir por el prototipo en el proyecto original PIVOS.

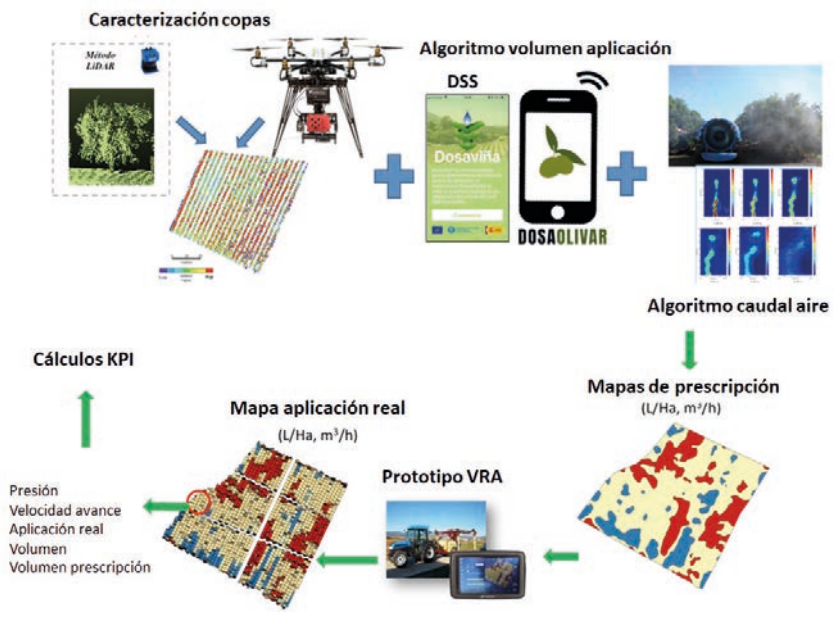


Figura 3. Esquema de trabajo del proyecto PIVOS.

Estos nuevos equipos se fundamentan en los resultados recopilados a partir de las imágenes aéreas del cultivo objetivo extraídas con un dron equipado con sensórica. Antes de iniciar los trabajos con los pulverizadores, un dron sobrevuela la zona a tratar tomando datos mediante una cámara multiespectral. Las imágenes se analizan para obtener el índice de vigor NDVI. Después de esto, se filtran los pixeles que corresponden a los olivos o a los viñedos. De esta forma, se eliminan aquellos pixeles que solo pudieran aportar distorsiones (sombras, suelo, etc.) en los posteriores cálculos. A continuación, la imagen de la parcela se interpola, y luego se descartan los pixeles aislados hasta homogeneizar las zonas y formar un nuevo mapa de vigor de vegetación (Figura 4). Para cada zona de vigor se toman una serie de mediciones manuales en términos de diámetro y altura de copa y se hace una estimación de la densidad foliar. Con toda esta información, se determina el volumen de aplicación correspondiente para cada zona de vigor, mediante el uso de herramientas de apoyo a la optimización de volúmenes: Dosaolivar [25] y Dosaviña [26]. Posteriormente, de estos mapas se extraen matrices de puntos, en las cuales cada punto corresponde a una posición exacta del mapa. Cada punto muestra valores específicos de longitud, latitud, cota sobre el nivel del mar y caudal demandado por la vegetación. Este último parámetro es obtenido por el volumen de trabajo en esa zona de vigor, la distancia entre filas y la velocidad de trabajo a la que desee ir el operario.

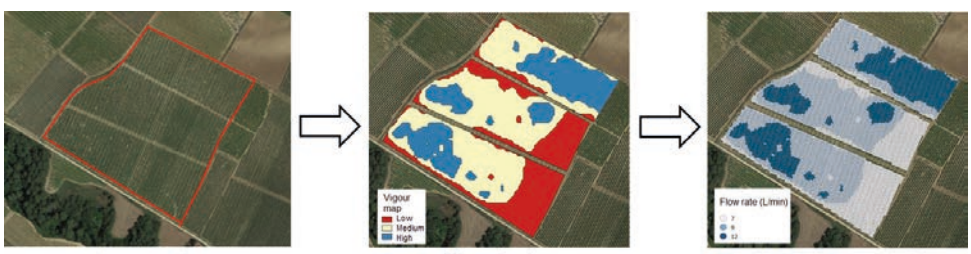


Figura 4. Proceso de transformación de la ortofoto al mapa final de prescripción de la parcela.

Alternativamente, se ha procedido al muestreo de volúmenes de copa de las plantaciones mediante métodos manuales y LiDAR, así como a la determinación directa de los volúmenes del dosel del cultivo y de sus superficies proyectadas tras un vuelo de UAV equipado con cámara RGB para realizar los correspondientes mapeados. En aquellos casos en los que no se dispone de todos los volúmenes por ser obtenidos mediante muestreo espacial, se han utilizado algoritmos de (co)simulación secuencial estocástica [27], mapas probabilísticos de incertidumbre y posteriores algoritmos de clasificación para zonificar la parcela en clases que corresponden a diferentes dosis de aplicación

El último paso consiste en traspasar el mapa de puntos, con sus caudales por cada punto, al ordenador del atomizador. Cuando éste se localiza en la parcela donde se realizará el tratamiento, el receptor GNSS identifica esta circunstancia y el sistema queda preparado para entender los puntos y asignar el caudal correspondiente, actuando sobre las boquillas controladas por las válvulas PWM. Cuando el atomizador se sale de la parcela marcada, las válvulas se cierran inmediatamente.

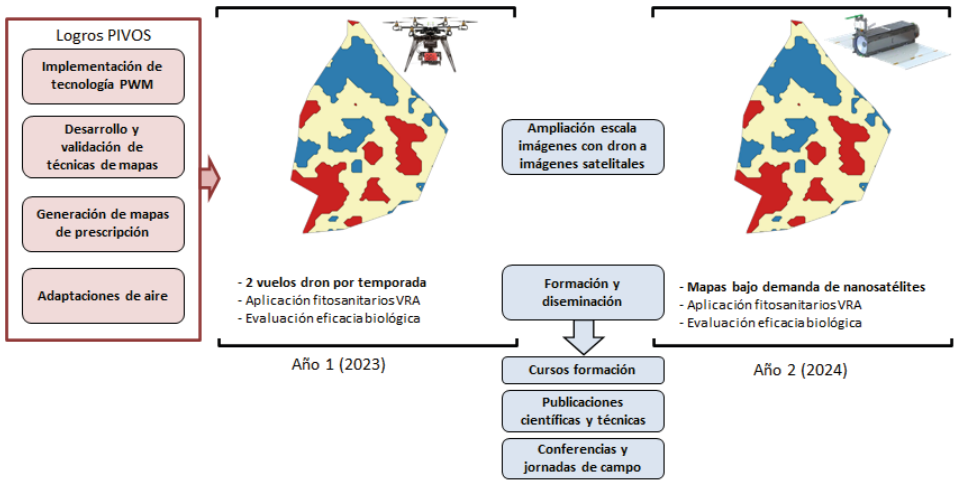


Figura 5. Relación entre el proyecto de investigación PIVOS y la prueba de concepto ADOPTA.

La relación entre el proyecto PIVOS y el ADOPTA se basa en que este segundo proyecto busca implantar esta tecnología entre los agricultores involucrados, así como buscar nuevas mejoras, como en la adquisición de imágenes aéreas (Figura 5). Ello supone que los potenciales usuarios puedan reducir la cantidad de productos fitosanitarios mediante la implementación de estos prototipos. Para facilitar esta labor, se introducirá la posibilidad de generar mapas a partir de las imágenes con satélites, más fáciles de obtener que con dron. Los agricultores seleccionados manejarán los equipos, tanto en olivar como en viñedo, durante dos campañas completas, utilizándose, en la primera, las imágenes proporcionadas por el dron y, en la segunda, las obtenidas del satélite (Figura 6). Además, se utilizarán como indicadores del beneficio de los tratamientos realizados con los prototipos, la eficacia biológica y la reducción del consumo de fitosanitario, agua, tiempo y combustible.

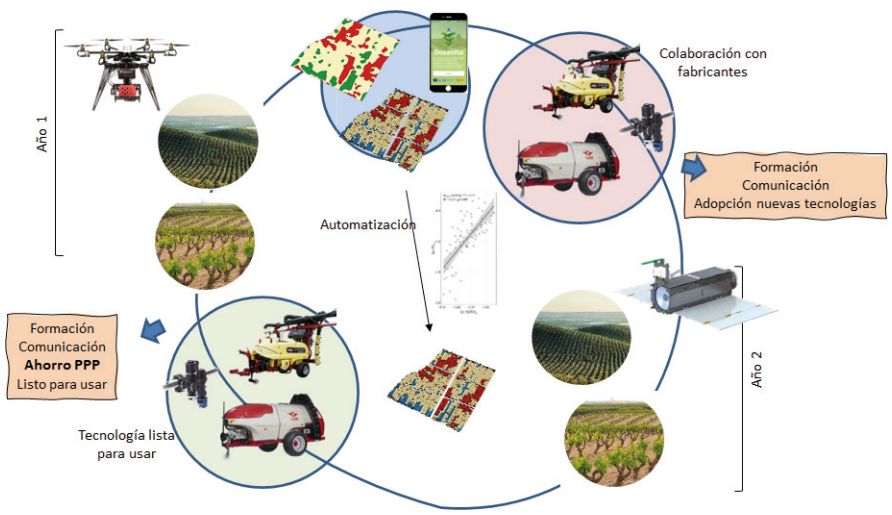


Figura 6. Esquema de trabajo del proyecto ADOPTA.

5. Ensayos de campo

Los primeros experimentos de campo han demostrado que el sistema inteligente ha sido siempre capaz de interpretar los mapas y realizar las modificaciones en el caudal especificadas en el mapa de prescripción, ajustando en todo momento el caudal de líquido generado por cada

atomizador. Por ejemplo, en el caso de los viñedos se hicieron dos ensayos con cobre en un cultivo en espaldera, en la zona de DO Penedés, simulando un tratamiento fungicida. En el primero, llevado a cabo en junio, el pulverizador consumió un total de 770 L de mezcla de agua y cobre. Paralelamente, se hizo otra aplicación con el sistema desconectado, como si se tratara de un equipo convencional, sin olvidar los requisitos de las Buenas Prácticas Agrícolas. Para la misma superficie, la máquina consumió 979 L. El segundo periodo de tratamientos fue en julio, donde el prototipo y el sistema de referencia consumieron 903 y 1030 L, respectivamente. Esto supuso un ahorro medio del 17% de caldo fitosanitario (tanto agua como cobre). Si además esto se compara con los tratamientos típicos de la zona (300-350 L/Ha), este ahorro se incrementaría hasta el 40%.

4. Conclusiones

Este trabajo demuestra la capacidad de desarrollar nuevas tecnologías que ayuden a cumplir los objetivos marcados por Europa para la reducción de productos fitosanitarios. Los prototipos han sido capaces de realizar las actividades que se esperaban en campo, con el consiguiente ahorro de agua y producto.

Finalmente, los proyectos PIVOS y ADOPTA son una buena muestra de las ventajas y los beneficios derivados de una estrecha colaboración entre distintos Grupos de Investigación en los que cada uno aporta la experiencia y el conocimiento de un tema específico. El resultado esperado derivará en la puesta en servicio, para técnicos y agricultores, de herramientas que mejoren la importante tarea de la protección de sus cultivos y les ayuden en el cumplimiento de la ~~nueva~~ reglamentación europea en materia de utilización de productos fitosanitarios.

5. Agradecimientos

El proyecto PIVOS (PID2019-104289RB) y ADOPTA (PDC2022-133395) han recibido financiación por parte del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España. Agradecemos el apoyo prestado por Ilemo Hardi S.A.U, Máñez y Lozano Tratamientos Fitosanitarios, Randex Válvulas Ibéricas SL, TeeJet Technologies Europe y a los agricultores vinculados al proyecto.

6. Referencias

1. González PA., Parga-Dans E., Luzardo O. P. Big sales no carrots: Assessment of pesticide policy in Spain. Crop Protection. 2021, 141, 105428.
2. Comisión Europea. Communication from the commmission to the european parliament, the european council the council the european economic and social commmittee and the commmittee of the regions the european green deal. European Commission: Brussels (Belgium). 2019.
3. Comisión Europea Communication from the commmission to the european parliament, the european council the council the european economic and social commmittee and the commmittee of the regions farm to fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. European Commission: Brussels (Belgium). 2020.
4. Grella M., Maffia J., Dinuccio E., Balsari P., Miranda-Fuentes A., Marucco P., Gioelli F. Assessment of fine droplets (< 10 μm) in primary airborne spray drift: A new methodological approach. Journal of Aerosol Science. 2023, 106138.
5. Song, Y., Zhu F., Cao C., Cao L., Li F., Zhao P., Huang, Q. Reducing pesticide spraying drift by folate/Zn2+ supramolecular hydrogels. Pest Management Science. 2021, 77(11), 5278-5285.
6. Godoy-Nieto A., Miranda-Fuentes A., Grella M., Blanco-Roldán G. L., Rodríguez-Lizana A., Gil-Ribes J. A. Assessment of spray deposit and loss in traditional and intensive olive orchards with conventional and crop-adapted sprayers. Agronomy. 2022, 12(8), 1764.
7. Salas B., Salcedo R., Ortega P., Grella M., Gil E. Use of ultrasound anemometers to study the influence of air currents generated by a sprayer with an electronic control airflow system on foliar coverage. Effect of droplet size. Computers and Electronics in Agriculture. 2022, 202, 107381.

8. TOPPS-Prowadis Project. Best management practices to reduce spray drift. 2014. Available at < http://www.topps-life.org/ >
9. Colaço A. F., Molin J. P., Rosell J. R. Spatial variability in commercial orange groves. Part 1: canopy volume and height. Precision Agriculture. 2019, 20(4), 788-804.
10. Owen-Smith P., Perry R., Wise J., Jamil R. Z. R., Gut L., Sundin G., Grieshop M. Spray coverage and pest management efficacy of a solid set canopy delivery system in high density apples. Pest Management Science. 2019, 75, 3050-3059.
11. García-Ramos F. J., Serreta A., Boné, A., Vidal M. Applicability of a 3D laser scanner for characterizing the spray distribution pattern of an air-assisted sprayer. Journal of Sensors. 2018, Article ID 5231810, 1-8.
12. Wei Z., Xue X., Salcedo R., Zhang Z., Gil E., Sun Y., Li Q., Shen J., He Q., Dou Q., Zhang Y. 2022. Key technologies for an orchard variable-rate sprayer: Current status and future prospects. Agronomy, 13(1), 59.
13. Salas B., Ortega P., Berger, L. T., Gil E. Smart orchard sprayer to adjust pesticide dose to canopy characteristics. Association of Applied Biologists. 2022, 157-164.
14. Zhu H., Ozkan, E., Salcedo R., Jeon, H., Falchieri D. Foliar deposition and off-target loss in young apple orchard with PWM-controlled spray systems. Aspects of Applied Biology. 2022, 147, 149-156.
15. Rodríguez-Lizana A., Pereira M. J., Ribeiro M. C., Soares A., Azevedo L., Miranda-Fuentes A., Llorens J. Spatially variable pesticide application in olive groves: Evaluation of potential pesticide-savings through stochastic spatial simulation algorithms. Science of The Total Environment. 2021. 778, 146111.
16. Campos J., Llop, J., Gallart, M., García-Ruiz, F., Gras A., Salcedo R., Gil E. (2019). Development of canopy vigour maps using UAV for site-specific management during vineyard spraying process. Precision Agriculture. 20(6), 1136-1156.
17. Campos J., Gallart, M., Llop, J., Ortega P., Salcedo R., Gil E. On-farm evaluation of prescription map-based variable rate application of pesticides in vineyards. Agronomy. 2020, 10(1), 102.
18. Campos J., García-Ruíz, F., Gil E. Assessment of vineyard canopy characteristics from vigour maps obtained using uav and satellite imagery. Sensors. 2021, 21(7), 2363.
19. Garcia-Ruiz F., Campos J., Llop-Casamada J., Gil E. Assessment of map based variable rate strategies for copper reduction in hedge vineyards. Computers & Electronics in Agriculture. 2023, 207, 107753.
20. Ortí E., Cuenca A., Pérez M., Torregrosa A., Ortiz, C., Rovira-Más F. Preliminary evaluation of a blast sprayer controlled by Pulse-Width-Modulated nozzles. Sensors. 2022, 22(13), 4924.
21. Salcedo R., Zhu H., Jeon, H., Ozkan, E., Wei Z., Gil., E. Characterization of activation pressure flow rate and spray angle for PWM-controlled hollow-cone nozzles. Biosystems Engineering. 2022a 218, 139-152.
22. Salcedo R., Zhu H., Jeon H., Ozkan E., Wei Z., Gil E., Campos J., Román C. Droplet size distributions from hollow-cone nozzles coupled with PWM valves. Journal of ASABE. 2022b, 65(4), 695-706.
23. Saiz-Rubio V., Ortiz, C., Torregrosa A., Ortí, E., Pérez, M., Cuenca A., Rovira-Más F. Modelling vineyard spraying by precisely assessing the duty cycles of a blast sprayer controlled by Pulse-Width-Modulated nozzles. Agriculture. 2023, 13(2), 499.
24. Salcedo R., Zhu H., Zhang Z., Wei Z., Chen, L., Ozkan, E., Falchieri D. Foliar deposition and coverage on young apple trees with PWM-controlled spray systems. Computers and Electronics in Agriculture. 2020, 178, 105794.
25. Miranda-Fuentes A., Godoy-Nieto A., Gamarra-Diezma J.L., Rodríguez-Lizana A., González-Sánchez E.J., Lara del Río F., Bejarano-Cabanás J.M., Román-Vázquez J., Blanco-Roldán G.L., Gil-Ribes J.A. New developments to help farmers correctly dosing pesticides in olive orchards. 15th Workshop on Spray Application and Precision Technology in Fruit Growing, West Malling, UK, 16–18 July 2019.
26. Gil E., Campos J., Ortega P., Llop J., Gras A., Armengol E., Salcedo R., Gallart M. DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method. Computers and Electronics in Agriculture. 2029, 160, 117-130.
27. Soares, A. Direct sequential simulation and cosimulation. Mathematical Geology. (2001). 33, 911-926.



Vineyard management zones: A case study based on soil apparent electrical conductivity survey

J. Serrano[1,*], V. Mau[1], R. Rodrigues[1], L. Paixão[2], S. Shahidian[1], J. Silva[1,2], L. Paniagua[3], F. Moral[4]

[1] MED—Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development and CHANGE—Global Change and Sustainability Institute, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal; jmrs@uevora.pt;
[2] AgroInsider Lda., 7005-841 Évora, Portugal
[3] Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura, Avenida Adolfo Suárez, S/N, 06007 Badajoz, Spain
[4] Departamento de Expresión Gráfica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avenida de Elvas, S/N, 06006 Badajoz, Spain

Abstract: In the current context of increasing costs of production factors, it is essential to optimize the management of available resources, seeking to incorporate technologies that improve knowledge of the variables involved in the agronomic production process. In this study, carried out in a 3.3 ha vineyard located near Évora, in the South of Portugal, a contact sensor ("Veris 2000 XA") was used to map soil apparent electrical conductivity (EC_a). A precision altimetric survey of the field was also carried out with a global navigation satellite system receiver (GNSS). The results of these surveys were submitted to geostatistical treatments that allowed the definition of three management zones (MZ; less, intermediate and more productive potential). The validation of these MZ was carried out by laboratory analysis of soil samples (texture, pH, organic matter - OM, moisture content, phosphorous, potassium, exchange bases and cation exchange capacity - CEC). All these soil parameters proved the validity of the MZ (of less, intermediate and more productive potential) defined from the EC_a and altimetric survey. This validation attests to the interest of expeditious technological tools for monitoring EC_a as a fundamental step in implementing smart agronomic decision-making processes.

Keywords: precision viticulture; spatial variability; sensors; site-specific management.

1. Introduction

One of the main challenges for the agricultural sector, and in particular, viticulture, is to adapt to climate change while ensuring the quality of production and its sustainability [1]. Within this context, compounded by rising input costs, it is essential to optimize the management of available resources, by incorporating technologies that provide information on the variables involved in the agronomic production process. This perspective is within the framework of the *Precision Agriculture*, which has expanded in the last decade to practically all crops.

The spatial variability of grapevine (*Vitis vinifera* L.) within a single vineyard is a relevant issue for growers and winemakers [2], essential for making management decisions [3,4]. A very diverse set of management decisions are required in this crop, ranging from input management (irrigation, fertilizing, spraying) up to cultural practices (pruning, shoot and cluster thinning, canopy management, inter-row cover, or segmented harvesting) [2].

Some of the factors responsible for variability in a vineyard remain stable over time, such as topography and some soil properties; therefore, the knowledge of their spatial variability can provide a better understanding of this complex decision-making scenario [2] and the definition of management zones (MZ). These represent subfield areas with homogeneous characteristics,

such as texture, topography or nutrient levels [5] and may be used to adapt viticulture practices [4]. This can be considered the first step in the application of site-specific crop management [5].

Variation in soil and topography is likely to have a large impact on vineyard variability [6]. The proximal monitoring of soil variability includes the use of a wide range of sensors [7]. The apparent soil electrical conductivity (EC_a) sensing technology, mounted on mobile platforms and coupled with GNSS receivers, are highly relevant when designing new vineyards and redeveloping existing vineyards [6], but also for the definition of MZ and site-specific management [5]. There are two types of sensors currently on the market to measure soil EC_a based on the method of measurement: contact or non-contact. The first type (e.g. Veris sensor) is invasive and uses electrodes, usually in the shape of coulters that make contact with the soil. This sensor type measures electrical resistivity (i.e., the inverse of conductivity). The second type (e.g. Dualem or EM38 sensors), is non-invasive, and is composed of a transmitter and a receiver coil usually installed at opposite ends of a non-conductive bar. This sensor type works on the principle of electromagnetic induction [5,7]. The EC_a is usually related to various soil physical and chemical properties across a wide range of soils [8], such as texture and depth, water retention capacity, organic matter content, salinity [7], cation exchange capacity (CEC), pH, exchangeable magnesium and other soil nutrients [9].

This study aims: (i) to assess the soil spatial variability of a vineyard through EC_a survey with a contact sensor; (ii) to define MZ based on geostatistical treatment of EC_a and topographic survey; (iii) to validate MZ by soil parameters obtained in reference laboratory analysis.

2. Material and Methods

2.1. Study Area

The study field is a 3.3 ha vineyard, located at the "Mitra" farm of "University of Évora" (38.532° N; 8.015° W). The aerial image of the Mitra vineyard (Figure 1a) shows two areas: (i) white grapes (1.30 ha, about 85% of which is planted with three varieties: "Arinto", "Síria" and "AntãoVaz") and (ii) red grapes (2.0 ha, about 82% of which is planted with three varieties: "Aragonez", "Trincadeira" and "Castelão").

A precision altimetric survey of the field was carried out during October 2022 using a real-time kinematic (RTK) GPS instrument (Trimble RTK/PP-4700 GPS manufactured by TRIMBLE Navigation Limited, USA). The altimetric map (Figure 1b) was generated using the triangulated irregular network interpolation tool, converted into a grid surface with a 1 m grid resolution using the Spatial Analyst Tools of ArcGIS (version 10.5, ESRI, Inc., Redlands, California, USA).

The climate of this Mediterranean region is classified as Csa (Köppen–Geiger classification) [10] and is characterized by high inter-annual irregularity and low rainfall (<600 mm). The thermo-pluviometric diagram of the Évora meteorological station in the year under study (between May 2022 and April 2023) shows an accumulated precipitation of 526 mm, concentrated mainly (98%) in six months (September-January, and March), and the remaining six months with practically no precipitation (February and April-August). In this period without precipitation, particularly between May and August, the average temperature is around 20-30°C.

2.2. Soil Apparent Electrical Conductivity (EC_a) Survey and Processing

The Veris 2000 XA contact-type sensor (Veris Technologies, Salina, KS, USA) equipped with a GNSS antenna was used to measure the soil EC_a of the experimental field on 24 October 2022. This sensor is mounted on a chassis supported on two wheels and is formed by two pairs of coulter-electrodes (adjustable rotating discs): one pair injects a current into the soil (outermost discs), while the other pair (innermost discs) measure the voltage drop. The adjustment of the discs generated one set of topsoil data (from 0 to 0.30 m depths). The sensor was pulled by a four-wheel drive vehicle in the vineyard rows at an average speed of 5 $km \cdot h^{-1}$ and was programmed to register the measurements each second. Estimating EC_a at unsampled locations was done with

the ordinary point kriging algorithm, integrating the spatial correlation structure described with the variograms. The kriged maps showing the spatial distribution of EC_a in the experimental field were obtained from the estimated values. Finally, the kriged maps of EC_a were produced with the ArcMap module of the ArcGIS.

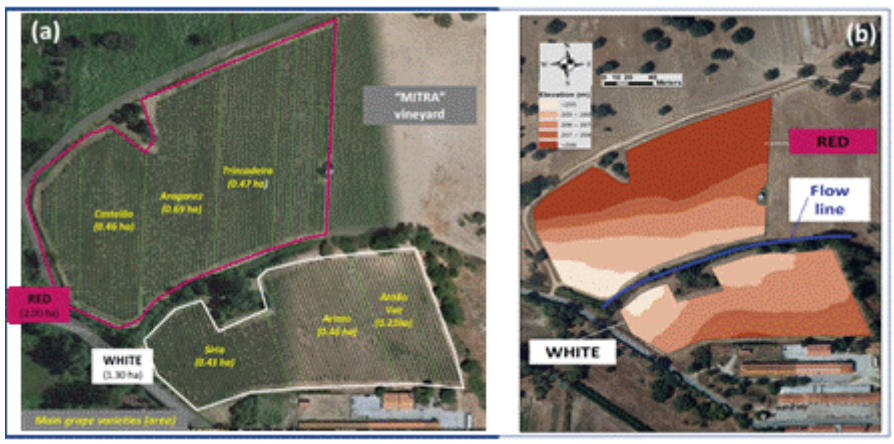


Figure 1. Aerial image of the Mitra vineyard, with indication of main white and red grape varieties (a); altimetric map (b).

2.3. Definition and Validation of Management Zones (MZ)

The results of EC_a and altimetric surveys were used as input for the geostatistical analyses that allowed the definition of management zones (MZ). These homogeneous subfields were delineated using a fuzzy cluster algorithm [11]. The MZ Analyst (MZA) software (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) was utilized in this study. From a practical perspective, three management zones with different productive potential (less, intermediate and more potential) were considered in each vineyard area (white grapes, MZ: W-, W_{int} and W+, respectively; and red grapes, MZ: R-, R_{int} and R+, respectively).

2.4. Soil Sampling Collection and Reference Analysis

After the definition of the MZs (with less, intermediate and more productive potential), in the validation process, soil parameters (moisture content–SMC, texture, pH, organic matter–OM, P_2O_5, K_2O, degree of base saturation–DBS and cation exchange capacity–CEC) at sampling locations were employed to check their differences.

Four soil points were georeferenced in each MZ and in each field (white and red grapes areas). The GNSS georeferenced samples were collected on 25 January 2023 using a gouge auger and a hammer, at a depth range of 0–0.30 m. Each composite sample was the result of five sub-samples collected within a radius of 1 m. In the laboratory, the soil samples were weighed, dried at 70ºC for 48 h, and then weighed again to establish the SMC. Afterwards the samples were processed for particle-size distribution (texture: sand, silt and clay content) using a sedimentographer (Sedigraph 5100, manufactured by Micromeritics). Soil samples were also subjected to chemical analyses, standard methods of soil analytic determination [12] of pH (in 1:2.5, soil: water), organic matter (OM), phosphorous (P_2O_5), potassium (K_2O), degree of base saturation (DBS) and cation exchange capacity (CEC).

2.5. Statistical Analysis of the Data

To assess the soil spatial variability, descriptive statistical analysis (mean, standard variation, and range) was performed for the measured parameters.

The validation process of three MZ included a statistical analysis (ANOVA) to evaluate if they were significantly different with a 95% significance level ($p < 0.05$). The delimitation of each

zone, based on EC_a and altimetric survey, was evaluated computing the differences in the mean values of soil properties. Since the normality in the data cannot be assumed, the Kruskal-Wallis nonparametric test and the Dunn post hoc test were used.

3. Results and Discussion

3.1. From spatial variability to the definition of management zones (MZ)

The EC_a spatial variability is common to the entire vineyard (Table 1), with a CV of around 65% in the white grapes field and 56% in the red grapes field. The SMC, however, shows less spatial variability, with a CV of around 29% in white grapes field and 8% in red grapes field (Table 1). The results of soil sampling (Table 2) show that it is a coarse to medium textured soil (clay content of about 15%; textural classification between sandy loam and sandy clay loam [13], with low OM content (especially in red grapes field, with 1%), pH close to neutral, with strong contrast between the two subfields in terms of phosphorus and potassium availability (extremely high in white grapes field and low in red grapes field). The spatial variability is very pronounced, with CV greater that 20–30% in practically all soil evaluated parameters, except for pH (CV of 7–9%) and sand content (CV of 11%).

Table 1. Soil apparent electrical conductivity (EC_a) and soil moisture content (SMC) of vineyard.

Parameter	Vineyard "W" (White grapes)			Vineyard "R" (Red grapes)		
	Mean ± SD	CV (%)	Range	Mean ± SD	CV (%)	Range
EC_a (mS.m^{-1})	5.3 ± 3.4	64.9	0.8 – 17.8	4.6 ± 2.6	55.8	0.3 – 17.1
SMC (%)	17.7 ± 5.2	29.2	14.5 – 38.8	16.2 ± 1.3	8.1	14.0 – 18.7

SD – Standard deviation; CV – Coefficient of variation; EC_a – Soil apparent electrical conductivity; SMC – Soil moisture content.

Table 2. Characteristics of soil vineyard (0–0.30 m) in January 2023.

Soil parameter	Vineyard "W" (White grapes)			Vineyard "R" (Red grapes)		
	Mean ± SD	CV (%)	Range	Mean ± SD	CV (%)	Range
Clay (%)	14.9 ± 4.8	32.2	10.4 – 23.9	14.6 ± 6.0	41.2	7.4 – 26.5
Silt (%)	13.6 ± 3.0	22.4	10.6 – 19.0	11.3 ± 2.4	20.9	7.8 – 15.4
Sand (%)	71.5 ± 7.6	10.7	58.4 – 78.7	74.0 ± 7.9	10.7	61.1 – 84.9
SMC (%)	17.6± 4.4	25.0	11.2 – 27.5	14.6 ± 3.7	25.2	7.2 – 18.5
OM (%)	1.7 ± 0.5	30.7	1.0 – 2.5	1.0 ± 0.2	23.6	0.7 – 1.5
pH	6.5 ± 0.5	7.0	5.8 – 7.1	6.1 ± 0.5	8.8	5.6 – 7.0
P_2O_5 (mg.kg^{-1})	350.7 ± 209.1	59.6	101.4 – 722.6	28.9 ± 12.4	42.9	16.3 – 53.1

K_2O (mg.kg^{-1})	118.7 ± 44.5	37.5	44.0 – 201.0	40.0 ± 24.7	61.8	10.0 –78.2
DBS (%)	61.1 ± 33.6	55.0	13.5 – 121.9	61.4 ± 42.3	69.0	15.5 – 118.0
CEC (cmol.kg^{-1})	14.9 ± 5.9	39.5	8.2 – 28.0	18.2 ± 11.1	61.0	8.3 – 41.8

SD – Standard deviation; CV – Coefficient of variation; SMC – Soil moisture content; OM – Organic matter; P_2O_5 – Assimilable phosphorous; K_2O – Assimilable potassium; DBS – Degree of base saturation; CEC – Cation exchange capacity (CEC).

The transformation of the EC_a (based on the October measurement) and altimetric maps into a MZ map by applying a geostatistical algorithm is presented in Figure 2 (c and d). Three MZ were defined in white grapes field (less, intermediate and more productive potential) and, based on the lower EC_a spatial variability and, especially on the SMC, only two MZ were defined in red grapes field (less and more productive potential).

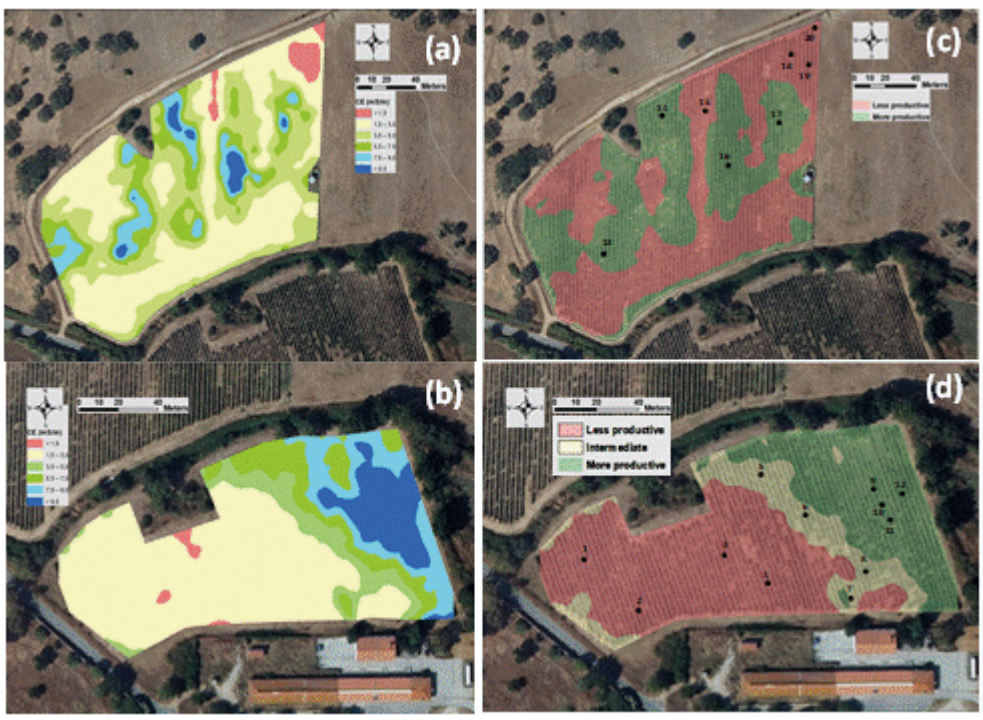


Figure 2. Soil apparent electrical conductivity (EC_a) maps of red (a) and white (b) grapes fields; management zones maps of red (c) and white (d) grapes fields (with location of soil sampling points).

Mobile soil EC_a measurements constitute one of the most efficient ways to quickly map soil spatial variability [5]. According to Ammoniaci et al. [7] and Rodriguez-Pérez et al. [14] EC_a could save time and resources during the planning and establishment of new vineyards and, also, during monitoring and management of established vineyards. The CV of EC_a obtained in this study (about 60%) classifies this parameter as having high spatial variability [4] and, therefore, is a potential indicator of the soil characteristics, which suggest the convenience of defining different MZ [5]. In this study, terrain elevation was also used in MZ delineation due to its impact on water flow and accumulation, as well as redistribution of soil mineral particles and OM, and, therefore, on crop growth and development [3,14]. Other works have sought to complement the

EC_a information with other parameters, namely crop vegetative vigour. Esteves et al. [9], for example, associated the NDVI measurement, obtained from the Sentinel-2 satellite images, with EC_a to define three zones of differentiated vine management. Serrano et al. [16] also associated the EC_a with NDVI and NDWI to define three MZ, but in pasture management.

3.2. Validation of management zones (MZ)

In the validation process, twenty sampling points were georeferenced, four in each MZ (Figure 2).

The validation of the MZ defined in each field (white and red grapes areas) based on the differences in the mean values of soil properties (Table 3) confirmed significantly higher values of clay, silt, SMC, OM, pH, DBS and CEC and significantly lower values of sand in MZ with greater productive potential ("More").

Table 3. Validation of management zones (MZ): mean values of each soil property for MZ (less productive zone, "Less"; intermediate zone, "Inter."; and more productive zone, "More").

MZ	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	SMC (%)	OM (%)	pH	P_2O_5 ($mg.kg^{-1}$)	K_2O ($mg.kg^{-1}$)	DBS (%)	CEC ($cmol.kg^{-1}$)
Less	10.4 a	11.5 a	78.1 a	13.4 a	1.1 a	5.9 a	121.4 a	80.4 a	28.6 a	14.2 a
Inter.	12.2 b	11.7 a	76.2 a	18.2 b	1.6 b	6.6 b	341.2 c	134.5 b	46.4 b	16.7 b
More	15.2 c	19.7 b	65.1 b	18.4 b	1.7 b	6.8 b	263.0 b	70.3 a	99.9 c	18.0 c

MZ – Management zones; SMC – Soil moisture content; OM – Organic matter; P_2O_5 – Assimilable phosphorous; K_2O – Assimilable potassium; DBS – Degree of base saturation; CEC – Cation exchange capacity (CEC); Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) according to the Dunn test.

Areas with higher EC_a led to MZ with more productive potential, and vice-versa. The validation showed that the zones with more productive potential present a soil profile (0–30 cm depth) with higher clay, moisture, OM, pH, DBS and CEC contents, and lower sand content.

The relationship between EC_a and soil texture has been documented in several studies [5,7,8,9,11], positively correlated with the finer texture component, clay, and negatively correlated with the coarser textures such as coarse and fine sands [5,14], even leading to the indication of specific reference values of EC_a for certain soil characteristics (rocky substrate, sand, clay, water, etc.) [7]. Mean EC_a of 3–6 $mS.m^{-1}$ classify the soil of this vineyard as coarse-textured and dryland soils, typical of this region of South of Portugal.

The relationship between EC_a and others soil physical and chemical properties, namely OM content [7], SMC [13,16], CEC, pH, exchangeable magnesium and other soil nutrients [9], has been demonstrated across a wide range of soils [8]. In this study, however, the main macronutrients phosphorus and potassium (P_2O_5 and K_2O, respectively) did not follow the trend defined by the MZ, with mean contents very high in intermediate MZ (Table 1). This result makes it difficult to transpose these MZ maps to fertilization prescription maps. Since these abnormally high values of P and K occur only in the white grapes area (Table 1), where the OM values are also much higher (mean of 1.7% versus 1.0% in red grapes area), the proximity of a pigsty (upstream of the white grape vineyard) could be the origin of this unexpected pattern. If fertilization was based on a composite sample of the entire vineyard area of 3.3 ha, as is common practice in traditional agriculture in the region, the average values of P and K would be adequate (more than 100 mg.kg-

^{1}) and therefore would not justify fertilization, however, spatial analysis shows, for example, that the red grapes area has low P and K values (around 30–40 mg.kg^{-1}), which requires P and K fertilization.

Given that this is an exploratory study, carried out in a relatively restricted area of vineyard (3.3 ha), under particular soil and climatic conditions, further studies, in different soil types and different regions [9] should be conducted, preferably complemented with yield maps, to make clearer and with practical impact the agronomic significance of this MZ delineation [5].

4. Conclusions

The results of this study showed that the use of fast and easy tools for measuring and mapping EC_a and altimetry allows capturing, in a temporally stable way, the spatial variability of physical (texture and moisture) and chemical (pH, OM, degree of base saturation and cation exchange capacity) topsoil (0–30 cm) characteristics, leading to the definition and validation of zones (MZ) of high and low productive potential. These MZ may be relevant when designing new vineyards or replanting existing vineyards, e.g. for the selection of the most adapted cultivars, or for field orientation (sun exposure, drainage, etc.) for a given "terroir". This approach can also be useful for a more-informed decision-making process for site-specific management of inputs and guide viticultural practices. The ability to map the soil spatial variability allows grape growers to move from a random soil sampling to an optimized methodology based on MZ (soil smart sampling).

The location of one of the experimental fields (white grapes area), between an intensive livestock installation (pig production) and a water flow line may have led the geostatistical algorithm to set an intermediate MZ in this field. The abnormally high values of P and K occurred only in the white grapes area, where the OM values are also much higher (mean of 1.7% versus 1.0% in red grapes area), which can be an indicator of this external effect (drainage of effluents from intensive livestock production) on topsoil variability.

Since the main aim of modern oenology is to produce wines of recognized quality and typically, which can then be differentiated in the market, it is essential to consider that the potential quality of wine is established in the vineyard, whereby, it will be interesting in the next campaign to evaluate the impact of this topsoil spatial variability on productivity and, especially, on grape quality and, consequently, on wine quality, suggesting a segmented harvest. It will also be important to validate these results in other conditions, with different soil types or in different regions, extending the database and so, improve the process for prescribing spatially differentiated inputs.

References

28. Casson, A.; Ortuani, B.; Giovenzana, V.; Brancadoro, L.; Corsi, S.; Gharsallah, O.; Guidetti, R.; Facchi, A. A multidisciplinary approach to assess environmental and economic impact of conventional and innovative vineyards management systems in Northern Italy. *Sci. Total Environ*. **2022**, *838*, 156181.
29. Ferrer, M.; Echeverría, G.; Pereyra, G.; Gonzalez-Neves, G.; Pan, D.; Mirás-Avalos, J.M. Mapping vineyard vigor using airborne remote sensing: relations with yield, berry composition and sanitary status under humid climate conditions. *Prec. Agric*. **2020**, *21*,178–197.
30. Córdoba, M.; Bruno, C.; Costa, J.; Balzarini, M. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. *Comput. Electron. Agri.* **2013**, *97*, 6–14.
31. Unamunzaga, O.; Besga, G.; Castellón, A.; Usón, M.A.; Chéry, P.; Gallejones, P.; Aizpurua, A. Spatial and vertical analysis of soil properties in a Mediterranean vineyard soil. *Soil Use Manag*. **2014**, *30*, 285–296.
32. Moral, F.; Terrón, J.; Silva, J.M. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil Tillage Res*. **2010**, *106*, 335–343.

33. Tardaguila, J.; Stoll, M.; Gutiérrez, S.; Proffitt, T.; Diago, M.P. Smart applications and digital technologies in viticulture: A review. *Smart Agricultural Technology* **2021**, *1*, 100005.
34. Ammoniaci, M.; Kartsiotis, S.-P.; Perria, R.; Storchi, P. State of the art of monitoring technologies and data processing for Precision Viticulture. *Agriculture* **2021**, *11*, 201.
35. Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R.; Bollero, G.A.; Bullock, D.G.; Wiebold, W.J. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agron. J.* **2003**, *95*, 472–482.
36. Esteves, C.; Fangueiro, D.; Braga, R.P.; Martins, M.; Botelho, M.; Ribeiro, H. Assessing the contribution of ECa and NDVI in the delineation of management zones in a vineyard. *Agronomy* **2022**, *12*, 1331.
37. Peel, M.C.; Finlayson, B.L.; McMahon, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2007, 11, 1633–1644.
38. Höppner, F.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Runkler, T.A. Fuzzy cluster analysis. Chichester, UK: Wiley, 1999.
39. AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International, 18th ed.; AOAC International: Arlington, VA, USA, 2005.
40. FAO. World Reference Base for Soil Resources; Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Soil Resources Reports N 103; FAO: Rome, Italy, 2006.
41. Rodríguez-Pérez, J.R.; Plant, R.E.; Lambert, J.-J.; Smart, D.R. Using apparent soil electrical conductivity (ECa) to characterize vineyard soils of high clay content. *Prec. Agric.* **2011**, *12*, 775–794.
42. Verdugo-Vásquez, N.; Acevedo-Opazo, C.; Valdés-Gómez, H.; Pañitrur-De la Fuente, C.; Ingram, B.; García de Cortázar-Atauri, I.; B. Tisseyre. Identification of main factors affecting the within-field spatial variability of grapevine phenology and total soluble solids accumulation: towards the vineyard zoning using auxiliary information. *Prec. Agric.* **2022**, *23*, 253–277.
43. Serrano, J.; Shahidian, S.; Da Silva, J.M.; Paixão, L.; Calado, J.; De Carvalho, M. Integration of soil electrical conductivity and indices obtained through satellite imagery for differential management of pasture fertilization. *AgriEngineering* **2019**, *1*, 567–585.
44. Serrano, J.; Shahidian, S.; Marques da Silva, J. Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. *Prec. Agric.* **2013**, *14*, 99–114.

Can sheep livestock systems based on dynamic grazing influence soil compaction? A case study on dryland pastures in the Mediterranean Montado ecosystem

J. Serrano[1,*], E. Carreira[1], S. Shahidian[1], M. Carvalho[1], J. Silva[1,2], L. Paniagua[3], F. Moral[4], A. Pereira[1]

[1] MED—Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development and CHANGE—Global Change and Sustainability Institute, Universidade de Évora, Pólo da Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal; jmrs@uevora.pt;
[2] AgroInsider Lda., 7005-841 Évora, Portugal
[3] Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura, Avenida Adolfo Suárez, S/N, 06007 Badajoz, Spain
[4] Departamento de Expresión Gráfica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avenida de Elvas, S/N, 06006 Badajoz, Spain

Abstract: Deferred grazing (DG) consists in adapting the number of animals and the number of days grazed to the availability of pasture. Compared to continuous grazing (CG), which is based on a permanent and low stocking rate, DG is a management strategy that aims at optimizing the use of the resources available in the Mediterranean Montado ecosystem. This study with sheep grazing, carried out between 2019 and 2021 on a 4 ha pasture in Alentejo region of the Southern of Portugal, assesses the impact of these two grazing management systems on soil compaction. This area was divided into four grazing parks of 1 ha each, two under DG management and two under CG management. The cone index (CI, in kPa) was measured in the topsoil layer (0–30 cm) with an electronic cone penetrometer at 48 georeferenced areas (12 in each park). The results of CI measurement showed no significant differences between treatments in all depths measured (0–10, 10–20, and 20–30 cm). These findings are encouraging from the point of view of soil conservation and sustainability, revealing good prospects for the intensification of extensive livestock production. Future work should evaluate the long-term impact and consider other ecosystem services and system productivity indicators.

Keywords: cone index**;** animal trampling; deferred grazing; continuous grazing.

1. Introduction

Mediterranean pasture ecosystems are usually extensive, with low use of inputs, while they are utilized predominantly by small ruminants due to their high efficiency in the use of locally available feeding resources and their adaptation to specific environments [1]. The productivity of Mediterranean grazing lands is limited by physical constraints, such as climate and soil conditions [1]. Therefore, the predominant system in this region is the continuous grazing system

(CG), a grazing management modality with low animal stocking rates (≤1 unit animal, UA, per hectare, corresponding to approximately 6–7 sheep.ha^{-1}) [2] and without a grazing control based on the amount of effective forage accumulation (height monitoring) [3]. In recent years, with the aim of improving the use of the resources available in the Mediterranean Montado ecosystem, more dynamic, intensive, and productive strategies for grazing management have been implemented [3], among them deferred grazing (DG), i.e., intermittent grazing [4]. This consists in adapting the number of animals and the number of days grazed to the availability of pasture to manage feed surpluses, especially in the spring period [5]. When grazing availability decreases below a certain threshold, animals are removed from the plot to allow vegetative recovery [6]. This is intended to limit preferential grazing of certain areas and to promote the homogenous and integral grazing of the plot, preventing less interesting botanical species from gaining prevalence after successive pasture vegetative cycles [4–6]. However, the implementation of grazing systems that aim to make homogeneous use of the entire pasture area can lead to large animal loads in sensitive areas of the plots and at critical times [7]. The degree to which grazing increases soil compaction severity (livestock trampling) is affected by several factors, including grazing management (stocking rate, stocking density, timing, etc.), soil type (texture), soil moisture during grazing, and climate [8,9]. Periods following concentrated rainfall events, which are increasingly frequent in the region, are susceptible to pasture degradation and soil compaction, particularly in areas with structural limitations [9].

The impact of sheep trampling on soil compaction, associated with different grazing systems, is a little-studied process and could become an important tendency indicator of sustainability, which will tend to be considered in future Common Agricultural Policy (PAC) decisions. Within this framework, it will be fundamental to have technological tools that make the decision-making process more expeditious, based on electronic sensors and spatial knowledge of the relevant variables of the Montado ecosystem. The electronic cone penetrometer, which measures soil compaction, is a practical sensor that has the potential to characterize the impact of different grazing management systems from a *Precision Grazing* (PG) perspective [8]. Soil compaction influences crop yield, wherefore the delimitation of management zones (MZ) connected with this parameter is of great importance [10].

This study aims to assess the impact that two grazing management strategies (CG versus DG) have on soil compaction as result of animal trampling.

2. Material and Methods

2.1. Experimental Site Description and Grazing Management

This research was conducted at an experimental pasture called Eco-SPAA which is located in the Mitra farm (38°53.10 N; 8°01.10 W), of University of Évora, in Southern Portugal. The area of study was 4 ha. An overview of the experimental field is given in Figure 1. The study was performed between September 2019 and June 2021.

This pasture was subdivided with fences in 2019, as part of a study to evaluate different grazing systems [6], into four parks (P1 to P4), each with an area of approximately 1 hectare. In parks P1 and P4, a continuous grazing system was implemented (CG; stocking rate of 1 UA throughout the whole vegetative cycle of the pasture), while in parks P2 and P3 a deferred grazing system was implemented, and with a higher stocking rate (DG; stocking rate of 2 UA; they entered or left the grazing parks according to the average height of the pasture, left when this was less than 5 cm, and re-entered when this was greater than 10 cm) [6]. A buffer park outside the experimental pasture receives the animals during the grazing rest periods of parks P2 and P3 (DG treatment). To determine the average height of the pasture in each of the 4 grazing

parks (P1 to P4), 12 sampling points were geo-referenced from a total of 48 sampling areas (Figure 1).

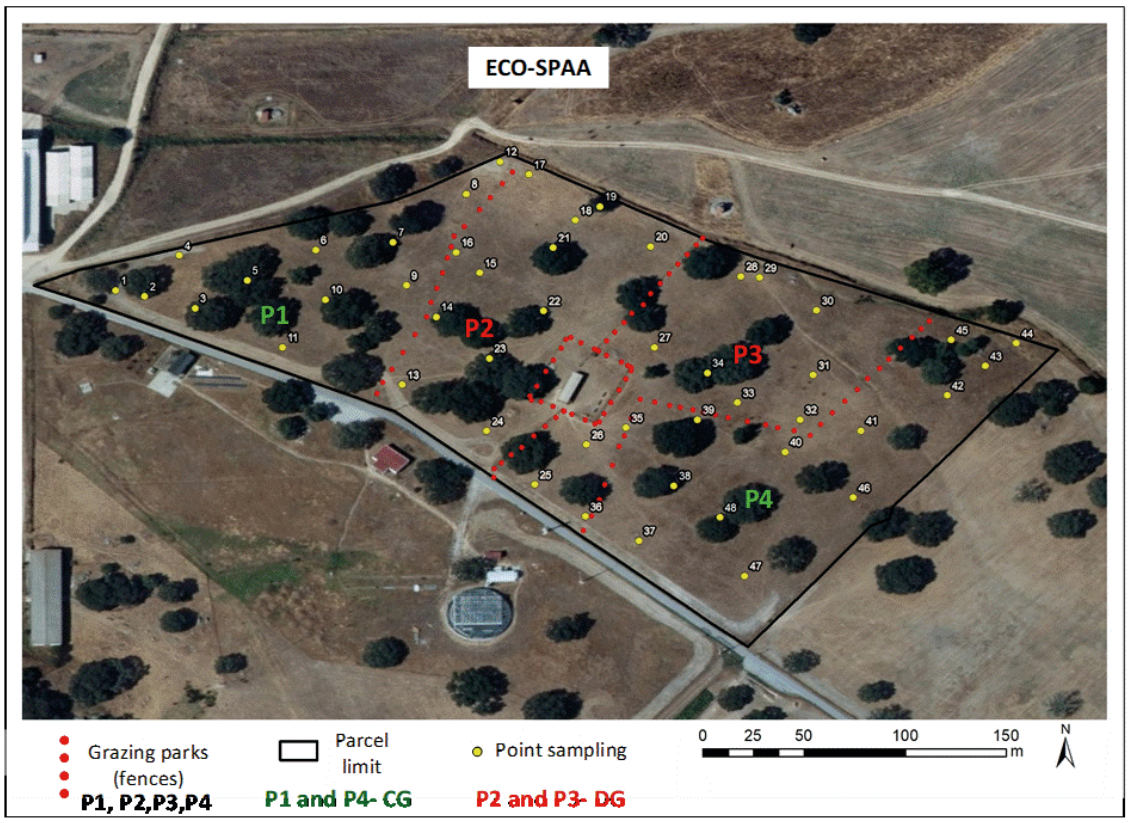


Figure 1. Experimental pasture "Eco-SPAA", located at Mitra farm.

In this area, the soil can be classified as a Cambisol derived from granite [11]. Usually, these acid soils are utilized for grazing and forest land or mixed with arable farming [11]. In this specific case, this pasture was used in extensive sheep grazing systems for over three decades. It integrates the Montado ecosystem, with biodiverse permanent dryland pastures under Holm oak trees (*Quercus ilex* ssp. *rotundifolia* Lam.) with a low density (about 8–10 trees.ha^{-1}). From a textural classification, the soil has a sandy loam texture, acid and with low levels of organic matter [12].

The climate of the area where the experimental field was located is Mediterranean. It can be classified as Csa (Köppen–Geiger classification; [13]). High inter-annual irregularity and low rainfall (usually <600 mm), mainly in the autumn–winter seasons and practically expressionless during the summer [7]. Flooding and the consequent increase in soil compaction by animal trampling are usual due to the rainfall irregularity, particularly the high concentration of rainfall during some events, which is associated with the poor drainage of these soils [7].

2.2. Cone Index and Soil Moisture Measurements

With the aim of measuring the soil resistance to penetration (Cone Index, CI, in kPa), an electronic cone penetrometer "FieldScout SC 900" (Spectrum Technologies, Aurora, IL, USA) equipped with an ultrasonic depth sensor was used in October 2021. In each of the 48 sampling areas of 1 m^2, five CI measurements were performed between 0 and 45 cm (maximum depth allowed by the device). The same operator performed the measurements to avoid errors from the uncertainty of maintaining a constant penetration rate [8]. After the field measurements, data were processed: (i) outliers were removed with a preliminary analysis; (ii) the mean CI value of the set of five measurements were computed for each sampling location and each depth (0–10,

10–20, 20–30 and 0–30 cm); (iii) the graphic representation of CI as a function of soil depth was generated. Readings for all treatments were taken on the same day to avoid soil moisture variability, which can affect the resistance measurements.

2.3. Statistical Analysis

A descriptive statistical analysis was conducted for CI. Inferential analysis consisted of analysis of variance (ANOVA) between treatments (CG versus DG) and between CI depths (0–10, 10–20, 20–30 and 0–30 cm). The IBM SPSS Statistics package for Windows (version 28.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA) was used to perform these analyses.

With the aim of analysing the mean separation whenever the variables presented significant differences in the ANOVA ($p < 0.05$), multiple comparisons were conducted using the Tukey's HSD test.

3. Results and Discussion

It is known that increased stocking rates have negative effects on soil properties and are positively correlated with animal trampling [14]. Donkor et al. [15] suggested that DG systems have associated greater CI than CG systems. Recent studies [7,9] have sought to assess the impact of different cattle management approaches on CI. It is known that sheep have a much lower individual impact on soil compaction than cattle (based in the ratio between the body weight and the soil contact area) [16]; however, this specie has a very marked gregarious behaviour [2], therefore, this pilot study aims to assess the impact that two grazing management strategies (CG versus DG) on soil penetration resistance (CI) as result of sheep trampling. The practical question is: which situation has a greater impact on soil compaction, (i) low stocking rates (few animals) in permanent grazing (CG) or (ii) high stocking rates (many animals) in intermittent grazing with periods, of variable duration, of recovery, i.e. temporary livestock exclusion (DG).

The cone index (mean, standard deviation, and range) for different depths in each treatment (CG versus DG) is presented in Table 1. Although average CI values tend to be higher in areas with DG (Figure 2a) at all depths (Figure 2b), the differences obtained are not statistically significant ($p = 0.337$). The ANOVA showed CI significant differences ($p = 0.000$) between depths, with higher CI values at 10–20 cm depth ($p = 0.000$) compared to 0–10 cm depth, and 20–30 cm depth ($p = 0.000$) compared to 0–10 cm depth. The multiple comparisons showed no significant differences ($p = 0.949$) between 10–20 cm and 20–30 cm depths. These multiple comparisons also showed no significant differences ($p = 0.891$) for interactions between treatments and depths.

Table 1. Mean, standard deviation (SD) and range of cone index (CI, in kPa) for different depths in each treatment (continuous grazing, CG versus deferred grazing, DG).

Depth	CG		DG	
(cm)	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range
0–10	1501 ± 617	500–3450	1696 ± 624	837–2795
10–20	2619 ± 655	1334–3536	2664 ± 894	1078–4200
20–30	2520 ± 893	802–4519	2656 ± 886	1483–4511
0–30	2194 ± 484	1303–3214	2338 ± 639	1250–3597

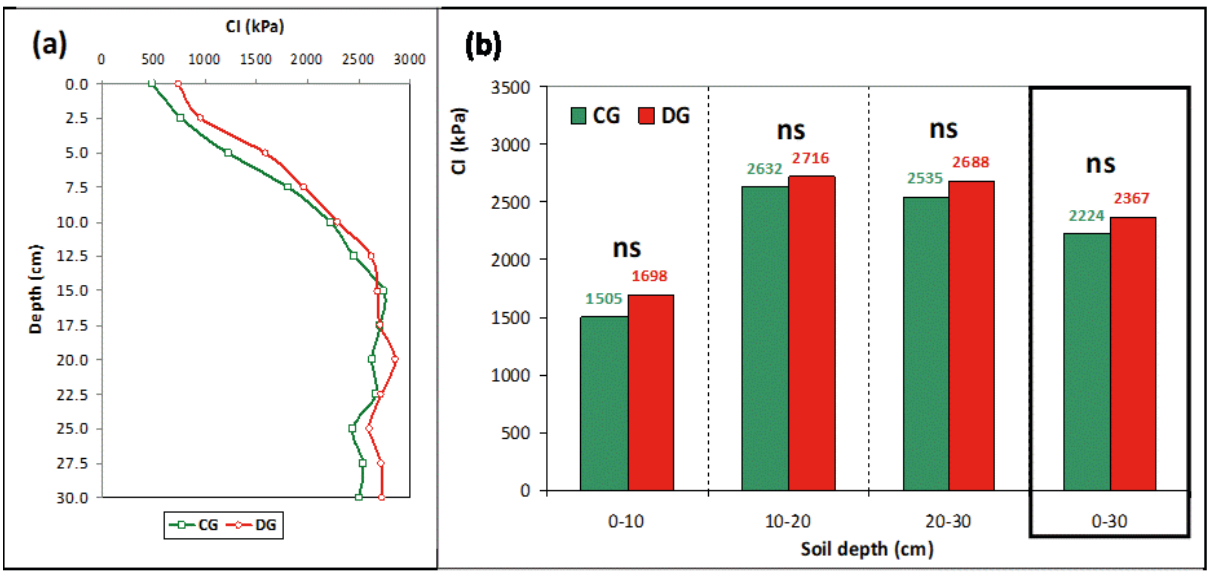


Figure 2. Average cone index (CI, in kPa) for continuous (CG) versus deferred grazing (CG) at: (a) 0–30 cm soil depth; (b) 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm and 0–30 cm soil depths. "ns"—Not significant.

This spatial variability is the first condition for differentiated management implementation, a fundamental step in the intensification of forage-based livestock systems [17], characteristic of the Mediterranean region of southern Portugal [2]. Spatial variability reflects the effect of several factors, mainly such as edaphic, climatic and management [2]. Among the edaphic factors, the nature of the original rocks and, consequently, the texture [10], has the potential to identify and predict spatial variability of soil compaction. In this study, predominate coarse-textured soils, typically less susceptible to compaction than silt loam soils [9,18], which demonstrates the interest, in the future, in extending these exploratory studies to other soil types.

Although average CI values tend to be higher in areas with DG (Figure 2 (a)) at all depths (Figure 2 (b)), as indicated by the study of Donkor et al. [15], the differences obtained are not statistically significant. These findings are a positive signal in terms of soil conservation and sustainability from the perspective of potential intensification of forage-based livestock systems. These results, that correspond to two years (2019/2020 and 2020/2021), suggest that this could be a dynamic process, with recovery cycles [7], where physical and biological restorative processes may mitigate near surface soil impacts [9,19]. In future works, longer term monitoring of changes in soil penetration resistance may be required [9].

The spatial variability in the CI found in this study (CV of 22 to 41%; Table 1) combined with the variability in the soil profile (depths of 0–10; 10–20; 20–30; and 0–30 cm; Figure 2), are similar to those found in a study with cows, in a nearby plot and with very similar characteristics [7]. The scale of magnitude of these CVs shows that the measurement of CI value is influenced by the management system, in addition to the soil intrinsic factors (e.g., soil structure, texture, and moisture) [20]. The spatial pattern of CI at different depths is presented in Figure 3.

The multiple comparisons showed significant differences ($p = 0.000$) in CI values between depths, with lower CI values at 0-10 cm depth compared to the other two soil layers considered (10-20 or 20-30 cm). This pattern is different from that registered in other study of animal trampling for the same soil type but carried out with cattle grazing [7], where the highest compaction was recorded in the 10-20 cm soil layer. In this same study, livestock trampling effect was significant at a depth of 0-10 cm. In general, studies report that the highest animal trampling impact occurs at the topsoil layer [9,15,19]. The CI pattern registered in this study justifies replicating this study of trampling monitoring in other soil types.

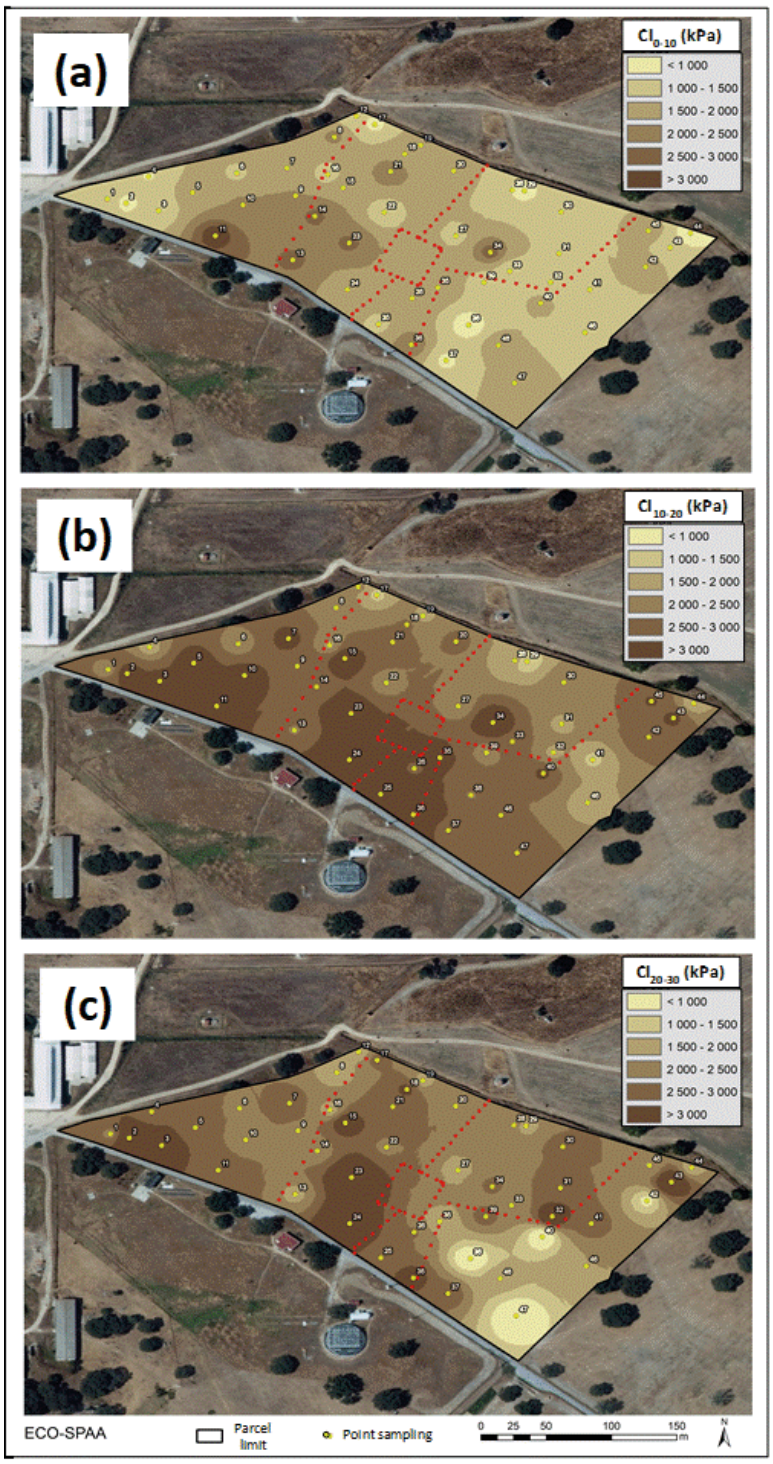


Figure 3. Cone index maps at different depths: (**a**) 0–10 cm; (**b**) 10–20 cm; (**c**) 20–30 cm.

These results show that soil physical parameters, namely soil compaction, are needed to provide improved practical tools for farmers [21]. These tools are particularly important to enhance the ability to make informed and economically viable decisions for management options [21]. An approach that uses monitoring tools to support decisions in complex and dynamic systems exposed to changing conditions, as is the case of the Montado ecosystem, should be used in the future to guide and aid farmers' decision-making process [22]. Although statistically not significant, the systematic tendency observed at all depths evaluated in this study towards

greater CI in plots subjected to DG, suggests that future works of longer duration to evaluate compaction/recovery cycles, should also consider the trend towards increased intensification of extensive livestock production, based on electric and mobile fences, with a stocking rates of up to three times higher than in CG systems (approximately 1 UA, per hectare, corresponding to approximately 6-7 sheep.ha^{-1}).

Since sheep exhibit highly selective grazing, CG is said to be responsible for degradation of vegetation and soils and declines in productivity and biodiversity [23]. In contrast, DG can be used as a tool to improve pasture resilience, livestock performance, pasture quality and profitability at a farm scale, when considering a typical spring surplus [24]. Dynamic grazing systems, that combine DG with flexible stocking rate based on changing rainfall conditions, are fundamental for achieving sustainable outcomes [24]. Nevertheless, long term studies are required [23] to quantify responses of different pasture types in variable climatic scenarios and, mainly, whole-farm analysis to integrate the multiple impacts of DG on the farm system, which include the positive impacts on the pasture performance after the deferred period, and the negative impact on pasture growth and nutritive value during the deferred period [25]. These studies should also include the measurement of parameters indicating change in ecosystem function, resilience, and ecological services [24].

Recent studies show the potential of the Montado to provide a range of ecosystem services. Guimarães et al. [26] go further and propose a results-based model implemented under Common Agricultural Policy and based on specific environmental results, namely, a healthy and functional soil ecosystem and a biodiverse native Mediterranean pasture. For example, soil degradation is identified as an important problem in the Montado, where animal grazing activity impacts soil health and its productivity through trampling [26]. It is in this framework that expedient technologies such as the electronic cone penetrometer, the soil electrical conductivity meter, satellite imagery and others will become indispensable monitoring tools for the quantification of payments to farmers and for the follow-up by public authorities and policy makers.

4. Conclusions

The results of soil resistance measurements (CI) in this study showed no significant differences between CG and DG in all depths evaluated (0–10, 10–20, and 20–30 cm). These findings are encouraging not only from the perspective of sustainability, but also reveal good prospects for the intensification of extensive forage-based livestock systems.

In future works, decision support tools should evaluate the long-term impact on soil compaction of grazing management systems with appropriate sheep stocking rates and recovery periods and should consider at the same time the system's productivity indicators.

References

1. Psyllos, G.; Hadjigeorgiou, I.; Dimitrakopoulos, P.G.; Kizos, T. Grazing land productivity, floral diversity, and management in a semi-arid Mediterranean landscape. *Sustainability* **2022**, *14*, 4623.
2. Efe Serrano, J. *Pastures in Alentejo: Technical Basis for Characterization, Grazing and Improvement*; Universidade de Évora—ICAM: Évora, Portugal, 2006; pp. 165–178. (In Portuguese)
3. Bégué, A.; Arvor, D.; Bellon, B.; Betbeder, J.; De Abelleyra, D.; Ferraz, R.; Lebourgeois, V.; Lelong, C.; Simões, M.; Verón, S.R. Remote sensing and cropping practices: A review. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 99.
4. Ferreira, P.M.A.; Andrade, B.O.; Podgaiski, L.R.; Dias, A.C.; Pillar, V.D.; Overbeck, G.E.; Mendonça, M.S., Jr.; Boldrini, I.I. Long-term ecological research in southern Brazil grasslands: Effects of grazing exclusion and deferred grazing on plant and arthropod communities. *PLoS ONE* **2020**, *15*, e0227706.
5. Tozer, K.N.; Muller, K.; Craven, T.; Tarbotton, I.; Coster, A.; Burke, R.; Sherlock, J.; Cameron, C. Effect of deferred grazing during late spring and summer on pasture productivity in Waikato and Bay of Plenty hill country. *J. N. Z. Grassl.* **2020**, *82*, 111–119.

6. Carreira, E.; Serrano, J.; Gomes, C.J.P.; Shahidian, S.; Paniagua, L.L.; Pilirito, A.; Castro, J.; Carvalho, M.; Pereira, A.F. Effect of sheep grazing, stocking rates and dolomitic limestone application on the floristic composition of a permanent dryland pasture, in the montado agroforestry system of Southern Portugal. *Animals* **2022**, *12*, 2506.
7. Serrano, J.; Marques, J.; Shahidian, S.; Carreira, E.; Marques da Silva, J.; Paixão, L.; Paniagua, L.L.; Moral, F.; Ferraz de Oliveira, I.; Sales-Baptista, E. Sensing and mapping the effects of cow trampling on the soil compaction of the montado Mediterranean ecosystem. *Sensors* **2023**, *23*, 888.
8. Reichert, J.M.; Suzuki, L.E.; Reinert, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos Ci. Solo* **2007**, *5*, 49–134. (In Portuguese)
9. Mayerfeld, D.; Kruger, E.; Gildersleeve, R.; Rickenbach, M. Impacts of different grazing approaches on woodland ecosystem properties. *Agrofor. Syst*. **2022**, *96*, 527–540.
10. Pentos, K.; Pieczarka, K.; Serwata, K. The relationship between soil electrical parameters and compaction of sandy clay loam soil. *Agriculture* **2021**, *11*, 114.
11. FAO. *World Reference Base for Soil Resources; Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Soil Resources Reports N 103*; FAO: Rome, Italy, 2006.
12. Serrano, J.; Shahidian, S.; Marques da Silva, J.; Sales-Baptista, E.; Ferraz de Oliveira, I.; Lopes de Castro, J.; Pereira, A.; Cancela de Abreu, M.; Machado, E.; Carvalho, M. Tree influence on soil and pasture: Contribution of proximal sensing to pasture productivity and quality estimation in montado ecosystems. *Int. J. Remote Sens*. **2018**, *39*, 4801–4829.
13. Peel, M.C.; Finlayson, B.L.; McMahon, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2007**, *11*, 1633–1644.
14. Teague, R.; Proenza, F.; Norton, B.; Steffens, T.; Barnes, M.; Kothmann, M.; Roath, R. Benefits of multi-paddock grazing management on rangelands: Limitations of experimental grazing research and knowledge gaps. In *Grassland Ecology, Management and Restoration*; Schroder, H.G., Ed.; Nova Science Publishers, Inc.: Hauppauge, NY, USA, 2008; Cap. 1; pp. 41–80.
15. Donkor, N.T.; Gedir, J.V.; Hudson, R.J.; Bork, E.W.; Chanasyk, D.S.; Naeth, M.A. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Can. J. Soil Sci.* **2002**, *82*, 1–8.
16. Roesch, A.; Weisskopf, P.; Oberholzer, H.; Valsangiacomo, A.; Nemecek, T. An approach for describing the effects of grazing on soil quality in life-cycle assessment. *Sustainability* **2019**, *11*, 4870.
17. Serrano, J.; Shahidian, S.; Costa, F.; Carreira, E.; Pereira, A.; Carvalho, M. Can soil pH correction reduce the animal supplementation needs in the critical autumn period in Mediterranean Montado ecosystem? *Agronomy* **2021**, *11*, 514.
18. Nawaz, M.F.; Bourrié, G.; Trolard, F. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev*. **2013**, *33*, 291–309.
19. Sharrow, S. Soil compaction by grazing livestock in silvopastures as evidenced by changes in soil physical properties. *Agrofor. Syst*. **2007**, *71*, 215–223.
20. Pias, O.H.C.; Cherubin, M.R.; Basso, C.J.; Santi, A.L.; Molin, J.P.; Bayer, C. Soil penetration resistance mapping quality: Effect of the number of subsamples. *Acta Sci.* **2018**, *40*, e34989.
21. Drewry, J.J.; Cameron, K.C.; Buchan, G.D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—A review. *Aust. J. Soil Res*. **2008**, *46*, 237–256.
22. Jaurena, M.; Durante, M.; Devincenzi, T.; Savian, J.V.; Bendersky, D.; Moojen, F.G.; Pereira, M.; Soca, P.; Quadros, F.L.F.; Pizzio, R.; et al. Native grasslands at the core: A new paradigm of intensification for the campos of Southern South America to increase economic and environmental sustainability. *Front. Sustain. Food Syst.* **2021**, *5*, 547834.
23. Glindemann, T.; Wang, C.; Tas, B.M.; Schiborra, A.; Gierus, M.; Taube, F.; Susenbeth, A. Impact of grazing intensity on herbage intake, composition, and digestibility and on live weight gain of sheep on the Inner Mongolian steppe. *Livest. Sci.* **2009**, *124*, 142–147.
24. Ma, L.; Yuan, F.; Liang, H.; Rong, Y. The effects of grazing management strategies on the vegetation, diet quality, intake and performance of free grazing sheep. *Livest. Sci*. **2014**, *161*, 185–192.
25. Tozer, K.N.; Howarth, S.M.; Sherlock, J.; Tarbotto, I.S. Impact of Deferred Grazing on Profitability of a Hill Country Farm in North-western Waikato. In Proceedings of the Resilient Pastures Symposium, Lake Karapiro, Waikato, New Zealand, 11–12 May 2021; Grassland Research and Practice Series; New Zealand Grassland Association: Dunedin New Zealand, 2021; Volume 17, pp. 393–400.
26. Guimarães, M.H.; Pinto-Correia, T.; Costa Freitas, M.B.; Ferraz-de-Oliveira, I.; Sales--25Baptista, E.; Ferragolo da Veiga, J.F.; Tiago Marques, J.; Pinto-Cruz, C.; Godinho, C.; Belo, A.D.F. Farming for nature in the Montado: The application of ecosystem services in a results-based model. *Ecosyst. Serv.* **2023**, *61*, 101524.

Riego de pomelo con agua marina desalinizada: efectos fisiológicos, agronómicos y económicos a corto plazo

A. Imbernón-Mulero[1], J.F. Maestre-Valero[1], B. Gallego-Elvira[1], V. Martínez-Alvarez[1], S. Ben-Abdallah[1], J. Navarro[2]; J.M. Robles[2]; P. Botía[2]

[1] Departamento de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 48. 30203, Cartagena, España. alberto.imbernon@edu.upct.es; josef.maestre@upct.es; victoriano.martinez@upct.es; belen.gallego@upct.es; saker.benabdallah@upct.es

[2] Equipo de Riego y Fisiología del Estrés, Departamento de Bioeconomía, Agua y Medio Ambiente, Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA), c/Mayor s/n, 30150 La Alberca, Murcia, España; josefam.navarro2@carm.es; juanm.robles@carm.es; pablo.botia@carm.es

Abstract: The scarcity of water resources for irrigation in arid and semiarid areas like the southeastern of Spain has encouraged the use of non-conventional water resources, among which desalinated seawater (DSW) has become the most promising to alleviate water shortage. However, its complementary use in agriculture irrigation has some pros and cons that must be considered. In this study, the agro-physiological response of a grapefruit citrus orchard to DSW irrigation was evaluated during three consecutive years. Several differences were found when comparing the water quality of DSW with fresh water conventional resource. Moreover, the study determined the possible risk of soil sodicity, the non-significative differences on leaf water relations and the high accumulation of boron in leaves derived from DSW irrigation. In addition, an economic assessment allowed to evaluate the profitability of totally or partially implement this resource to irrigate citrus crops, considering the cost of water and fertilizer and the incomes from selling the fruit. The results provide guidance for the use and management of DSW in water scarce areas.

Palabras clave: recursos hídricos no convencionales, manejo del riego, sodicidad del suelo, acumulación de boro, productividad.

1. Introducción

En las últimas décadas, la disponibilidad de agua se ha visto reducida principalmente por el incremento de la demanda de alimentos y los efectos del cambio climático. Esta generalizada escasez de recursos hídricos puede poner en riesgo la sostenibilidad de la agricultura de regadío, especialmente en zonas áridas y semiáridas, y, por tanto, la seguridad alimentaria y el crecimiento económico de una región [1].

En este contexto, la agricultura de regadío requiere no solo una modernización tecnológica sino también la exploración de nuevas fuentes de agua que permitan sostener su demanda y actual sobreuso [2].

Los recursos hídricos no convencionales como el agua regenerada y el agua marina desalinizada (AMD) se han convertido en una prometedora opción para asegurar la sostenibilidad del riego en regiones con escasez hídrica. En concreto, el sureste de España ha apostado desde 2005 por la producción de AMD como medio para impulsar el desarrollo socioeconómico y la producción de alimentos y aliviar la presión sobre otros recursos hídricos superficiales y subterráneos. Adicionalmente, y como consecuencia de su reducida salinidad, el AMD puede mejorar la producción agrícola cuando se utiliza para complementar o reemplazar

otros recursos hídricos marginales de baja calidad. A pesar de estas notables ventajas, el AMD presenta principalmente tres inconvenientes [3]:

(i) la producción de AMD requiere un considerable consumo energético que da lugar a un coste de suministro de agua elevado respecto a otros recursos hídricos (entre 0,6 y 1,1 €/m^3).

(ii) el AMD posee una composición química peculiar, con una baja concentración de nutrientes esenciales (calcio, magnesio y sulfato) que obliga a los agricultores a adaptar los programas de fertilización para prevenir una disminución de la productividad.

(iii) el AMD suele presentar elevadas concentraciones de cloro, sodio y especialmente boro (B), que puede provocar efectos fitotóxicos y reducir la productividad en cultivos especialmente sensibles; por ejemplo, los cultivos leñosos presentan bajos umbrales de fitotoxicidad por boro (0,5-0,7 mg/L en el agua de riego), mientras que los hortícolas son mucho más tolerantes (1,0-4,0 mg/L) [4].

En España, la concentración de boro en el AMD empleada en el riego se ha situado de forma habitual en torno a 1 mg/L, límite establecido por extensión del máximo valor permitido en AMD destinada al consumo humano (Real Decreto 140/2003). Sin embargo, la actual normativa vigente (Real Decreto 3/2023) permite producir AMD con una concentración de boro mayor (1,5 mg/L), lo que puede perjudicar aún más la continuidad de los cultivos más sensibles.

Las consecuencias económicas de la implementación de AMD para el riego agrícola se han evaluado previamente [3]. Sin embargo, los estudios del impacto fisiológico y agronómico de su uso en el riego son realmente escasos. Maestre-Valero et al. [5] estudió el efecto a corto plazo del riego con AMD en un cultivo de mandarina, mostrando efectos no significativos relacionados con la respuesta fitotóxica al boro. Estos resultados fueron atribuidos a la corta edad de los árboles (4-5 años). Recientemente, Vera et al. [6] ha mostrado efectos relevantes al regar durante tres años árboles de limón y albaricoque con AMD. Ambos cultivos leñosos acumularon elevadas concentraciones de boro en las hojas y disminuyeron sensiblemente su fotosíntesis y conductancia estomática. Por otro lado, también han observado como este recurso es capaz de incrementar la presencia del microbioma del suelo, un aspecto de gran interés en zonas con suelos empobrecidos y deteriorados. No obstante, Navarro et al. [7] han demostrado, en condiciones controladas en cámara, la existencia de diferentes mecanismos dependientes del rizoma que permiten a los cítricos resistir los efectos del riego con AMD, los cuales parecen estar relacionados con características tales como la edad del cultivo, la concentración de los sólidos totales disueltos y de la temperatura del agua de riego, entre otros. No obstante, este hecho también dificulta las comparaciones entre diferentes estudios. La respuesta a largo plazo de los cultivos hortícolas y leñosos al riego con AMD aún no ha sido evaluada.

En este contexto, este estudio muestra los primeros resultados de la evaluación fisiológica, agronómica y económica del riego con AMD de un cultivo de pomelo durante tres años consecutivos, centrándose en los efectos sobre las concentraciones de minerales en las hojas, el crecimiento vegetativo, la salinidad y sodicidad del suelo, y la productividad del cultivo. Adicionalmente, se realizó una evaluación económica enfocada principalmente en el tipo de agua de riego y el consumo de fertilizantes.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

El ensayo experimental se realizó en una finca comercial localizada en Torre Pacheco, Murcia, entre junio de 2019 y diciembre de 2022. El área se caracteriza por un clima semiárido, con veranos secos e inviernos suaves, con precipitaciones y evapotranspiraciones medias de 300 y 1400 mm, respectivamente. El cultivo consistió en 0,28 ha de pomelo (144 árboles de *Citrus x*

paradisi, var. Río Rojo) injertados en un patrón de *Citrus macrophylla* de 5 años de edad al inicio del ensayo. La especie fue escogida por el gran peso del sector citrícola en el sureste español, así como por su especial sensibilidad a los excesos de boro.

En el estudio se emplearon dos fuentes de agua: (i) AMD proveniente de la planta desaladora de Escombreras (Cartagena, España) y (ii) agua proveniente del Trasvase Tajo-Segura (CR). Ambos recursos fueron empleados de forma independiente y como mezcla a igual proporción (AM = 50% AMD + 50% CR). Además, con el fin de evaluar los efectos de concentraciones elevadas, medias y bajas de boro en el agua de riego, un sistema de ósmosis inversa (OI) descrito en Imbernón-Mulero et al. [8] fue empleado para reducir el B^{3+} en el AMD hasta valores entre 0,2 y 0,4 mg/L (AMD-B). De esta forma, las 0,28 ha se dividieron en cuatro bloques de 36 árboles, asignando a cada uno un tratamiento de riego (AMD, AM, CR o AMD-B). La Tabla 1 muestra su composición química.

Tabla 1. Precio y composición físico-química de los recursos hídricos empleados durante el ensayo experimental.

Agua de riego	Precio (€/m³)	pH	CE (dS/m)	Cl^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	B^{3+}
								(mg/L)				
AMD	0,60–1,10	8,3 ± 0,2	1,0 ± 0,1	315,9 ± 63,7	2,6 ± 1,0	2,9 ± 2,0	0,00	8,2 ± 0,8	35,1 ± 12,4	12,5 ± 8,0	190,2 ± 38,5	0,92 ± 0,17
AM	0,48–0,73	8,0 ± 0,1	1,2 ± 0,2	261,5 14,9	4,1 ± 0,9	2,9 ± 2,0	0,00	7,2 ± 0,8	49,4 ± 15,1	20,8 ± 8,9	154,5 ± 18,6	0,69 ± 0,19
CR	0,35	7,7 ± 0,2	1,4 ± 0,2	187,0 ± 38,5	5,4 ± 1,7	3,8 ± 1,2	0,00	6,4 ± 2,4	63,5 ± 12,8	32,2 + 9,2	117,9 ± 27,9	0,44 ± 0,13
AMD-B	0,93–1,43	9,5 ± 0,1	0,2 ± 0,1	7,5 ± 6,7	1,8 ± 1,3	1,7 ± 0,9	0,00	1,8 ± 1,8	4,9 ± 5,2	4,4 ± 2,7	2,0 ± 2,0	0,32 ± 0,08

La dosis de riego se calculó en base a la demanda evapotranspirativa del cultivo (ET_c), a partir de los datos de evapotranspiración de referencia (ET_0) obtenidos por una estación meteorológica cercana a la finca, perteneciente al *Servicio de Información Agraria de la Región de Murcia* (SIAM; estación CA-42). Por otro lado, todos los tratamientos recibieron la misma cantidad de fertilizantes, aplicados mediante fertirriego (N, P_2O_5; K_2O, CaO, MgO, Cu, Fe; Tabla 2). Esto permitió analizar los posibles efectos de la implementación del AMD en el riego, los cuales podrían verse ensombrecidos si se ajusta el aporte nutritivo en base a la composición química de cada tipo de agua. Durante el ensayo experimental se emplearon fertilizantes complejos (N–P–K + Ca + Mg), aplicados de forma habitual por los agricultores de la zona: Novatec Fluid (7.5–2,5–6,8; 4,6–2,3–6,9), Brotolim primavera (10–2–5 + 3,5 CaO + 1,5 MgO), Brotolim engorde (8–2–6 + 2,5 CaO), Brotolim eco (8,2–0–0) SoluBlack H-87 (1,2–0,9–8 + 3,6 CaO + 0,2 MgO), quelato de hierro y bioestimulantes con micronutrientes, entre otros.

Tabla 2. Requerimientos nutricionales de la especie *Citrus x paradisi* (var. Rio Rojo).

Año	N (kg/ha y año)	P_2O_5 (kg/ha y año)	K_2O (kg/ha y año)	CaO (kg/ha y año)	MgO (kg/ha y año)	Cu (kg/ha y año)	Fe (kg/ha y año)
2019*	22.64	7.31	21.30	0.00	0.00	0.00	0.49
2020	41.71	7.32	18.66	12.06	5.17	0.00	0.41
2021	46.46	1.87	20.91	14.71	6.57	0.39	1.51
2022	144.92	17.04	79.55	41.66	9.16	0.64	2.08

*Nótese que en 2019 solo fueron considerados los requerimientos desde junio hasta diciembre.

2.2. Determinaciones fisiológicas, agronómicas y económicas

Las diferentes aguas de riego se caracterizaron mensualmente desde el inicio del ensayo experimental, mediante la determinación del pH, la concentración de aniones y cationes (Na^+, K^+, $NH4^+$, Ca^{2+} and Mg^{2+}, Cl^-, NO_3^-, PO_4^{3-} y SO_4^{2-}; mg/L), el contenido de microelementos (B, Mn, Zn, Cu y Fe; µg/L), la conductividad eléctrica (CE_a; dS/m) y la relación de absorción de sodio (RAS_a; meq/L). Por otro lado, se tomaron tres muestras de suelo de cada tratamiento de riego a 0–25 cm

y 25–50 cm de profundidad y a 30 cm del gotero, tres veces al año (febrero, junio y octubre). De cada muestra de suelo se determinó el pH, el contenido de iones solubles (Na^+, K^+, $NH4^+$, Ca^{2+} and Mg^{2+}, Cl^-, NO_3^-, PO_4^{3-} y SO_4^{2-}), el contenido de microelementos (B, Mn, Zn, Cu y Fe), la CE_e y la RAS_e.

Para el estudio fisiológico se estudiaron fundamentalmente los siguientes parámetros: (i) el potencial hídrico del tallo (Ψ_{tallo}) y potencial hídrico de la hoja madura (Ψ_{hoja}) y el potencial osmótico de la hoja de brotación de primavera (Π); (ii) el contenido nutrientes en hojas maduras y de brotación de primavera, especialmente boro; y (iii) la cosecha y calidad de fruta, evaluando el número de frutos por árbol, el rendimiento en kg totales por árbol y el peso de los frutos en cada tratamiento de riego.

Finalmente, se realizó un análisis económico mediante el cálculo de la diferencia entre los ingresos de cada campaña derivados de la venta de la fruta (0,27 €/kg) y el coste de fertirriego, que incluye el coste del agua de riego requerida para cada tratamiento y el coste de fertilizantes; Resultado económico (RE).

3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación agronómica y fisiológica

La Tabla 1 muestra la calidad de las aguas de riego empleadas, entre las que se observaron notables diferencias. Especialmente destacable fue la disminución de la CE_a a medida que aumentó la proporción de AMD, mínima en el caso del tratamiento AMD-B debido al proceso de OI. No obstante, este último tratamiento también presentó el valor de pH más elevado (pH = 9,5) relacionado con la adición de hidróxido sódico (NaOH) durante el proceso de OI, necesaria para disminuir la concentración de boro por debajo de 0,4 mg/L a presiones de trabajo relativamente bajas (≈ 9 bar). Considerando la relación entre la CE_a y la RAS_a, los resultados indicaron que el riego con AMD, AM y AMD-B podría derivar en un cierto riesgo de sodicidad en el suelo, el cual podría hasta cierto punto corregirse mediante la adición de Ca^{2+} y Mg^{2+} para desplazar al Na^+ del complejo de intercambio del suelo. Dicha adición puede ser de hecho necesaria, puesto que los tratamientos AMD y AMD-B presentan escasas concentraciones de ambos iones, debido de nuevo a los procesos de OI a nivel de finca y en planta desaladora. En general, los resultados indican que la monitorización del agua y suelo es crucial para evitar posibles problemas derivados del Na^+ y Cl^- (colapso estructural, erosión o compactación, entre otros), especialmente si emplea AMD como único recurso de riego [5].

Uno de los aspectos de mayor trascendencia es el posible efecto fitotóxico del boro. La concentración de boro en el suelo fue superior en el caso del AMD, a consecuencia de la mayor presencia de dicho elemento en el agua de riego (Tabla 1). Posteriormente, a medida que la proporción de AMD bruta fue disminuyendo, menor fue la concentración de boro (AM > CR > AMD-B) tanto en el agua de riego como en el suelo durante los tres años consecutivos (datos no mostrados).

Esta tendencia también se observó en la medición de boro en hojas viejas y de brotación de primavera (Figura 1a). En 2019 y 2020 la concentración de boro en las hojas viejas aumentó significativamente en verano (200-250 mg/kg) y comenzó a disminuir de forma progresiva en otoño (< 180 mg/kg). El gran incremento de boro pudo estar relacionado con el aumento del aporte de agua en los meses de mayor demanda evapotranspirativa y con la mayor presencia de dicho elemento en el agua de riego. Por otro lado, su disminución en los meses de otoño se relacionó con la reducción del riego y la generación de nueva masa foliar por la brotación de finales de verano, provocando una menor presencia de boro en promedio en las hojas más viejas [9].

En las hojas de brotación de primavera, su concentración aumentó desde 50 mg/kg a mediados de primavera hasta 200 mg/kg a principios de invierno (Figura 1b), pero varió de forma

significativa en función del tratamiento de riego, acorde a la concentración de cada tipo de agua. No obstante, y a pesar de estas elevadas concentraciones, los árboles no mostraron signos de fitotoxicidad, presumiblemente por su corta edad (3 años) y por el gran vigor adquirido gracias al patrón de *Citrus macrophylla* (8 años en 2022). Es por tanto de esperar que dichos efectos sean observados en años sucesivos a medida que aumente la presencia de boro en el suelo y en la planta, ya que los efectos fitotóxicos pueden aparecer especialmente al alcanzar concentraciones de boro de 300 mg/kg [10].

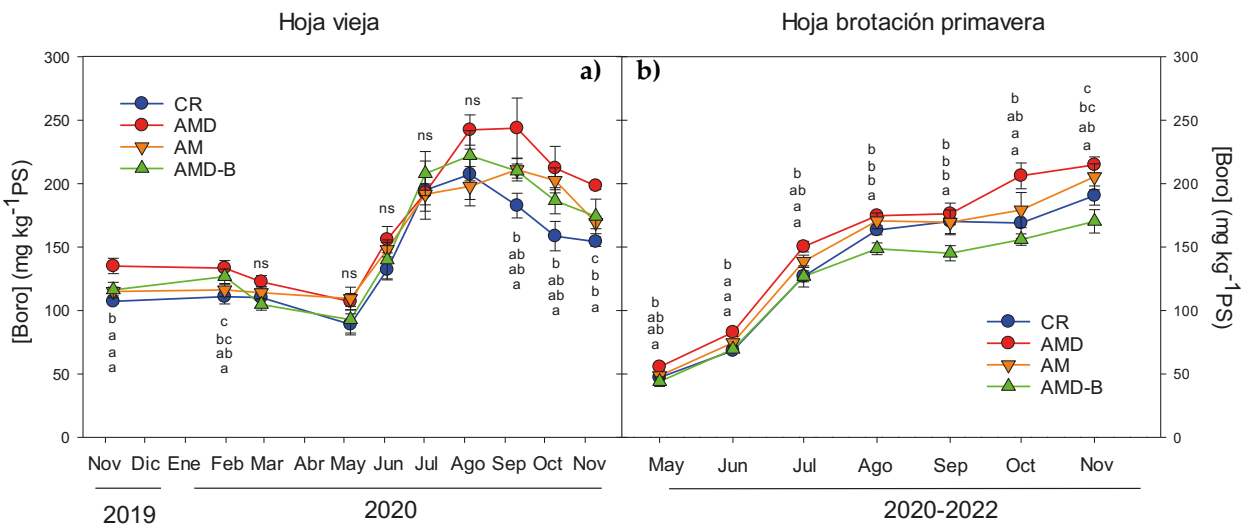


Figura 1. Evolución de la concentración de boro en hoja vieja durante el primer año de ensayo (a) y en la hoja de brotación de primavera en el periodo 2020-2022 (b). Los valores del periodo 2020-2022 mostrados representan el promedio de la concentración de boro medida el mismo mes en los tres años de estudio. Las letras *a-c* y *ns* representan diferencias significativas y no significativas entre tratamientos, respectivamente, según la prueba HSD de Tukey ($p \leq 0,05$).

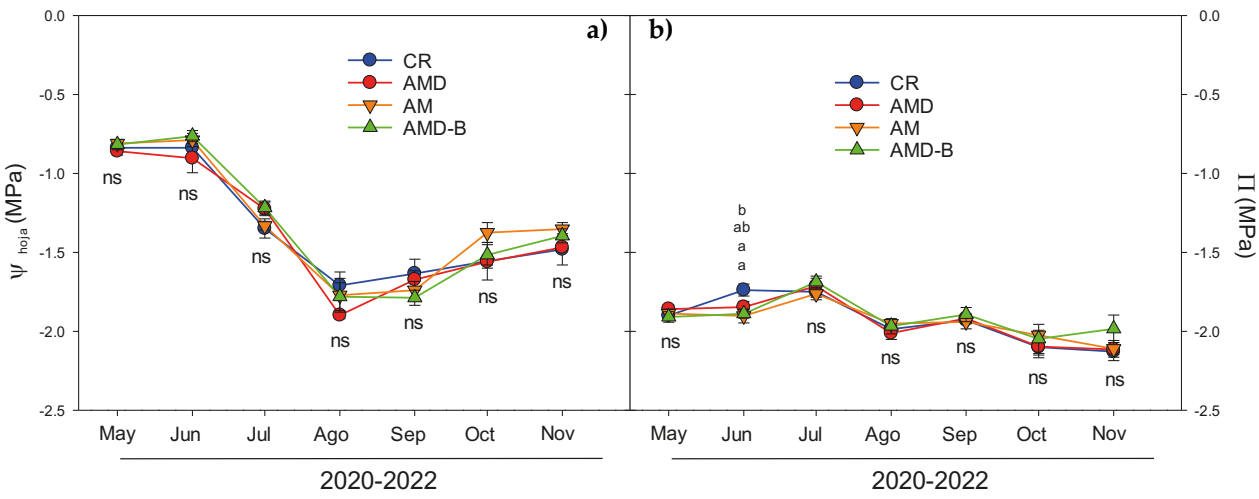


Figura 2. Evolución del potencial hídrico de la hoja (Ψ_{hoja}) y el potencial osmótico en la hoja de brotación de primavera (Π) en el periodo 2020-2022. Los valores del periodo 2020-2022 mostrados representan el promedio de la concentración de boro medida el mismo mes en los tres años de estudio. Las letras *a-c* y *ns* representan diferencias significativas y no significativas entre tratamientos, respectivamente, según la prueba HSD de Tukey ($p \leq 0,05$).

Respecto a otros parámetros fisiológicos, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos en los potenciales hídricos y osmóticos (Figura 2a; b), así como en la productividad. La producción media de los árboles se situó en torno a 70-80 kg/árbol en 2021 (2 años de edad) y

97-104 kg/árbol en 2022 (3 años de edad), valores normales acorde a la edad y características agro-fisiológicas de los árboles.

3.2. Evaluación económica

El riego con AMD resultó 2,4 veces más costoso comparado con el tratamiento CR (Figura 3), debido la gran diferencia en el precio del agua (Tabla 1). Además, la reducción de boro mediante el proceso de OI incrementó el coste de riego cerca del 40% respecto al tratamiento AMD. Por otro lado, puesto que no se realizó un ajuste del aporte en función del contenido nutricional de cada agua de riego para evaluar el efecto real del riego con diferentes recursos hídricos, el coste de fertilizante fue idéntico en los cuatro tratamientos. No obstante, un aspecto destacable entorno a la fertilización es la acelerada variación de los precios de los fertilizantes, que se han visto duplicados en los últimos dos años y que se espera continúen aumentando progresivamente. Esto puede perjudicar la rentabilidad de los cultivos, especialmente al incorporar aguas con un precio elevado, como el AMD (Tabla 1).

Desde su injerto en 2019, el árbol permaneció improductivo hasta enero de 2022, fecha de la primera recolección. Sin embargo, y a pesar de las diferencias en el coste del agua de riego entre tratamientos, no se observaron diferencias significativas en el RE de los años 2021 y 2022, debido principalmente a la gran variabilidad en la cosecha.

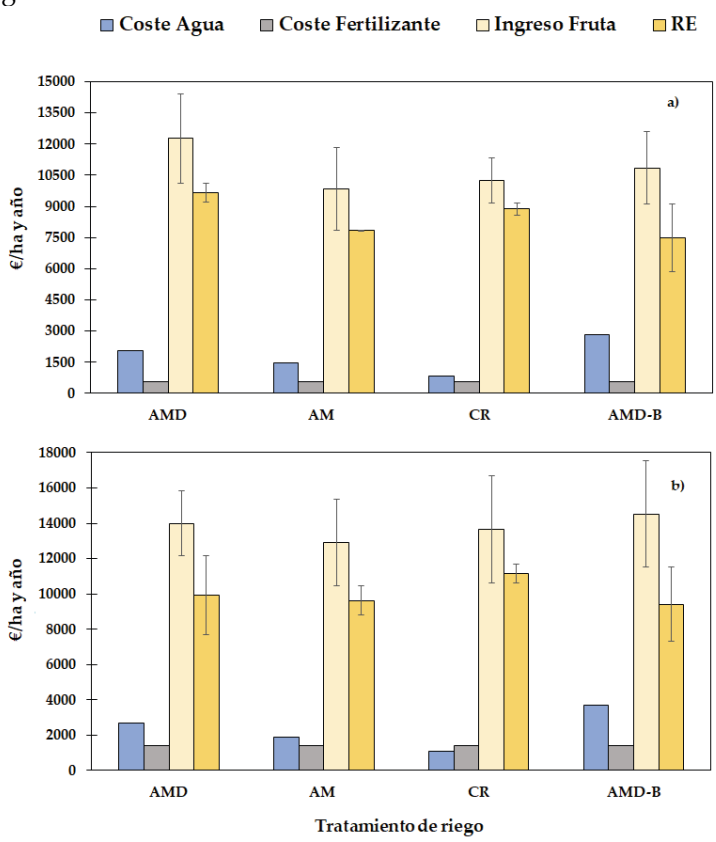


Figura 3. Análisis económico de los cuatro tratamientos de riego en 2021 (a) y 2022 (b). RE. representa el margen bruto obtenido como la diferencia entre los ingresos y el coste de fertirriego.

4. Conclusiones

Este estudio ha evaluado los efectos agronómicos, fisiológicos y económicos del riego con agua maría desalinizada (AMD) durante tres años (2019-2022) en un cultivo joven de pomelo. Los resultados han mostrado que la continua caracterización del agua de riego y del suelo es vital para evitar posibles efectos adversos sobre los cultivos especialmente sensibles como los leñosos. El riego con AMD puede provocar la carencia de determinados elementos como el calcio o el magnesio si la fertilización no se ajusta correctamente. Además, el AMD puede dar lugar a eventos de sodicidad de suelo, así como a elevadas acumulaciones de boro en el suelo y en las hojas, capaces de producir una respuesta fitotóxica en la planta y una reducción de sus principales actividades fisiológicas. No obstante, y a pesar de las elevadas acumulaciones de boro y otros elementos en el suelo y en las hojas, los árboles han mostrado únicamente signos puntuales de fitotoxicidad y de aumentos de potenciales hídricos de tallo y hoja. Desde el punto de vista económico, y a pesar de que el coste del riego con AMD duplica el coste de los recursos convencionales disponibles en la zona, no se ha observado una diferencia significativa en el resultado del estudio económico, debido principalmente a la gran variabilidad de la productividad entre tratamientos.

Se debe resaltar que estos efectos pueden agravarse al alcanzar la edad adulta, a medida que las acumulaciones de boro, sodio y cloro sean mayores en el suelo y en la planta, perjudicando su normal comportamiento. Estos resultados permiten proporcionar una guía para el uso y manejo del AMD en áreas con escasez de recursos hídricos y habituadas a realizar mezclas de agua para el riego. No obstante, se requieren estudios que evalúen las respuestas fisiológicas y agronómicas a largo plazo para determinar las posibles consecuencias del riego con AMD en cultivos cítricos y leñosos.

5. Agradecimientos

La investigación y la APC han sido financiadas por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033, España) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER, UE) en el marco de los proyectos SEARRISOST (RTC-2017- 6192-2) y SEA4CROP (PID2020-118492RA-C22). Adicionalmente, este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT / ThinInAzul que ha sido financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia. Imbernón-Mulero agradece el apoyo a su trabajo de doctorado al proyecto SEA4CROP y al programa predoctoral de la Universidad Politécnica de Cartagena (RV-484/21, UPCT, España). B. Gallego-Elvira agradece el apoyo del Ministerio de Universidades de España (Beca "Beatriz Galindo" BEAGAL18/00081). Se agradece la colaboración de Cátedra Trasvase y Sostenibilidad—Jose Manuel Claver.

Referencias

45. Martinez-Mate, M.A., Martin-Gorriz, B., Martínez-Alvarez, V., Soto-García, M., Maestre-Valero, J.F. Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: Energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. J. Clean. Prod. 2019. 172, 1298-1310.
46. Pellicer-Martinez, F., Martínez-Paz, J.M. Climate change effects on the hydrology of the headwaters of the Tagus River: Implications for the management of the Tagus-Segura transfer. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2018. 22 (12), 6473–6491.
47. Martínez-Alvarez, V., Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Soto-García, M., Maestre-Valero, J.F. Multidisciplinary assessment of the agricultural supply of desalinated seawater in south-eastern Spain. Desalination. 2023. 548, 116252.
48. Mass, E.V. Crop Salt Tolerance, in: K.K. Tanji (Ed.). Salinity Assessment and Management, Amer. Society of Civil Engineers, 1990, New York.

49. Maestre-Valero, J.F., Martínez-Álvarez, V., Jódar-Conesa, F.J., Acosta, J.A., Martin-Gorriz, B., Robles, J.M., Pérez-Pérez, J.G., Navarro, J.M. Short-Term Response of Young Mandarin Trees to Desalinated Seawater Irrigation. Water. 2020. 12 (1), 159.
50. Vera, A., Moreno, J.L., García, C., Nicolás, E., Bastida, F. Agro-physiological and soil microbial responses to desalinated seawater irrigation in two crops. Ecotoxicol. Environ. Saf. 2023. 250, 114507.
51. Navarro, J.M., Antolinos, V., Robles, J.M., Botía, P. Citrus Irrigation With Desalinated Seawater Under a Climate Change Scenario. Front. Plant Sci. 2022. 13, 909083.
52. Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., Martin-Gorriz, B., Molina-del-Toro, R., Jodar-Conesa, F.J., Maestre-Valero, J.F. Boron Removal from Desalinated Seawater for Irrigation with an On-Farm Reverse Osmosis System in Southeastern Spain. Agronomy. 2022. 12 (3), 611.
53. Abou Seeda, M.A., Abou El-Nour E.A.A., Yassen, A.A., Hammad, S. Boron Structure, Functions and Its Interactions with Nutrients in Plan Physiology. A Review. Middle East Journal of Agriculture Research. 2021. 10 (1), 117-179.
54. Grattan, S.R., Diaz, F.J., Pedrero, F., Vivaldi, G.A., 2015. Assessing the suitability of saline wastewaters for irrigation of Citrus spp.: Emphasis on boron and specific-ion interactions. Agric. Water Manag. 157, 48–58.

Reducción de boro en agua marina desalinizada para el riego agrícola: análisis regional en el sureste español

A. Imbernón-Mulero[1], J.F. Maestre-Valero[1], S. Ben Abdallah1, V. Martínez-Alvarez[1], B. Gallego-Elvira[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 48, 30203, Cartagena, España; alberto.imbernon@edu.upct.es; josef.maestre@upct.es; saker.benabdallah@upct.es; victoriano.martinez@upct.es; belen.gallego@upct.es

Abstract: Desalinated seawater (DSW) is perceived as a reliable complementary supply of agricultural water in southeastern Spain. However, irrigation with DSW may pose an agronomic risk as current reverse osmosis permeate normally have high concentrations of boron, which can result in a possible toxicity damage risk. Therefore, boron reduction to at least 0.5 mg/L should be performed before irrigating with DSW, especially when considering sensitive crops. This study evaluates the regional economic impact of reducing boron concentration at seawater desalination plant and on-farm scale and compares two scenarios replacing traditional irrigation water resources with DSW and two boron removal technologies: reverse osmosis membranes (RO) and ion exchange resins (IX). The results showed that (i) the higher the surface area covered by vegetables the lower the boron reduction cost at on-farm scale facilities, while at seawater desalination plant scale, the boron reduction cost remains constant regardless of the crop type; and (ii) boron reduction by IX resulted notably cheaper than RO option either at coastal plant and on-farm scale. In addition, this study reinforced that the combined use of DSW with other traditional resources is the most profitable option compared to exclusively irrigate with DSW.

Palabras clave: ósmosis inversa; resina de intercambio iónico; evaluación económica; cultivos leñosos; cultivos vegetales.

1. Introducción

En el sureste español, donde los suministros de agua son escasos y variables, el riego con agua marina desalinizada (AMD) es una de las principales medidas adoptadas para paliar su carencia y garantizar la seguridad alimentaria y la estabilidad socioeconómica [1]. Las ventajas e inconvenientes del riego con AMD son ampliamente conocidas. Por un lado, su producción no está sujeta a las limitaciones hidrológicas y climatológicas; además posee una baja salinidad que puede reducir el lixiviado de sales y mejorar la productividad. Sin embargo, el AMD posee una composición química singular caracterizada por una baja concentración de elementos esenciales y una elevada presencia de iones que pueden resultar fitotóxicos, como el sodio o el boro (B). En concreto, el B en el AMD suele superar los umbrales de tolerancia de los cultivos más sensibles. Por ejemplo, la concentración máxima de boro permitida actualmente para agua de consumo en España es 1,5 mg/L; 2,4 mg/L cuando se trata de AMD (Real Decreto 3/2023). Actualmente las instalaciones desaladoras de agua de mar (IDAM) que poseen un único paso de ósmosis inversa (OI) producen AMD con una concentración de boro en torno a 1 mg/L, mientras que las que poseen dos pasos (poco usual) permiten reducir dicha concentración hasta 0,5 mg/L.

De esta forma, cuando solo se realiza un paso de OI, el permeado puede conducir a efectos negativos en cultivos sensibles, como los cítricos y otros leñosos, cuyos umbrales de fitotoxicidad

por B se sitúan entre 0,4 y 0,7 mg/L. Por tanto, la reducción de concentraciones de B potencialmente perjudiciales para estos cultivos debe ser una prioridad [2], especialmente en regiones que no disponen de otros recursos hídricos para realizar mezclas de agua para el riego [3].

La reducción de boro es técnicamente viable tanto en planta desaladora costera como en instalaciones a escala de parcela. Entre los diferentes métodos disponibles, el uso de membranas de (OI) y las resinas de intercambio iónico (RII) específicas para el boro son los más empleados [4,5]. Además, el coste económico (€/m^3 o $/m^3) de la reducción de boro mediante OI y RII en ambas escalas ha sido ampliamente estudiado [4-8]. Sin embargo, el impacto económico de reducir el boro del AMD disponible para un área de riego determinada y considerando los diferentes cultivos existentes nunca ha sido analizado.

Este estudio analiza el impacto económico regional de la reducción de boro en la Cuenca del Segura (CS); sureste de España. El estudio establece los criterios óptimos para decidir si es económicamente más recomendable reducir la concentración de boro en planta desaladora costera o en instalaciones ubicadas en parcela, en función de la tecnología empleada para la su reducción (OI o RII), diferentes escenarios de tipo de cultivo y considerando la parcial y total sustitución de las aguas tradicionales comúnmente utilizadas para el riego de cultivos en esta cuenca (agua superficial, subterránea, trasvasada y regenerada) con AMD. De esta forma, este estudio proporciona orientación sobre la gestión del AMD y su uso sostenible para el riego agrícola.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de riego y escenarios de suministro de agua

La CS es el claro ejemplo de una zona mediterránea con escasez de agua, con un déficit hídrico anual de 311 hm^3. La mayor parte de su agricultura de regadío sufre una presión extrema sobre los recursos hídricos, lo que requiere la imprescindible integración de fuentes de agua no convencionales [9].

La CS está dividida en 64 Unidades de Demanda Agrícola (UDAs), que reciben agua de diferentes orígenes y en cuya zona regable las hortalizas y cultivos leñosos ocupan más del 95% de su superficie. Algunas de estas UDAs utilizan los recursos hídricos generados dentro de la cuenca, mientras que otras (18 UDAs) son abastecidas principalmente por el Trasvase Tajo-Segura (TTS). Estas últimas sufren de continuas y progresivas reducciones de agua proveniente del TTS, que se compensan parcialmente con la incorporación de AMD. En cómputo global, las aguas superficiales (A_{Sup}) y subterráneas (A_{Sub}) aportan el 49,8% de los recursos hídricos de la cuenca, el TTS el 20,5%, el agua regenerada (AR) el 9,7% y el AMD el 20%. La fuente del agua suministrada es un factor relevante a la hora de distinguir escenarios ya que implica diferentes concentraciones de boro en el agua de riego. Teniendo en cuenta esta situación de suministro actual y los posibles cambios futuros, en el estudio se han definido tres escenarios de suministro de agua y tres UDAS que representan las combinaciones de cultivo 100% leñosos-0%hortícolas, 50% leñosos-50% hortícolas y 0% leñosos-100% hortícolas. La dotación anual de riego para cada UDA se fijó en 6000 m^3/ha:

- Escenario de riego sin AMD o de referencia (0% AMD). Representa la situación previa a la llegada del AMD y corresponde a un suministro de las diferentes fuentes de agua proporcional a las asignaciones de agua de riego reconocidas en la planificación actual riego (55,5% TTS, 0,18 €/m^3; 6,5% AR, 0,10 €/m^3; 20,6% A_{Sub}, 0,18 €/m^3; y 17,4% A_{Sup}, 0,06 €/m^3) [9].
- 50% AMD. Representa una situación cercana a la actual o a la que se espera alcanzar en el corto-medio plazo. En este caso, el 50% del agua de riego es AMD, mientras que el 50% restante proviene de todas las demás fuentes en proporción a las asignaciones

oficiales del agua de (27,7% TTS, 0,18 €/m³; 3,4% AR, 0,10 €/m³; 10,3% A_{Sub}, 0,18 €/m³; 8,6% A_{Sup}, 0,06 €/m3; y 50% AMD, 0,60 €/m³) [9].

- 100% AMD. Representa una sustitución futura hipotética en la que todos los suministros de agua de riego son reemplazados por AMD.

La Figura 1 muestra la concentración de boro y el coste específico de las aguas de riego disponibles en la cuenca y de los escenarios simulados.

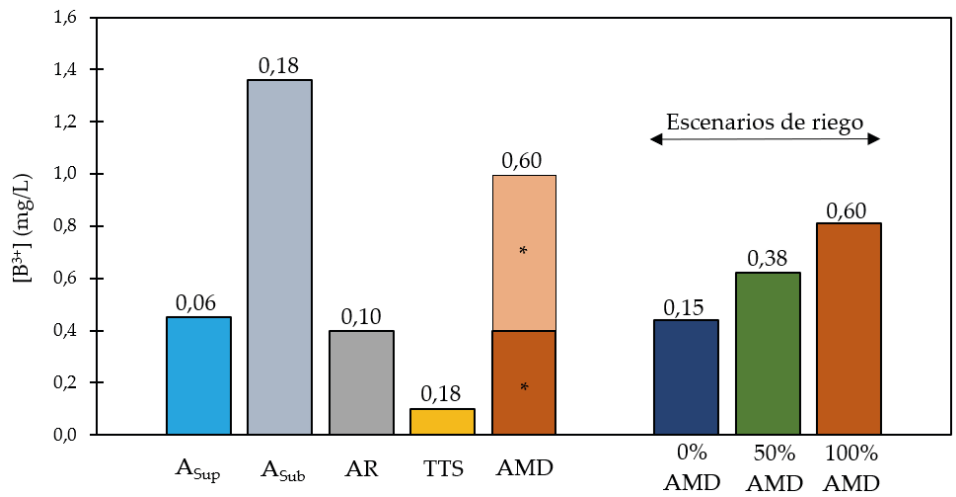


Figura 1. Concentración de boro (mg/L) y coste específico (€/m³; valor ubicado sobre cada barra) de los diferentes recursos hídricos y escenarios de suministro considerados en el estudio. *B^{3+} en IDAM con un paso de OI = 0,4-0,5 mg/L; B^{3+} en IDAM con dos pasos de OI = 0,9-1,0 mg/L.

2.2. Analisis de la reducción de boro

Para el análisis de la reducción de boro, se consideraron los siguientes supuestos:

- Se seleccionó un rango de coste de reducción entre 2 y 30 cent€/m³ para el análisis en parcela, y entre 2 y 10 cent€/m³ para el análisis en IDAM. Este rango de valores se selecciono basado en una extensa revisión bibliográfica sobre la reducción de boro por OI y RII tanto en planta costera como a escala de parcela [10].
- El umbral máximo de concentración de boro en el agua de riego antes de afectar a los cultivos fue situado en 1 mg/L para hortalizas y 0,5 mg/L para cultivos leñosos [11].
- A escala de parcela e independientemente del escenario (OI, RII, 50% y 100% AMD), el agua de riego se destinó en primer lugar al riego de hortalizas sin reducción de boro, y sólo una parte del agua restante disponible, que dependió de la superficie de cultivos leñosos, se trató para reducir la concentración de boro hasta 0,5 mg/L.
- A escala de IDAM, los agricultores reciben toda la asignación de agua con una concentración de boro reducida, de 0,5 mg/L.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de costes de la reducción de boro

Las figuras 2 y 3 muestran el coste de la reducción de boro (€/ha) mediante OI y RII, respectivamente, tanto en IDAM como a escala de parcela, para las 3 UDAs simuladas y para los escenarios de riego de 0%, 50% y 100% AMD. En IDAM, todo el AMD suministrado a los agricultores alcanzó una concentración de boro de 0,5 mg/L, por lo que el coste de la reducción de boro permaneció constante independientemente del tipo de cultivo; excepto el en escenario de

100% hortalizas, ya que la reducción de boro no es necesaria por la tolerancia de estas especies a elevadas concentraciones de boro [11]. Sin embargo, a escala de parcela, los agricultores tienen la opción de reducir el boro solo de un cierto volumen de AMD para obtener una concentración de boro de 0,5 mg/L. Así, cuanto menor es la superficie de cultivos leñosos, menor es el coste de la reducción de boro (Tabla 2; Figuras 2 y 3). La tabla 2 muestra el volumen de AMD que debe ser tratado para las 3 UDAs simuladas, mediante ambas tecnologías (OI y RII) y para cada escenario de suministro de agua (IDAM y parcela; 50% AMD y 100% AMD).

Tabla 2. Volumen (m^3/h) de AMD a tratar en función del tipo de cultivo (hortícolas y leñosos) del método de reducción de boro (OI y RII) y de su localización (IDAM y parcela) y del escenario de suministro de agua (50% AMD y 100% AMD).

% Leñosos	Reducción de boro en parcela				Reducción de boro en IDAM				% Hortícolas
	OI		RII		OI		RII		
	50% AMD	100% AMD	50% AMD	100% AMD	50% AMD	100% AMD	50% AMD	100% AMD	
100	2400	6000	922.0	2285.0	3000	6000	1148.2	2296.3	**0**
50	0	3000	0	1142.5					**50**
0		0		0	0	0	0	0	**100**

Al comparar los dos sistemas para reducir la concentración de boro, la reducción mediante RII fue menos costosa ya que, en el caso la resina, la IDAM puede producir AMD con una concentración de boro de 0 mg/L y mezclarse con AMD de un solo paso de OI con una concentración de 0,81 mg/L. Esto permite producir un AMD con un boro reducido (0,5 mg/L) antes del suministro (Figura 1; Tabla 2).

A escala de parcela, la reducción de la concentración de boro a 0 mg/L en el caso del sistema de RII, en comparación con los 0,5 mg/L obtenidos mediante OI, también permitió a los agricultores trata un menor volumen de AMD para conseguir una concentración de boro de 0,5 mg/L en la mezcla de agua final, disminuyendo significativamente el coste total. En este caso, en el escenario 50% AMD, de la asignación total de agua (6000 m^3/ha) los agricultores necesitan tratar 2400 m^3/ha, mientras que en la hipótesis de 100% AMD, únicamente necesitan tratar el agua de riego que no se emplea en los cultivos hortícolas y que dependerá de la configuración de cada UDA.

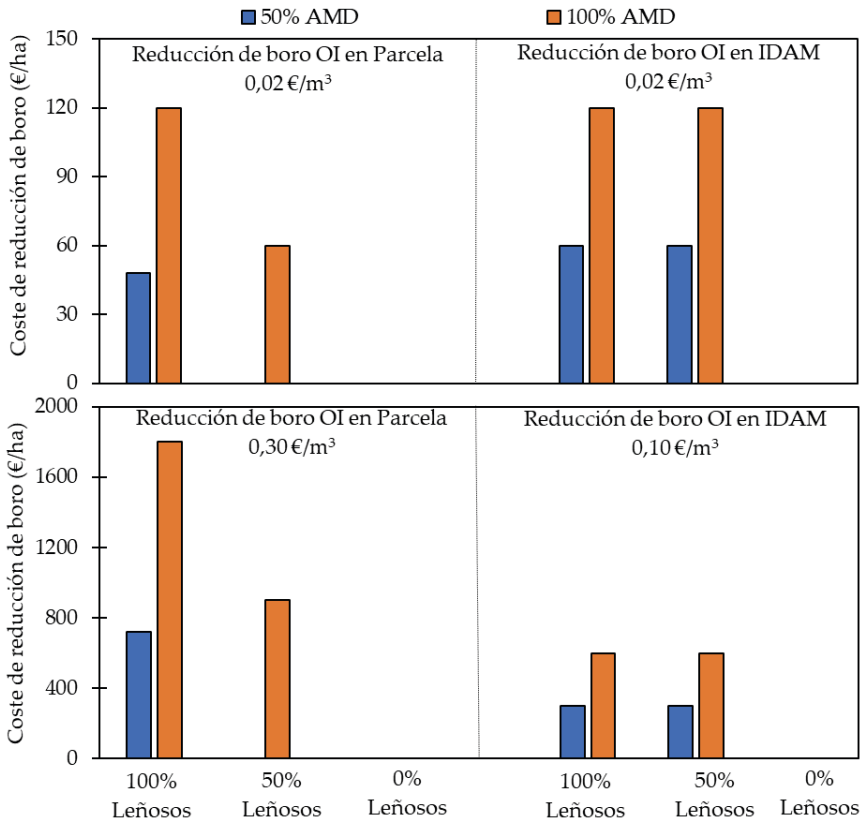


Figura 2. Coste de reducción de boro (€/ha) por ósmosis inversa tanto en planta desalinizadora de agua de mar como en instalaciones en parcela para las tres UDAs simuladas y para los escenarios de riego 50% DSW y 100% DSW.

Respecto al coste de la reducción de boro mediante OI (Figura 2), el escenario de reducción en parcela resultó siempre la opción más asequible cuando su coste específico se estableció en el valor más bajo (2 cent€/m³). Sin embargo, cuando dicho coste se estableció en el valor más alto, 10 y 30 cent€/m³ en IDAM y parcela, respectivamente, la mejor alternativa para reducir el boro dependió del tipo de cultivo existente en la UDA.

De igual forma, cuando el coste específico de la reducción de boro mediante RII se estableció en el menor valor (2 cent€/m³; Figura 3), la opción de reducción en parcela fue de nuevo la más asequible. Mientras que, de nuevo, cuando el coste específico se estableció en el coste más alto, 10 y 30 cent€/m³ en IDAM y parcela respectivamente, la mejor alternativa para reducir el boro siempre dependió únicamente del tipo de cultivo existente en la UDA, independientemente del escenario de suministro de AMD.

Comparando ambos métodos, y considerando los escenarios de 50% AMD y 100% AMD, un coste específico de reducción de boro de 30 cent€/m³ y en una UDA cubierta exclusivamente por cultivos leñosos, el coste de la reducción de boro mediante OI fue de 720 €/ha y 1800 €/ha, mientras que disminuyó hasta 276,6 €/ha y 685 €/ha, respectivamente, en el caso de la RII; esto supone una reducción del 61,6% del coste de producción.

En términos generales, estos resultados mostraron que la opción de reducir la concentración de boro mediante RII fue siempre la más asequible, tanto en IDAM como en parcela, independientemente del escenario de suministro de agua y de los cultivos situados en una UDA.

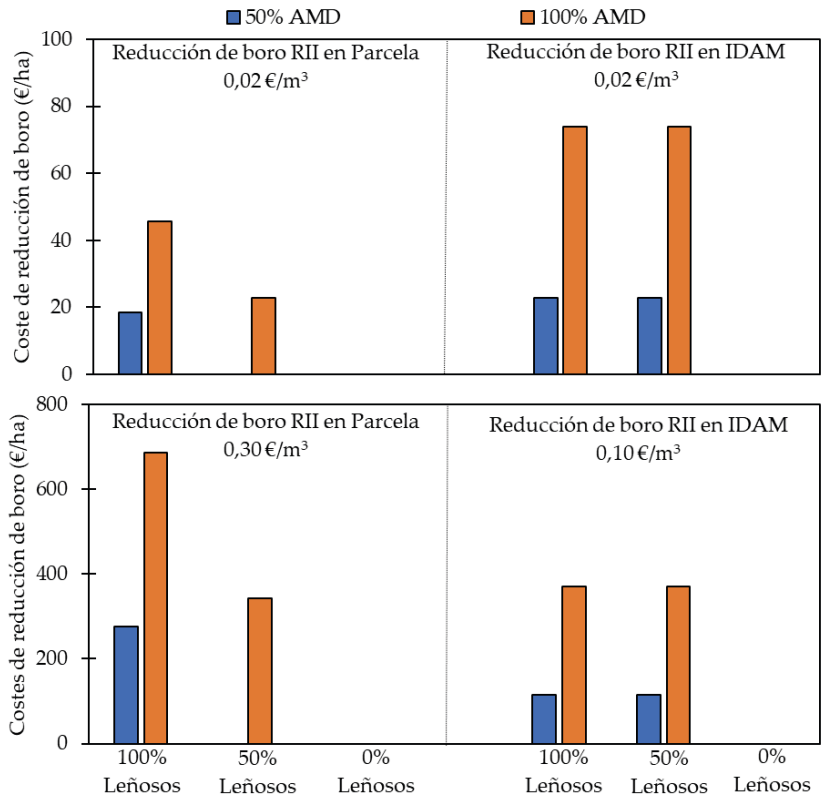


Figura 3. Coste de reducción de boro (€/ha) por resinas de intercambio iónico tanto en planta desalinizadora de agua de mar como en instalaciones en parcela para las tres UDAs simuladas y para los escenarios de riego 50% DSW y 100% DSW.

4. Conclusiones

El agua marina desalinizada (AMD) desempeña un papel importante para sostener la producción agrícola costera en el sureste de España. Sin embargo, es necesario prestar especial atención al boro, ya que su elevada concentración habitual podría causar impactos agronómicos y fisiológicos negativos, especialmente en cultivos sensibles. El presente estudio ha evaluado por primera vez el impacto económico regional de la reducción de boro y ha permitido determinar: (i) que a escala de instalación desaladora de agua de mar (IDAM) todo el AMD suministrado a los agricultores tendría la misma concentración de boro (0,5 mg/L) y, por tanto, el coste de reducción de boro se mantendría constante independientemente del tipo de cultivo o del escenario de disponibilidad de agua; (ii) a escala de parcela, los agricultores tienen la opción de tratar solo una parte del AMD disponible para conseguir un agua de riego con una concentración de boro de 0,5 mg/L. En consecuencia, cuanto mayor sea la superficie cubierta por cultivos leñosos, mayor será el coste de reducción de boro al tratarse de cultivos menos tolerantes; (iii) la reducción de boro mediante resinas de intercambio iónico suele ser notablemente más barata que la reducción por ósmosis inversa; y (iv) el escenario de 50% AMD, que representa la opción de mezcla en este estudio, es una opción económicamente viable y más eficiente que regar únicamente con AMD (100% AMD).

Esta metodología puede resultar útil para evaluar los costes regionales de la reducción de boro en otras regiones del mundo. No obstante, los resultados presentados deben interpretarse con cautela, ya que intervienen supuestos y escenarios que pueden o no ser representativos de en cada caso concreto de estudio.

5. Agradecimientos

La investigación y la APC han sido financiadas por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033, España) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER, UE) en el marco de los proyectos SEARRISOST (RTC-2017- 6192-2) y SEA4CROP (PID2020-118492RA-C22). Adicionalmente, este estudio forma parte del Programa AGROALNEXT / ThinInAzul que ha sido financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia. Imbernón-Mulero agradece el apoyo a su trabajo de doctorado al proyecto SEA4CROP y al programa predoctoral de la Universidad Politécnica de Cartagena (RV-484/21, UPCT, España). B. Gallego-Elvira agradece el apoyo del Ministerio de Universidades de España (Beca "Beatriz Galindo" BEAGAL18/00081). Se agradece la colaboración de Cátedra Trasvase y Sostenibilidad—Jose Manuel Claver.

Referencias

55. Martínez-Alvarez, V., Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Soto-García, M., Maestre-Valero, J.F. Multidisciplinary assessment of the agricultural supply of desalinated seawater in south-eastern Spain. Desalination. 2023. 548, 116252.
56. Navarro, J.M., Antolinos, V., Robles, J.M., Botía, P. Citrus Irrigation With Desalinated Seawater Under a Climate Change Scenario. Front. Plant Sci. 2022. 13, 909083.
57. Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J.F., González-Ortega, M.J., Gallego-Elvira, B., Martín-Gorriz, B. Characterization of the Agricultural Supply of Desalinated Seawater in Southeastern Spain. Water. 2019, 11, 1233.
58. Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., Martin-Gorriz, B., Molina-del-Toro, R., Jodar-Conesa, F.J., Maestre-Valero, J.F. Boron Removal from Desalinated Seawater for Irrigation with an On-Farm Reverse Osmosis System in Southeastern Spain. Agronomy. 2022. 12 (3), 611.
59. Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., Martin-Gorriz, B., Molina-del-Toro, R., Jódar-Conesa, F.J., Maestre-Valero, J.F. 2022. Ion Exchange Resins to Reduce Boron in Desalinated Seawater for Irrigation in Southeastern Spain. Agronomy 2022, 12, 1389.
60. J. Redondo, M. Busch, J.P. DeWitte, Boron removal from seawater using FILMTECTM high rejection SWRO membranes, Desalination 156 (2003) 229–238.
61. Chillón-Arias, M.F.; Valero-i-Bru, L.; Prats-Rico, D.; Varó-Galvan, P. Approximate cost of the elimination of boron in desalinated water by reverse osmosis and ion exchange resins. Desalination 2011, 273, 421–427.
62. Najid, N.; Fellaou, S.; Kouzbour, S.; Gourich, B.; Ruiz-García, A. Energy and environmental issues of seawater reverse osmosis desalination considering boron rejection: A comprehensive review and a case study of exergy analysis. Process Saf. Environ. Prot. 2021, 156, 373–390.
63. Confederación Hidrográfica de la Cuenca del Segura. Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura. 2022–2027; CHS: Murcia, Spain, 2022. (In Spanish).
64. Maestre-Valero, J.F., Imbernón-Mulero, A., Martínez-Alvarez, V., Ben-Abdallah, S., Gallego-Elvira, B. Regional análisis of boron reduction in desalinated seawater for irrigation in south-eastern Spain. Desalination. 2023. [En revisión].
65. Mass, E.V. Crop Salt Tolerance, in: K.K. Tanji (Ed.). Salinity Assessment and Management, Amer. Society of Civil Engineers, 1990, New York.



Nueva metodología de cultivo de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) para la adaptación al cambio climático, el empleo de bioestimulantes

E. Gómez [1], D. Mostaza-Colado[1], M. Martínez Molina[1], J. Sánchez Hernández[1], P. Muñoz García[1], J. Marín[2], P. V. Mauri[1].

[1] Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA). Finca El Encín, Ctra A2, Km.38,200. 28805, Alcalá de Henares, Madrid. david.mostaza@madrid.org
[2] Área Verde MG Projects S.L. Calle Oña 43, bajo. 28050, Madrid.

Abstract: As a consequence of climate change, crops are affected by drought and this water deficit causes biochemical and physiological effects on plants, which may affect parameters such as germination, vigor, yield, even the seeds composition and nutrients, reducing their nutricional quality. For all these reasons, it is necessary to apply technologies that improve the efficiency of crops, such as the use of biostimulant compounds that affect the success of germination and that enhance and improve vegetative development. The development of agricultural practices that anticipate the reproductive stages are also beneficial, avoiding their coincidence with periods of high temperatures and water stress, in addition to the development of varieties with earlier planting dates to adapt to climate change. Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is a legume that tolerates water stress and is capable of living in a symbiotic relationship with bacteria of the genus *Rhizobium* sp. and microorganisms that fix atmospheric nitrogen in the plant and soil, reducing the use of inputs, which also helps combat the effects of climate change. In this study we tried to determine the effect that a biostimulant produces on germination in three chickpea varieties and two forms of application.

Palabras clave: germinación, vigor

1. Introducción

El cambio climático está imponiendo mayores desafíos para la productividad de los cultivos como consecuencia de los efectos adversos que tiene sobre el suelo y los procesos de las plantas. Entre los cultivos herbáceos afectados por esta anomalía se encuentra el del garbanzo (Cicer arietinum L.) [1], donde se espera que este fenómeno aumente la ocurrencia y la severidad de las sequías y las olas de calor. Ante este escenario, el estrés por sequía plantea una multitud de efectos bioquímicos y fisiológicos en plantas que afectarían a la germinación, vigor y rendimiento. Además, el aumento de las temperaturas podría afectar al rendimiento del garbanzo al reducir la fotosíntesis, la producción de clorofila y la actividad de las enzimas en la planta; reducir la calidad de la semilla y aumentar la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo [2]. Es por ello que la seguridad alimentaria en el futuro dependerá del desarrollo e investigación de cultivares con una mejor adaptación a la sequía, el estrés por calor y con estabilidad en el rendimiento; así como de tecnologías y metodologías de cultivo que mitiguen estos efectos negativos. De ahí que sea de vital importancia mejorar la eficiencia del cultivo, aumentar la productividad y reducir la brecha entre el potencial de rendimiento de la variedad y el rendimiento en campo del productor [3].

Una de las tecnologías actuales disponibles para mejorar la eficiencia del cultivo del garbanzo y adaptarlo al cambio climático es el empleo de compuestos bioestimulantes que tengan efecto sobre el éxito de la germinación y que potencien el desarrollo vegetativo [4]. Adicionalmente, como adaptación al cambio climático, se deben desarrollar prácticas agrícolas que anticipen las etapas reproductivas de las plantas de garbanzo para evitar su coincidencia con periodos de altas temperaturas y estrés hídrico, es decir, el desarrollo de variedades de garbanzo

con una fecha de siembra más temprana junto con el uso de bioestimulantes que aceleren y mejoren el desarrollo vegetativo de las plantas.

El Reglamento (UE) 2019/1009 por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes define el término bioestimulante como «un producto cuya función es estimular los procesos nutricionales de las plantas independientemente del contenido de nutrientes del producto, con el único objetivo de mejorar una o más de las siguientes características de la planta y su rizosfera: eficiencia en el uso de nutrientes, tolerancia al estrés abiótico, características de calidad o disponibilidad de nutrientes inmovilizados en el suelo y la rizosfera». A colación de esta definición existen diferentes grupos de bioestimulantes [5]: 1) a base de microorganismos beneficiosos (bacterias y hongos), 2) a base de algas y 3) productos derivados de quitosanos. El grupo 1, denominado «Plant Growth-Promoting Rhizobacteria» (PGPR), es uno de los tratamientos más utilizados en garbanzo [6]. Las rizobacterias son microorganismos fijadores de nitrógeno atmosférico que forman micorrizas con la raíz del garbanzo e incorporan nitrógeno a la planta y al suelo [7]. Además, se sabe que el crecimiento vegetal y la formación de nódulos de micorrizas en garbanzo tras la aplicación de bioestimulantes que contienen microorganismos beneficiosos tiene efectos positivos [5][8]–[12]. Los PGPR también están involucrados en la producción y liberación de fitohormonas de crecimiento como las giberelinas y las citocinas [5]. Los hongos Trichoderma mejoran el sistema inmunológico de la planta haciéndola resistente al ataque de otros hongos [13]–[15]; mientras que el hongo Glomus intraradices, por ejemplo, forma endomicorrizas que incorporan nitrógeno y otros nutrientes a la planta [16].

El empleo de productos bioestimulantes no solo tiene estos efectos descritos anteriormente; existen estudios que han demostrado efectos positivo de los bioestimulantes en el cultivo de garbanzo: es decir, mayor contenido de proteína en el grano [9][17], biofortificación [17]; más absorción de N, P, K; aumento de la actividad de las enzimas superóxido dismutasa (SOD) y peroxidasa (POD); y un aumento en las concentraciones de ácidos orgánicos, reduciendo así el pH de la rizosfera [18]. También han analizado las infecciones por fitopatógenos y los resultados mostraron que se inhibieron o redujeron [19]–[21]. Además, los bioestimulantes a base de PGPB respetan el medio ambiente [22][23], se evita la degradación y contaminación del suelo producida por agroquímicos y contribuyen a la restauración del equilibrio microbiano del suelo e incluso a reducir el estrés abiótico [23].

Por todo ello, uno de los objetivos de esta comunicación es presentar los resultados de un estudio de éxito de germinación de semillas de garbanzo en lo que respecta a porcentaje y días tras la siembra (DAS). Para ello se ha trabajado con tres tipos diferentes de variedades de garbanzo: Amelia, IMIDRA10 y Blanco Sinaloa; y una combinación de bioestimulantes. La hipótesis de partida es que la aplicación del bioestimulante sobre las semillas tendrá efecto positivo sobre el porcentaje de germinación, siendo la hipótesis nula que no lo tenga.

2. Materiales y métodos

2.1. Material vegetal

Las variedades de garbanzo empleadas en este estudio son tres: Amelia (AM), IMIDRA 10 (IM) y Blanco Sinaloa (BS), siendo las dos primeras variedades de secano, mientras que Blanco Sinaloa es una variedad de regadío. Amelia e IMIDRA 10 han sido desarrolladas en el Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA) gracias a diferentes proyectos de investigación [24]. Son garbanzos que han sido cuidadosamente seleccionados a partir de cruzamientos entre diversas variedades, con un elevado grado de adaptación a las condiciones climáticas y edáficas del territorio, especialmente a las condiciones de sequía, siendo resistentes a enfermedades fúngicas. Amelia es una variedad de tipo Desi [25], de siembra temprana, entre enero y febrero, adaptada a los terrenos de secano. Tiene la

particularidad de presentar una elevada resistencia al encamado y a las enfermedades fúngicas, como la rabia o el tizón. Su pequeño tamaño de grano aumenta más del doble de su valor inicial si se pone en remojo, y es altamente apreciado por su textura y sabor siendo considerada de alta calidad culinaria (Figura 1). IMIDRA 10 es una variedad de tipo Kabuli [25]–[27], posee unas características similares a Amelia, es de destacar su elevada productividad y resistencia a plagas, siendo interesante además por su bajo contenido en ácido fítico y un elevado índice de digestibilidad de sus proteínas (96%) [28]. Es de mayor tamaño que Amelia, más rugoso, tono más apagado además de mayor número de ramas laterales y con desarrollo más precoz. La variedad de garbanzo Blanco Sinaloa es de tipo Kabuli [26], procede de la región agrícola del Centro y Noroeste de México y se cultiva en regadío; sus ventajas son su gran tamaño y rendimiento. Es un garbanzo blanco que crece erecto, de alto rendimiento, con buen calibre y resistente a la rabia (una de las enfermedades fúngicas más comunes), lo que le ha permitido posicionarse en más de 40 países, siendo España, Argelia e Italia los compradores más sobresalientes pese a que las condiciones climáticas y los requerimientos de cultivo distan de los tratamientos que reciben en la zona centro peninsular [29][30] (Figura 1).



Figura 1. Diferencias de tamaño y aspecto de las variedades de garbanzo Amelia (izquierda) y Blanco Sinaloa (derecha)**.**

2.2. Bioestimulante

El bioestimulante empleado es una formulación comercial de mezcla de hongos endomicorrízicos (*Glomus intraradices*, *Trichodema harzianum*, *T. reesei*, *T. viride* y *Gliocladium virens*), de rizobacterias PGPB (*Azospirillum brasilense*, *Azotobacter chroococcum*, *Bacillus megaterium* y *Pseudomonas fluorescens*), vitaminas (biotina B_7, ácido fólico, B_9, B_2, B_3, B_6 y B_{12}), carbono, potasio, aminoácidos provenientes del hidrolizado de proteínas, extracto soluble de *Yucca schidigera* y *Ascophyllum nodosum*, y una base de melaza obtenida a partir de extractos vegetales y algas marinas utilizados como diluyente.

Se empleó una concentración de bioestimulante (BioE) de 0,01 $L_{BioE}/Kg_{garbanzo}$, junto con un control al que no se le aplicó producto (control). También se utilizaron dos formas de aplicación del bioestimulante en los cultivos: 1) impregnación de 1 mL de BioE líquido por cada 100 g de semillas 24 horas antes de la siembra (BioE) y 2) aplicación sobre el suelo justo después de la siembra asegurando la percolación del BioE en el suelo y alrededores de la semilla mediante la aplicación de un ligero riego (BioE suelo). Adicionalmente, en el primero de los casos (Bio E) se agitó el recipiente 20 veces para asegurar que el bioestimulante impregnara toda la superficie del garbanzo. Posteriormente las semillas así impregnadas fueron extendidas en placas Petri de 120 mm de diámetro, dejándolas abiertas con el fin de evitar el exceso de humedad en las semillas [31][32].

2.3. Tipo de suelo

Los suelos más idóneos para el desarrollo del cultivo son los silíceo-arcillosos o limo-arcillosos que no contengan yeso, ricos en potasio y fósforo. En los suelos arcillosos la producción es similar, pero la calidad no es buena, porque el exceso de arcilla suele dar lugar a piel basta. En las tierras con alto contenido en yeso se producen garbanzos de mala calidad y difícil cocción. El pH debe de situarse entre 6 y 9, siendo más habitual los problemas de *Fusarium* en los suelos ácidos. El garbanzo es sensible a la salinidad y el suelo debe estar bien aireado por ser sensible a encharcamiento [30]. Los suelos donde se ha desarrollado este ensayo se clasifican como arcillosos finos asentados sobre franca fina del subgrupo Xerochrept álfico-vértico [33] y tienen un pH de 8,7 (Tabla 1). Se tomó una muestra de suelo y se analizó siguiendo los métodos oficiales de análisis del Ministerio de Agricultura (1994) en los laboratorios del Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA). En suelos se midieron el nitrógeno (N) usando el método Kjeldahl, la materia orgánica por calcinación, el fósforo asimilable (P) siguiendo el Método Olsen, el potasio (K) extraíble con Acetato Amónico pH=7 y posterior determinación por Absorción Atómica. Los resultados se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores analíticos de la muestra de suelo

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
pH	8,7	P (mg/kg)	20
C.E. (dS/m)	0,18	Ca (mg/kg)	1671
Carbonatos (%)	1,65	Mg (mg/kg)	175
N (%)	0,08	Na (mg/kg)	22
M.O. (%)	1,30	K (mg/kg)	233

2.4. Diseño del ensayo en campo

El experimento se llevó a cabo en terrenos de El Encín, propiedad de IMIDRA, ubicados en Municipio de Alcalá de Henares, Madrid, España (40° 31′ 17″ N; 3° 17′ 21″ O). El área de cada parcela fue de 1 m^2. Previo a la siembra, se preparó la tierra con rotavator. La siembra se realizó a mano el 17 marzo de 2023. En todas las parcelas de 1 m^2 se sembraron 30 semillas de garbanzo a una profundidad de 5 cm, usando como molde en todas ellas un marco de siembra de 80 x 75 cm (5 filas x 6 columnas), guardando una distancia lateral de 15 cm, y frontal de 20 cm entre las semillas. Cada parcela era distinta en base a la dosis, tipo de tratamiento con el bioestimulante y variedad estudiada. Las plantas, una vez sembradas, se protegieron con malla para evitar daños por pájaros u otros animales.

Aunque el garbanzo es un cultivo de secano, dadas las condiciones de crecimiento con los bioestimulantes y las condiciones climáticas adversas con escasez de agua de lluvia en el lugar de experimentación, la región central de la península Ibérica, ha sido necesario el riego eventual de los cultivos.

Los parámetros evaluados fueron el éxito de germinación (en porcentaje) de las tres variedades estudiadas Amelia, IMIDRA 10 y Blanco Sinaloa frente a las dos maneras de aplicación del bioestimulante en el cultivo (BioE y BioE suelo) y junto con el control. La recolección de datos se realizó en 3 momentos diferentes, a 17 días tras la siembra (DAS), 24 DAS y 33 DAS (3, 10 y 19 de abril de 2023), contabilizando el número de plantas germinadas frente al número de semillas sembradas de cada variedad y tratamiento.

2.5. Análisis estadístico

Para comparar el éxito de germinación de los diferentes tratamientos aplicados en las 3 variedades de garbanzo empleadas, se realiza un test ANOVA mediante el programa informático STATGRAPHICS Centurion XVI. Se seleccionó un intervalo de confianza del 95% (nivel de significación α=0,05). Las diferencias significativas entre las medias serían detectadas tras aplicar la prueba de Rangos Múltiples

3. Resultados y discusión

A los 17 DAS, las tres variedades estudiadas presentaron germinación, siendo la variedad Amelia la que tenía mayor porcentaje de plantas germinadas, tanto en el control como en el tratamiento del bioestimulante sobre los garbanzos previo a la siembra. El bioestimulante aplicado favorecía la germinación en Amelia e IMIDRA 10, mientras que en Blanco Sinaloa hubo menor germinación si el bioestimulante estaba aplicado sobre la semilla, con respecto al control; y mayor si se añadía sobre el suelo frente al control. Amelia pareció responder mejor a la aplicación del bioestimulante sobre la semilla y mostraba el mismo porcentaje de germinación en la variedad IMIDRA 10 cuando el bioestimulante se aplicó directamente en el suelo. La variedad Blanco Sinaloa es la que menor porcentaje de germinación presentó en los tres casos en comparación con las otras variedades. Pese a los resultados obtenidos, ninguna de las variedades llegó a alcanzar un porcentaje de germinación mayor del 50% (Figura 2).

Los resultados de la prueba estadística (ANOVA) indicaron que, dado que el valor P de la prueba fue de 0,001 e inferior a 0,05, había diferencias estadísticamente significativas entre las medias porcentaje de germinación frente al tratamiento empleado, con un nivel de confianza del 95,0 %. Para determinar qué medias eran significativamente diferentes de otras, se realizaron pruebas de Rango Múltiple. El método utilizado para discriminar entre medias fue el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher que ofreció diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza entre diferentes muestras: AM BioE frente a BS BioE, AM BioE frente a IM control, BS BioE frente a IM BioE suelo y BS control frente a IM BioE suelo.

En el momento 24 DAS, el porcentaje de germinación en el control era similar en las tres variedades e inferior al 30%, cuando el bioestimulante se aplicaba sobre los garbanzos, seguía siendo la variedad Amelia la que presentaba mayor porcentaje con respecto a las otras dos, pero de forma muy similar a lo que ocurría a los 17 DAS. Muy distinto es lo que ocurría cuando el bioestimulante se añadía al suelo. Dos variedades, Amelia e IMIDRA 10 casi alcanzan el 50% de germinación, mientras que la variedad Blanco Sinaloa se quedaba estancada con datos de germinación similares a los presentados a 17 DAS (Figura 2).

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre AM BioE y BS BioE; BS BioE y AM e IM BioE suelo, AM BioE suelo, frente a los controles en las tres variedades, y BS BioE suelo. Además, aparecieron diferencias estadísticamente significativas entre BS BioE suelo e IM BioE suelo (Figura 2).

A los 33 DAS, el porcentaje de germinación en el control no se vio modificado con respecto a los 24 DAS, aunque si presentó un mayor porcentaje de germinación con ambos tipos de aplicación del bioestimulante, siendo el de mayor éxito el tratamiento donde el bioestimulante se aplicaba directamente en el suelo. De nuevo, fueron las variedades Amelia e IMIDRA 10 las

que presentaron un mayor éxito de germinación, siendo Blanco Sinaloa la que presentó un menor éxito de germinación (Figura 2). El tratamiento estadístico ofreció diferencias estadísticamente significativas entre diferentes muestras: BS BioE e IM BioE suelo; IM BioE y las otras 2 variedades con BioE suelo, AM BioE suelo frente a los controles en las tres variedades y BS BioE suelo, BS BioE suelo frente a IM BioE suelo. También aparecieron diferencias estadísticamente significativas entre IM BioE suelo y los controles de las tres variedades empleadas.

Teniendo en cuenta el conjunto de los datos, y según la diferencia mínima significativa de Fisher (LSD), se encontraron tres grupos homogéneos, marcados como a, b y c. Sólo existieron diferencias significativas en aquellos grupos que no comparten letra (Figura 2).

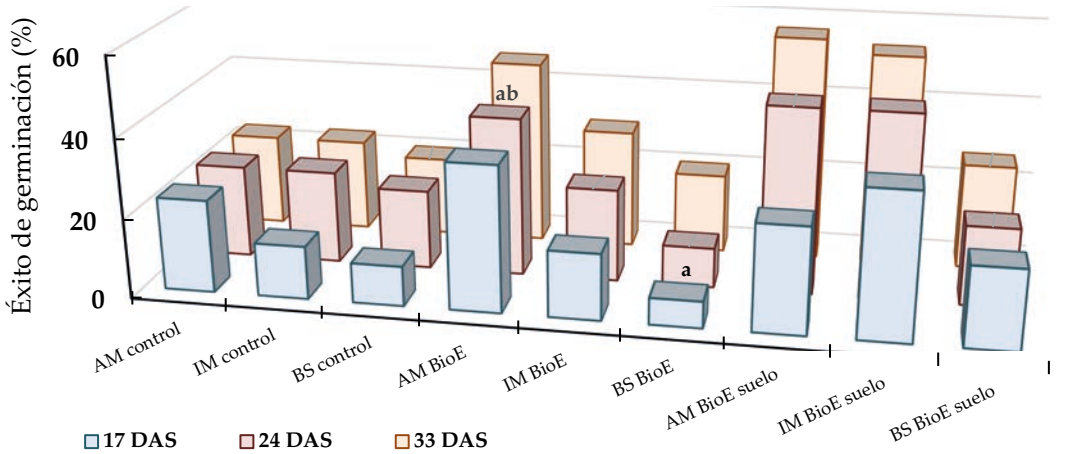


Figura 2.
Porcentaje de germinación a 17 DAS, 24 DAS y 33 DAS de las tres variedades de garbanzo según el sistema de aplicación del BioE. Cada letra representa el grupo homogéneo asignado al que pertenece el tratamiento.

En la figura se observa que, en todas las fechas estudiadas, las variedades y tratamientos con mayor éxito de germinación son las marcadas con la letra ***b*** a 17 DAS y ***c*** a 24 DAS y 33 DAS, presentando diferencias significativas con los tratamientos con menor éxito de germinación (letras ***a*** en todos los DAS).

4. Conclusiones

Se ha comprobado que el BioE aplicado sobre semilla y directamente sobre suelo ha tenido éxito en la variedad Amelia y que también provoca mayor porcentaje de germinación en la variedad IMIDRA 10 en los primeros momentos (17 DAS). A medida que crece la planta, las variedades con mejor porcentaje de germinación son Amelia e IMIDRA 10 cuando el bioestimulante se aplica directamente sobre el suelo. En Blanco Sinaloa no se aprecian efectos del BioE sobre la germinación y desarrollo de la semilla de garbanzo.

Cabe concluir que la aplicación de bioestimulante tiene efectos beneficiosos sobre la germinación de la semilla de garbanzo. Aun así, se necesita hacer un estudio del grano de garbanzo para verificar si el efecto del BioE también influye sobre el rendimiento o calidad de la semilla cosechada.

5. Agradecimientos

El proyecto FP22-VALVAGAR está financiado por IMIDRA. J. Sánchez Hernández es beneficiario de una ayuda de formación del IMIDRA. M. Martínez Molina es alumna universitaria en prácticas académicas.

Referencias

[1] C. Lacasta, M. M. Moreno, C. Moreno, y R. Meco, «Efecto del cambio climático en cultivos herbáceos de secano», *Informacion Tecnica Economica Agraria*, vol. 116, pp. 380-395, dic. 2020, doi: 10.12706/itea.2020.037.

[2] A. Kumari *et al.*, «Climate Change and Its Impact on Crops: A Comprehensive Investigation for Sustainable Agriculture», *Agronomy*, vol. 12, n.º 12, pp. 1-16, 2022, doi: 10.3390/agronomy12123008.

[3] V. Devasirvatham y D. K. Y. Tan, «Impact of high temperature and drought stresses on Chickpea production», *Agronomy*, vol. 8, n.º 8. 2018. doi: 10.3390/agronomy8080145.

[4] E. A. Rampoldi, A. Zabini, M. Avellaneda, y K. Hoshiba, «Respuesta del cultivo de garbanzo (Cicer arietinum L.) a la aplicación de bioestimulante», *Nexo Agropecuario*, vol. 1, pp. 21-23, 2013.

[5] I. López Padrón, L. Martínez González, G. Pérez Domínguez, Y. Reyes Guerrero, M. Núñez Vázquez, y J. A. Cabrera Rodríguez, «Uso de bioestimulantes en el cultivo del garbanzo», *Cultivos Tropicales*, vol. 42, n.º 4, p. 13, 2021, [En línea]. Disponible en: http://ediciones.inca.edu.cuoctubre-diciembre

[6] B. Dibut, T. Shagarodsky, R. Martínez, M. Ortega, Y. Ríos, y L. Fey, «Biofertilización del garbanzo (Cicer arietinum L.) con Mesorhizobium cicerii cultivado sobre suelo.», *Cultivos Tropicales*, vol. 26, n.º 1, pp. 5-9, 2005, [En línea]. Disponible en: http://ediciones.inca.edu.cuoctubre-diciembre

[7] J. Del Moral, Á. Mejías, y M. López, «El Cultivo Del Garbanzo», *Hojas Divulgadoras Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*, n.º 5, pp. 1-16, 1982, [En línea]. Disponible en: https://www.tecnicoagricola.es/el-cultivo-del-garbanzo/

[8] M. T. El-Mokadem, F. A. Helemish, Z. Y. M. Abou-Bakr, y S. A. Sheteawi, «Associative effect of Azospirillum lipoferum and Azotobacter chroococcum with Rhizobium spp. on mineral composition and growth of chickpea (Cicer arietinum) on sandy soils», *Zentralbl Mikrobiol*, vol. 144, n.º 4, pp. 255-265, 1989, doi: 10.1016/S0232-4393(89)80087-3.

[9] R. Saini, S. S. Dudeja, R. Giri, y V. Kumar, «Isolation, characterization, and evaluation of bacterial root and nodule endophytes from chickpea cultivated in Northern India», *J Basic Microbiol*, vol. 55, n.º 1, pp. 74-81, ene. 2015, doi: 10.1002/jobm.201300173.

[10] P. Martínez-Hidalgo y A. M. Hirsch, «The Nodule Microbiome: N 2 -Fixing Rhizobia Do Not Live Alone», *Phytobiomes J*, vol. 1, n.º 2, pp. 70-82, ene. 2017, doi: 10.1094/PBIOMES-12-16-0019-RVW.

[11] N. Kumari, S. Mondal, P. Mahapatra, T. T. Meetei, y Y. Bijilaxmi Devi, «Effect of Biofertilizer and Micronutrients on Yield of Chickpea», *Int J Curr Microbiol Appl Sci*, vol. 8, n.º 01, pp. 2389-2397, ene. 2019, doi: 10.20546/ijcmas.2019.801.251.

[12] A. Zaheer *et al.*, «Isolation, characterization, and effect of phosphate-zinc-solubilizing bacterial strains on chickpea (Cicer arietinum L.) growth», *Saudi J Biol Sci*, vol. 26, n.º 5, pp. 1061-1067, jul. 2019, doi: 10.1016/j.sjbs.2019.04.004.

[13] M. Giordano *et al.*, «Stand-alone and combinatorial effects of plant-based biostimulants on the production and leaf quality of perennial wall rocket», *Plants*, vol. 9, n.º 7, pp. 1-15, 2020, doi: 10.3390/plants9070922.

[14] S. L. Woo *et al.*, «Trichoderma-based Products and their Widespread Use in Agriculture», *Open Mycol J*, vol. 8, n.º 1, pp. 71-126, jul. 2014, doi: 10.2174/1874437001408010071.

[15] R. Hermosa, A. Viterbo, I. Chet, y E. Monte, «Plant-beneficial effects of Trichoderma and of its genes», *Microbiology (N Y)*, vol. 158, n.º 1, pp. 17-25, 2012, doi: 10.1099/mic.0.052274-0.

[16] R. Sanchez, A. Diaz-Franco, V. Pecina-Quintero, I. Garza-Cano, y J. Loera-Gallardo, «Glomus intraradices y Azospirillum brasilense en trigo bajo dos regímenes de humedad en el suelo», *Universidad y Ciencia trópico húmedo*, vol. 24, n.º 1, pp. 239-245, 2008.

[17] E. Pellegrino y S. Bedini, «Enhancing ecosystem services in sustainable agriculture: Biofertilization and biofortification of chickpea (Cicer arietinum L.) by arbuscular mycorrhizal fungi», *Soil Biol Biochem*, vol. 68, pp. 429-439, ene. 2014, doi: 10.1016/j.soilbio.2013.09.030.

[18] D. Israr, G. Mustafa, K. S. Khan, M. Shahzad, N. Ahmad, y S. Masood, «Interactive effects of phosphorus and Pseudomonas putida on chickpea (Cicer arietinum L.) growth, nutrient uptake, antioxidant enzymes and organic acids exudation», *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 108, pp. 304-312, nov. 2016, doi: 10.1016/j.plaphy.2016.07.023.

[19] M. Akrami, H. K. Khiavi, H. Shikhlinski, y H. Khoshvaghtei, «Bio controlling two pathogens of chickpea Fusarium solani and Fusarium oxysporum by different combinations of Trichoderma harzianum, Trichoderma asperellum and Trichoderma virens under field condition», *Int J Microbiol Res*, vol. 1, n.º 2, pp. 52-055, 2013, [En línea]. Disponible en: www.internationalscholarsjournals.org

[20] A. Echevarría, A. Triana, D. Rivero, A. Rodríguez, y B. Martínez, «Generalidades del cultivo de garbanzo y alternativa biológica para el control de la Marchitez», *Cultivos Tropicales*, vol. 40, n.º 4, p. 10, 2019, [En línea]. Disponible en: http://ediciones.inca.edu.cuoctubre-diciembre

[21] M. Albuquerque da Silva Campos, «Bioprotection by arbuscular mycorrhizal fungi in plants infected with Meloidogyne nematodes: A sustainable alternative», *Crop Protection*, vol. 135, p. 105203, sep. 2020, doi: 10.1016/j.cropro.2020.105203.

[22] S. Gopalakrishnan *et al.*, «The extent of grain yield and plant growth enhancement by plant growth-promoting broad-spectrum Streptomyces sp. in chickpea», *Springerplus*, vol. 4, n.º 1, p. 31, dic. 2015, doi: 10.1186/s40064-015-0811-3.

[23] B. S. Mickan, A. R. Alsharmani, Z. M. Solaiman, M. Leopold, y L. K. Abbott, «Plant-Dependent Soil Bacterial Responses Following Amendment With a Multispecies Microbial Biostimulant Compared to Rock Mineral and Chemical Fertilizers», *Front Plant Sci*, vol. 11, feb. 2021, doi: 10.3389/fpls.2020.550169.

[24] P. V. Mauri Ablanque, G. Vergara García, y T. Simorte Sánchez de Rivera, «Mejora del garbanzo», *Agricultura: Revista agropecuaria y ganadera*, n.º 828, pp. 428-431, 2001.

[25] M. Nunes da Silva, J. S. Medeiros, C. S. Santos, y M. W. Vasconcelos, «Low Water provision Differently Affects Plant Growth ans seed Mineral Porfile of Kabuli and Desi Chickpeas (Cicer arietinum)», 2022.

Técnicas sensoriais de avaliação não-destrutiva do estado nutricional das culturas em modelos de crescimento: state-of-the-art

L. Silva[1,2,3,4], L.A. Conceição*[2,3], F.C. Lindon[1,4], B. Maçãs[4,5], Valero, C.[6]

[1] Departamento Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Campus da Caparica, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal
[2] Instituto Politécnico de Portalegre, 7300-110 Portalegre, Portugal
[3] VALORIZA – Centro de Investigação para a Valorização dos Recursos Endógenos, Instituto Politécnico de Portalegre, 7300-110 Portalegre, Portugal
[4] Centro de Investigação GeoBioTech, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus da Caparica, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516 Caparica, Portugal
[5] Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P., Estrada Gil Vaz, Ap. 6, 7350-901 Elvas, Portugal
[6] LPF_Tagralia, Departamento de Inginiería Agroflorestal, ETSI Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta Hierro 2, 28040 Madrid, Spain
* luis_conceicao@ipportalegre.pt

Abstract: The nitrogen nutrition index (NNI) was developed to diagnose plant nitrogen (N) status, but requires destructive, time-consuming measurements of plant N content (PNC) and plant dry matter (PDM). To overcome logistical and economic problems, it is necessary to assesses crop NNI rapidly and non-destructively. According to the literature reviewed, it as well as PNC and PDM, can be estimated using vegetation indices obtained from remote sensing. While sensory techniques are useful for measuring PNC, crop growth models estimate crop N requirements. Research has indicated that the accuracy of the estimate is increased through the integration of remote sensing data to periodically update the model, considering the spatial variability in the field. However, this combination of data presents some difficulties. The methods used to couple remote sensing data with the needs of crops estimated by crop growth models must be very well calibrated, especially for the crop parameters and for the environment around this crop. Therefore, this paper reviews to assess crop NNI through non-destructive methods, and how to integrate the remote sensing data on crop.

Palavras-chave: Agricultura de Conservação; Nutrição vegetal; *Machine learning*; Sistemas de Suporte à Decisão

1. Introdução

Para os agricultores europeus, os custos dos fertilizantes representam em média 6% dos custos de produção, podendo chegar aos 12% em culturas arvenses [0]. A gestão dos inputs pode ser melhorada através da aplicação da dose exata e precisa para cada ponto específico do campo, melhorando a fertilidade do solo e a produção. A eficiência do uso de N (NUE) pode ser melhorada tanto no espaço como no tempo, através de uma gestão precisa do N. Para facilitar o ajuste das doses de fertilização de N foi desenvolvido o índice de nutrição em N (NNI) [1]. Para calcular este índice é necessário conhecer o N contido nas plantas (PNC) e a biomassa da cultura, o que requere despender de tempo, equipamento laboratorial sofisticado e custos elevados associados. Para ultrapassar estes problemas logísticos e económicos é necessário recolher o NNI por outros métodos. O NNI pode ser estimado remotamente através de sensores óticos, pela relação entre os índices de vegetação (IV's) detetados remotamente que estimam PNC e valores de concentração de N na matéria seca das plantas [2].

Enquanto técnicas de sensoriamento são úteis em medir o estado nutricional das culturas ao momento, são os modelos de crescimento das culturas (MCC) que estimam as necessidades das culturas. A precisão das estimativas é aumentada pela integração de dados de deteção remota nos modelos, ajustando a estimativa considerando a variabilidade da parcela, embora esta combinação de dados tenha algumas dificuldades. Os MCC têm de ter a capacidade de lidar com diferentes estados de crescimento e desenvolvimento das culturas e com diferentes concentrações de N nas plantas.

Neste artigo, abordamos problemas relacionados com o processo de medir a nutrição azotada das culturas, especialmente por métodos não-destrutivos, como sensores de folha, de copa ao nível do solo, *unmanned aircraft vehicle* (UAV) e plataformas de satélites. Vamo-nos focar na integração de dados de deteção remota em MCC, bem como nos constrangimentos e incertezas desta integração.

2. Estimativa do estado nutricional das culturas em N

2.1. NUE

A gestão do N enquanto fator de produção requer um amplo conhecimento sobre a dinâmica de N no sistema de produção e os processos subjacentes que regem a absorção e distribuição de N nos órgãos da planta. A gestão da fertilização azotada tendo em conta os momentos-chave das culturas aumenta a NUE, por aumentar as taxas de absorção de N numa determinada fisiologia das plantas, e conseguir transformá-lo em biomassa [2]. A NUE é uma função da absorção de N de fontes naturais e de fertilizantes e respetiva transformação em produção, que pode assumir uma complexidade variável consoante o detalhe requerido na estimativa. Esta complexidade pode ser aumentada adicionando variáveis ambientais e medições geoquímicas. Contudo, o nível de complexidade dos algoritmos deve estar de acordo com as necessidades dos agricultores e o seu conhecimento para conseguir lidar com eles. Conceição et al., [3] indicaram que as características da região do Alentejo requerem uma especial atenção em termos de controlo das concentrações de nitratos, especialmente em áreas vulneráveis. Estas características reduzem a eficiência das adubações azotadas de cobertura, o que sugere novas formas de mecanização baseadas em tecnologias de agricultura de precisão, nomeadamente, aplicação em dose variável (VRA).

2.2. Concentração crítica de N

O conceito de concentração crítica de N (N_c) é essencial para calcular o estado nutricional da cultura a partir do PNC, e assume-se como a concentração de N necessária para atingir o máximo crescimento das plantas [4]. Lemaire et al. [5] propuseram $\%N_c$ como uma função chamada (curva de diluição (Equação 1):

$$\%Nc = a \cdot PDM - b \,, \qquad (1)$$

Onde PDM é a matéria seca da planta acima do solo (ton ha^{-1}), %Nc é o PNC articulado com a percentagem de PDM, a representa a concentração de N na PDM quando PDM = 1 ton ha^{-1}, e b é um parâmetro estatístico que influencia a curva da relação. O teor de água no solo também afeta esta curva. Os padrões de precipitação inter e intra-anuais e a frequência de períodos de stress por calor são característicos do clima mediterrâneo e promovem situações de défice hídrico com significantes reduções de produção [6].

As plantas C3 têm diferentes parâmetros para uma máxima curva de diluição de N comparadas com as plantas C4 [7]. Lemaire e Gastal [8] propuseram valores de parâmetros para as culturas C3 (%Nc = 4.8PDM−0.34) e para as C4 (%Nc = 3.6PDM−0.34). Comparando produções

semelhantes, as diferenças observadas entre estes dois grupos aparecem como uma diferença de concentração de N nos tecidos metabólicos, bem como pela proporção de compartimentos estruturais na biomassa total da planta. As curvas propostas por Lemaire e Gastal [8] indicam se o estado nutricional das culturas é deficiente, ótimo ou excessivo para o propósito de atingir o máximo crescimento vegetativo.

Mesmo que as plantas estejam bem nutridas em N, o PNC diminui gradualmente na proporção folha-caule com a maturidade da cultura, resultando em folhas com alto teor de N e caules com baixo teor [2]. A incerteza do %Nc depende do nível de biomassa. Além disso, considerar poucos momentos de observação e tratamentos experimentais mantêm a incerteza num nível alto [9]. Um mínimo de oito a dez ensaios são recomendados para estimar uma curva de diluição exata e precisa. É aconselhável um mínimo de três vezes de amostragem durante a temporada. Pode ser mais vantajoso aumentar o número de vezes de amostragem do que aumentar o número de diferentes doses de fertilização acima de quatro. Ainda é necessário ajustar os parâmetros das curvas e entender a origem de suas diferenças, sendo necessários novos e mais rigorosos métodos para isso.

2.3. NNI

Usando curvas de Nc baseadas na alometria entre os compartimentos metabólico e estrutural da planta, o NNI pode ser calculado da seguinte forma (Equação 2) [2]:

$$NNI = Na/Nc, \quad (2)$$

Onde Na representa o PNC da cultura no momento da análise. A estimativa deste índice requer a coleta de amostras destrutivas, secagem e pesagem da PDM para triturar essas amostras e análise de Na pelos métodos de Kjeldahl ou Dumas [9]. Embora este método clássico tenha alta precisão em cada amostra, apenas caracteriza a cultura nesse ponto de amostragem, o que torna o método muito trabalhoso, caro e demorado, além de não ser prático para avaliar a cultura em todos os pontos específicos do campo [10].

Um valor de NNI igual ou próximo a 1 significa que a cultura está no valor ideal para atingir o crescimento máximo [11]. Note-se que o NNI só pode diagnosticar o estado de nutrição em N da cultura, mas não é capaz de quantificar a dose de N a ser aplicada em cobertura, especialmente quando NNI < 1. É necessário esclarecer a relação entre o estado nutricional da cultura e a dose de N para ser aplicado dependendo do período de crescimento da cultura e para alcançar um processo de produção na estação.

2.4. Estimar o NNI das culturas por métodos não-destrutivos

Os sensores medem a luz refletida, que permite calcular IV's e correlacioná-los com os valores de PNC, estimando indiretamente o NNI [2,12]. A refletância da vegetação é normalmente caracterizada pela absorção da radiação pela planta da radiação do espectro visível (VIS) entre os 400 e os 700 nm, e pela alta refletância na região do Infravermelho-próximo (NIR) entre os 700 e os 1000 nm, como resultado da estrutura da canópia (mesófila) e do efeito da densidade da folha [4]. Os pigmentos mais importantes para a fotossíntese são a clorofila a (máxima absorção na região do vermelho (R), aos 662 nm, e na região do azul (B) aos 430 nm) e a clorofila b (máxima absorção aos 642 nm e aos 453 nm). Contudo, a relação entre a clorofila e o PNC varia de acordo com a unidade de medida, estado de desenvolvimento da planta e nível de fertilização.

A refletância baseada na clorofila assume um papel importante na estimativa do estado nutricional em N da cultura à escala da folha, contudo, ao nível da canópia atua variáveis que não são tidas em conta ao nível da folha. Destacam-se o índice de área foliar (IAF), a inclinação

das folhas, o coeficiente do solo e a iluminação da área de leitura. Note-se que os IV's relacionados com o N estão altamente correlacionados com a acumulação de N na folha, mais que qualquer outra parte das plantas acima do solo. Ainda assim estes fatores de confusão podem ser atenuados por outros IV's, principalmente nos estados de desenvolvimento iniciais, quando o solo exposto assume uma grande influência na área de recolha de dados pelos sensores. Quando o IAF aumenta, esta influência do solo vai diminuindo gradualmente, uma vez que a canópia da cultura se vai dispersando no plano. Fu et al., [13] indicaram 5 índices que minimizam os fatores de confusão da cobertura do solo (Tabela 1).

Tabela 1. IVs para minimizar os fatores de confusão das imagens.

IV	Abreviatura	Comprimentos de onda
Ratio Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index/Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	MCARI/OSAVI	550, 670, 700, 800
Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	TCARI	670, 700
Ratio Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index/Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	TCARI/OSAVI	550, 670, 700, 800
Canopy Chlorophyll Content Index	CCCI	690-730, 780-1400

2.4.1. Sensores de folha

Os sensores de folha dispensam a recolha de amostras para análise química laboratorial, tornando a medição mais rápida que a dos métodos tradicionais. Embora não meçam diretamente a concentração de N na folha, medem à distância a clorofila contida nos cloroplastos. Os valores dos medidores de clorofila são facilmente afetados pelas variedades das culturas, estados de desenvolvimento, espessura, posição, ângulo e textura das folhas e stress ambiental [14]. Com o avanço do ciclo de crescimento das culturas, estes fatores tendem a dificultar as medições feitas pelos medidores de clorofila, mesmo que a concentração em N foliar seja alta.

2.4.2. Sensores próximos da canópia

Os sensores próximos da canópia permitem ultrapassar alguns problemas sentidos na utilização de sensores de folha. Podem ser ativos ou passivos. Os sensores passivos leem a refletância da cultura usando a luz do dia como fonte de luz, revelando resultados positivos em termos da relação entre NIR e R [15]. A estimativa remota de biomassa apenas IVs é bastante difícil, mas quando combinada com modelos de culturas, podem ser alcançados resultados muito satisfatórios [15]. Além disso, a eficiência destes sensores é influenciada pelas condições climáticas, incluindo cobertura de nuvens, poeira e ângulo do zênite solar [16].

Os sensores ativos atuam de forma diferente pois são independentes da luz natural, medindo a luz refletida pela cultura e emitida pelos emissores do próprio sensor, requerendo algumas calibrações [17]. A escolha dos IVs mais adequados varia com o estado de desenvolvimento da cultura no momento da recolha dos dados, mas também com o número de bandas incluídas. Sensores com três ou mais bandas têm melhor desempenho do que os que medem apenas duas bandas [18].

2.4.3. UAV's

De acordo com a revisão de Olson e Anderson [19] sobre a grande variedade de sensores remotos que podem ser usados em UAVs, os três tipos mais predominantes em aplicações agrícolas são câmaras de cor natural (RGB), espectrais e térmicas. Eles acrescentam que os sensores espectrais são classificados como sensores passivos em termos de sua fonte de radiação eletromagnética. As câmaras RGB capturam a luz na região do VIS, agrupando a radiação em três bandas (Red (R), Green (G) e (B), produzindo imagens que podem ser incorporadas em métodos de classificação baseados em objetos automatizados e outros métodos de ML no tratamento de informações e na geração de IVs [20]. A alta resolução das imagens capturadas é inatingível por outras câmaras e permite a criação de modelos digitais da altura das culturas, a estimativa da cor da folha, alojamento e cobertura da canópia [19].

As câmaras espectrais, neste caso, multiespectrais e hiperespectrais, capturam segmentos VIS, NIR e infravermelho de ondas curtas (SWIR) do espectro eletromagnético. Estas câmaras podem ser usadas para estimar parâmetros indiretos relacionados ao NNI, como teor de N foliar, IAF, teor de clorofila foliar e biomassa vegetal. Além disso, pode medir indiretamente a deficiência de nutrientes em tempo real pela sensibilidade a descolorações vegetativas e conteúdo de pigmento fotossintético. Apesar do mesmo espectro eletromagnético mas com uma maior destrinça nas bandas estreitas, as câmaras hiperespectrais são mais caras e requerem maior capacidade para armazenar dados e realizar o seu processamento [21].

2.4.4. Satélites

As plataformas de satélite permitem o sensoriamento remoto de culturas por aquisição gratuita de imagens e, consequentemente, permitem estimar o estado nutricional em N das culturas em parcelas de grande escala. Satélites como o Sentinel-2, lançado pelo programa europeu Copernicus e pela Agência Espacial Europeia (ESA), fornecem mais informações sobre a deteção de parâmetros de cultivo, com alta resolução e curto tempo de revisita (5 dias). Atualmente, captura 13 bandas espectrais com uma resolução espacial terrestre de 10 m de bandas VIS/NIR, 30 m de bandas NIR/SWIR e 60 m de bandas atmosféricas [22].

Algumas missões privadas, como RapidEye, PlanetScope ou WorldView, são reconhecidas pela ESA. Como seus satélites estão mais próximos da superfície da Terra podem capturar imagens com maior resolução. No entanto, adquirir essas imagens é caro em comparação com as da ESA, que são gratuitas. Fenómenos atmosféricos como a ocorrência de nuvens e resolução temporal [3] podem afetar uma estratégia de gestão eficaz baseada apenas em dados de satélite.

Em resumo, cada tipo de plataforma de aquisição indireta de NNI tem a sua aplicabilidade (Tabela 2).

Tabela 2. Aplicabilidade de diferentes plataformas de aquisição indireta do estado nutricional da cultura em N.

Sensor	Parâmetro remotamente detetado	Índice	R2	Resolução especial	Referência
Sensor de folha	Clorofila contida na folha	-	0.47	Ao nível da folha	[23]
Sensor de canópia	NNI	CCCI-CNI	0.97	cm	[15]
Sensor de canópia	NNI	NDVI; NDRE	0.70	cm	[23]
UAV	PNC	MCARI/MTVI2	0.59	cm	[24]
UAV	PDM	MTVI2	0.80	cm	[24]

UAV	Clorofila contida na folha	MSAVI2	0.68	cm	[23]
UAV	NNI	NDRE	0.85	cm	[23]
Satélite	NNI	CCCI	0.76	10 m	[25]
Satélite	NNI	NDRE	0.79	10 m	[25]

3. Integrar dados de sensoriamento remoto em MCC

3.1. Processamento de dados de sensoriamento remoto

Uma combinação de informações de deteção remota pode ser usada para fazer recomendações de fertilização de N, por meio de algoritmos destacando a importância dos métodos de análise de dados por ML.

Métodos de ML podem desvendar problemas não lineares em diversos conjuntos de dados [26]. Ge et al. [27] demonstraram um desempenho confiável do modelo RF na estimativa de PNC combinando os IV's com as bandas R, G e B. No entanto, estimar o Nc nos estádios fenológicos mais avançados resulta em valores abaixo do Nc medido, por duas razões possíveis: (1) o problema de saturação de IV's e (2) grandes erros e incertezas no modelo RF causados por mudanças na morfologia estrutural da planta (como senescência foliar ou emergência de panículas ou espigas).

Importa assim ter em consideração as condições de campo, o que não tem acontecido em ensaios conduzidos em pequenas parcelas ou blocos de ensaios. Embora estes ensaios permitam resultados mais corretos do que os resultados obtidos em campos agrícolas, é necessário determinar a precisão do modelo em escala maior, em campos agrícolas reais [2].

3.2. Modelação do estado nutricional e necessidades das plantas em N

O facto de o N ser tão dinâmico nos sistemas solo-planta torna a sua avaliação numa tarefa bastante complexa. Nesse sentido, os MCC podem simular o processo fisiológico dinâmico de crescimento e desenvolvimento da cultura com base nas relações quantitativas entre o crescimento da cultura e as condições ambientais, incluindo clima, condições do solo, informações sobre o genótipo da cultura e estratégias de gestão [13]. Modelação é o processo de desenvolvimento de uma representação matemática de um sistema.

A aplicação do modelo mais adequado a cada situação também depende da disponibilidade e qualidade das informações que permitem a sua execução. A maioria dos problemas que afetam as culturas é de natureza multidisciplinar, pelo que é importante que a recolha de dados e os procedimentos experimentais sejam especificados para que estruturas de tratamento de dados e abordagens analíticas possam ser definidas e desenvolvidas.

3.3. Integração de sensoriamento remoto em MCC

Os MCC apresentam limitações espácio-temporais, que podem ser melhoradas pelas técnicas de sensoriamento remoto considerando a variabilidade espacial da parcela, aumentando a precisão dos modelos, atualizando-os periodicamente [8]. No entanto, esta integração apresenta algumas dificuldades [8-10]. Os MCC lidam com diferentes estados de desenvolvimento das culturas e com diferentes PNC que vêm das bandas espectrais. Essas medições podem apresentar resultados insuficientes nos estados fenológicos iniciais quando a cobertura vegetal é muito baixa [10], ou ser influenciada pelo fenómeno de saturação em estados fenológicos mais avançados.

A integração de dados de sensoriamento remoto em modelos de crescimento de culturas é viável por meio de modelos de ML em que importa considerar o sensor mais adequado à estimativa do parâmetro de cultivo desejado. Quanto aos modelos de crescimento utilizados,

devem considerar as características do ambiente da cultura e as práticas de gestão representativas da região em que são aplicados, bem como os parâmetros da cultura em questão. Por exemplo, não é sensato usar um MCC adaptado para culturas em estufas em culturas cultivadas no solo em situação de sequeiro extensivo na região do Mediterrâneo.

4. Discussão

Alguns sensores estimam com precisão o estado nutricional em N da cultura com alto nível de precisão, no entanto, apenas conseguem cobrir uma área muito pequena, focando-se apenas ao nível da folha. O PNC pode variar entre diferentes partes da planta, e o teor de N foliar pode fornecer uma estimativa da nutrição da cultura diferente do PNC real. Outros sensores que cobrem mais partes da planta, sendo mesmo capazes de medir o estado nutricional da canópia, podem fornecer dados nutricionais da cultura com grande precisão, exigindo menos tempo para recolher dados de uma área muito maior. Os UAVs permitem a recolha de imagens com alta resolução espacial (centimétrica), custo operacional relativamente baixo e aquisição de imagens quase em tempo real, fornecendo uma solução para os problemas enfrentados pelos sensores de canópia e baseados e de folhas. As câmaras RGB recolhem imagens de alta resolução que são muito úteis para remover a interferência do solo nos dados, para estimar o estado nutricional de N nas fases iniciais de crescimento das culturas. Este é um desafio para as culturas mediterrânicas. As câmaras espectrais permitem estimar parâmetros indiretos relacionados ao NNI, como teor de N foliar, índice de área foliar, teor de clorofila foliar e biomassa vegetal. Finalmente, as plataformas de satélite ainda que muitas vezes com baixa resolução espacial das imagens permitem a sua aquisição gratuita e, consequentemente, a estimativa do estado nutricional em N da cultura em parcelas de grande escala.

A integração de dados de sensoriamento remoto em MCC é, de facto, viável. Para a correta recolha de dados, deve-se assegurar a calibração dos sensores e o correto preenchimento dos MCC, garantindo que todos os dados sejam representativos da realidade da cultura e, mais especificamente, do campo em questão. Com o aumento do conhecimento sobre as técnicas de sensoriamento remoto e sua aplicabilidade, bem como a contínua facilitação da acessibilidade aos sensores, aumentou o interesse no seu uso em campos agrícolas reais. É com este avanço que surge a necessidade de melhorar sensores, e estão a ser lançadas missões de satélites com capacidade para agrupar melhor a radiação em bandas e manter uma resolução muito significativa. A aplicação de técnicas de deteção remota em campos agrícolas e não apenas em pequenas parcelas experimentais contribuirá para garantir que os resultados sejam confiáveis em larga escala, facilitando a gestão precisa do N, e respetiva correção de dose de adubação atendendo às necessidades específicas das plantas, tanto no espaço quanto no tempo.

5. Conclusão

É possível medir e estimar o estado nutricional em N da cultura usando medições rápidas e não destrutivas. Existe uma relação significativa entre os IVs e o PNC que permite estimar indiretamente o NNI. No entanto, deve-se notar que a recolha de amostras para estimar diretamente o PNC e o PDM permite testar e validar modelos de estimativa indireta, aumentando a sua precisão. Existe uma grande variedade de sensores, e a principal diferença entre eles está em sua aplicabilidade prática. Embora ainda seja necessário algum conhecimento sobre a determinação de PNC via sensoriamento remoto, principalmente em campos agrícolas, podemos definir três diretrizes para auxiliar na escolha de uma plataforma correta de acordo com o objetivo:

- Para medir todo o campo de forma rápida e gratuita, o satélite é a melhor fonte de informação;

• Para medir rapidamente todo o campo com alta resolução e alto nível de detalhe, os UAVs podem atingir essa estimativa do estado nutricional da cultura em N;

• Para medir um ponto específico do campo, os sensores de folhas ou os de canópia são muito precisos na medição do nutricional da cultura em N e são muito adequados para algumas medições no campo destinadas a obter o PNC real nesses pontos específicos.

Após o diagnóstico do estado nutricional da cultura em N, é muito importante determinar a quantidade necessária de fertilizante N. Nesse sentido, a deteção remota pode ser usada para ajustar modelos que estimam as necessidades das culturas, salvaguardado o uso do sensor mais adequado no espectro eletromagnético face ao, parâmetro da cultura desejado, e atendendo ao entorno da cultura e as práticas culturais representativas da região em que são aplicadas.

Referências

66. European Comission. Ensuring Availability and Affordability of Fertilizers. Available online: https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/agri-food-supply-chain/ensuring-availability-and-affordability-fertilisers_en (accessed on 12 December 2022).
67. Justes, E.; Mary, B.; Meynard, J.-M.; Machet, J.-M.; Thelier-Huche, L. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. Ann. Bot. 1994, 74, 397–407.
68. Li, X.; Ata-UI-Karim, S.; Li, Y.; Yuan, F.; Miao, Y.; Yoichiro, K.; Cheng, T.; Tang, L.; Tian, X.; Liu, X.; et al. Advances in the estimations and applications of critical nitrogen dilution curve and nitrogen nutrition index of major cereal crops. A review. Comput. Electron. Agric. 2022, 197, 106998. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106998.
69. Conceição, L.A.; Silva, L.; Dias, S.; Loures Maçãs, B. Benefit of the variable rate technology in a top-dressed fertilization of a fodder crop in a nitrate vulnerable area. In Program & Abstracts Book EurAgEng 2021 Conference. New Challenges for Agricultural Engineering towards a Digital World; University of Évora: Évora, Portugal, 2021; pp. 163–164.
70. Lemaire, G.; Salette, J.; Sigogne, M.; Terrasson, J.P. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I.—Etude de l'effet du milieu. Agronomie 1984, 4, 423–430.
71. Conversa, G.; Lazzizera, C.; Bonasia, A.; Elia, A. Growth, N uptake and N critical dilution curve in broccoli cultivars grown under Mediterranean conditions. Sci. Hortic. 2019, 244, 109–121. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.034.
72. Yao, B.; Wang, X.; Lemaire, G.; Makowski, D.; Cao, Q.; Liu, X.; Liu, L.; Liu, B.; Zhu, Y.; Cao, W.; et al. Uncertainty analysis of critical nitrogen dilution curves for wheat. Eur. J. Agron. 2021, 128, 126315. https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126315.
73. Lemaire, G.; Gastal, F. N uptake and distribution in plant canopies. In Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1997. pp. 3–43
74. Bremner, J.M. Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties. In Total Nitrogen; American Society of Agronomy, Wisconsin : 1965; Volume 9, pp. 1149–1178.
75. Brisson, N.; Mary, B.; Ripoche, D.; Jeuffroy, M.H.; Ruget, F.; Nicoullaud, B.; Gate, P.; Devienne-Barret, F.; Antonioletti, R.; Durr, C.; et al. STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 1998, 18, 311–346.
76. Peng, S.; Buresh, R.J.; Huang, J.; Zhong, X.; Zou, Y.; Yang, J.; Wang, G.; Liu, Y.; Hu, R.; Tang, Q.; et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review. Agron. Sustain. Dev. 2010, 30, 649–656. https://doi.org/10.1051/agro/2010002.
77. Pinter, Jr. P. J.; Hatfield, J.L.; Schepers, J.S.; Barnes, E.M.; Moran, M.S.; Daughtry, C.S.T.; Upchurch, D.R. Remote Sensing for Crop Management. Photogramm. Eng. Remote Sens. 2003, 69, 647–664. https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.647.

78. Nutini, F.; Confalonieri, R.; Crema, A.; Movedi, E.; Paleari, L.; Stavrakoudis, D.; Boschetti, M. An operational workflow to asses rice nutritional status based on satellite and smartphone apps. Comput. Electron. Agric. 2018, 154, 80–92. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.008.
79. Späti, k.; Huber, R.; Finger, R. Benefits of Increasing Information Accuracy in Variable Rate Technologies. Ecol. Econ. 2021, 185, 107047. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107047.
80. Ravier, C.; Meynard, J.M.; Cohan, J.P.; Gate, P.; Jeuffroy, M.H. Early nitrogen deficiencies favour high yield, grain protein content and N use efficiency in wheat. Eur. J. Agron. 2017, 89, 16–24. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.06.002.
81. Elsayed, S.; Rischbeck, P.; Schmidhalter, U. Comparing the performance of active and passive reflectance sensors to assess the normalized relative canopy temperature and grain yield of drought-stressed barley cultivars. Field Crops Res. 2015, 177, 148–160. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.010.
82. Zecha, C.W.; Link, J.; Claupein, W. Fluorescence and Reflectance Sensor Comparison in Winter Wheat. Agriculture 2017, 7, 78. https://doi.org/10.3390/agriculture7090078.
83. Cao, Q.; Miao, Y.; Feng, G.; Gao, X.; Li, F.; Liu, B.; Yue, S.; Cheng, S.; Ustin, S.L.; Khosla, R. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. Comput. Electron. Agric. 2015, 112, 54–67. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.012.
84. Colaço, A.F.; Bramley, R.G. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? Field Crops Res. 2018, 218, 126–140. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007.
85. Schirrmann, M.; Giebel, A.; Gleiniger, F.; Pflanz, M.; Lentschke, J.; Dammer, K.-H. Monitoring Agronomic Parameters of Winter Wheat Crops with Low-Cost UAV Imagery. Remote Sens. 2016, 8, 706. https://doi.org/10.3390/rs8090706.
86. Qiu, Z.; Ma, F.; Li, Z.; Xu, X.; Ge, H.; Du, C. Estimation of nitrogen nutrition index in rice from UAV RGB images coupled with machine learning algorithms. Comput. Electron. Agric. 2021, 189, 106421. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106421.
87. Amarasingam, N.; Salgadoe, S.; Powell, K.; Gonzalez, L.F.; Natarajan, S. A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops. Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 2022, 26, 100712. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100712.
88. Crema, A.; Boschetti, M.; Nutini, F.; Cillis, D.; Casa, R. Influence of Soil Properties on Maize and Wheat Nitrogen Status Assessment from Sentinel-2 Data. Remote Sens. 2020, 12, 2175. https://doi.org/10.3390/rs12142175.
89. Fitzgerald, G.; Rodriguez, D.; O'Leary, G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI). Field Crops Res. 2010, 116, 318–324. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.01.010.
90. Clevers, J.G.; Gitelson, A.A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2013, 23, 344–351. https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008.
91. Meier, J.; Mauser, W.; Hank, T.; Bach, H. Assessments on the impact of high-resolution-sensor pixel sizes for common agricultural policy and smart farming services in European regions. Comput. Electron. Agric. 2020, 169, 105205. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105205.
92. Yao, X.; Huang, Y.; Shang, G.; Zhou, C.; Cheng, T.; Tian, Y.; Cao, W.; Zhu, Y. Evaluation of Six Algorithms to Monitor Wheat Leaf Nitrogen Concentration. Remote Sens. 2015, 7, 14939–14966. https://doi.org/10.3390/rs71114939.
93. Mailhol, J.; Albashab, R.; Chevirona, B.; Lopezc, J.; Ruellea, P.; Dejeana, C. The PILOTE-N model for improving water and nitrogen management practices: Application in a Mediterranean context. Agric. Water Manag. 2018, 204, 162–179. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.015.

94. Tahmasebi, M.; Mailah, M.; Gohari, M.; Abd Rahman, R. 2018 a. Vibration suppression of sprayer boom structure using active torque control and iterative learning. Part I: Modelling and control via simulation. Journal of Vibration and Control, 24(20), 4689-4699 https://doi.org/10.1177/107754631773316423

95. Tahmasebi, M.; Gohari, M.; Mailah, M.; Abd Rahman, R. 2018 b. Vibration suppression of sprayer boom structure using active torque control and iterative learning. Part II: Experimental implementation. Journal of Vibration and Control, 24(20),4740-4750 https://doi.org/10.1177/1077546317733907

Influencia del caudal de aire de un pulverizador de bajantes verticales en la deposición de producto en viñedo

A. Vigo-Morancho[1*], M. Videgain[1,2], A. Boné[1], M. Vidal[1], H. Malón[1], F.J. García-Ramos[1,2]

[1] Escuela Politécnica Superior, Universidad de Zaragoza, Ctra. Cuarte s/n, 22071 Huesca, España.
[2] Instituto Agroalimentario de Aragón—IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte s/n, E- 22071 Huesca, España.
* Correspondencia: albavm@unizar.es

Abstract:

The correct adjustment of pesticide application equipment has been a crucial activity and subject of study for research teams, with the aim of achieving an efficient process in compliance with increasingly restrictive regulations concerning input application. Regarding the equipment used in three-dimensional crops, commonly assisted by air, these restrictions involve both hydraulic and pneumatic system adjustment, requiring studies that analyse the interaction between the crop and factors related to those systems. Therefore, the aim of this study was to establish the interaction between the air flow generated by a cross-flow sprayer commonly used in vineyards and the canopy, and to determine the effect of two air configurations on deposition depending on different nozzle typologies. Air velocity values inside the canopy were recorded with a hot wire anemometer to understand the behaviour of the air inside the canopy. Deposition was evaluated for two nozzle types as a function of air configuration, with the sprayer moving at 6.1 km h^{-1}, using water sensitive papers. Results showed the significant effect of air configuration on air velocities inside the canopy. Furthermore, different air configurations did not result in greater deposition, regardless of the droplet size, thus at the vegetative stage studied on the date of the trial, an air flow rate of 4,774.60 $m^3 h^{-1}$ would be a good option for pesticide application.

Palabras clave: pulverización, sistema neumático, boquilla, fitosanitario, caudal

1. Introducción

La aplicación de productos fitosanitarios es un eslabón principal en la cadena de producción en la agricultura, ya que permite optimizar la salud y el rendimiento de los cultivos, asegurando la trazabilidad y calidad del producto. Este proceso ha estado tradicionalmente influenciado por factores sociales, económicos y medioambientales, cobrando estos últimos especial interés en la actualidad debido a las restricciones que se presentan a nivel europeo para los próximos años, con una propuesta de reducción del 50% en el uso de pesticidas para el 2030.

Respecto a los equipos de aplicación, los pulverizadores hidroneumáticos son los más utilizados en las explotaciones frutícolas. Estos equipos incorporan uno o más ventiladores, ubicados generalmente en la parte trasera, cuya función es generar una corriente de aire que arrastre las gotas generadas por las boquillas hasta el cultivo y favorecer la entrada del producto en el interior del cultivo. A lo largo de los años, se ha constatado la influencia de una correcta regulación de estos equipos sobre la eficiencia del proceso, haciendo que los fabricantes incorporen novedades en su diseño con el fin de obtener una aplicación homogénea y precisa. El tipo de boquilla [1-3], la presión del líquido, la velocidad de avance [4] o el caudal de aire [5] son algunos de los principales parámetros que afectan la deposición, influenciada a su vez por otros

aspectos relacionados con las características del cultivo [6, 7]. Por tanto, cualquier ajuste de optimización del pulverizador debe basarse en el conocimiento de las características del cultivo y del perfil de distribución vertical del producto considerándose la presencia o ausencia de la asistencia de aire [4, 8, 9]. El objetivo de este trabajo es determinar la interacción entre el caudal de aire generado por un pulverizador hidroneumático de bajantes verticales y un cultivo de viña en espaldera, así como evaluar el efecto del caudal de aire y el tipo de boquilla sobre el perfil de distribución vertical de líquido a distintas profundidades y alturas en el cultivo.

2. Materiales y métodos

2.1. Equipo y condiciones de estudio

El estudio se realizó sobre un equipo de seis bajantes verticales (Figura 1) diseñado para trabajar en viña, concretamente, el modelo Zaturn Compact Cronos (Ilemo Hardi, S.A.U., Lleida, España), capaz de modificar la sección e inclinación de los difusores, consiguiendo una variación de las características del flujo de aire a la salida de los mismos.



Figura 3. Pulverizador modelo Zaturn Compact Cronos (Ilemo Hardi).

El ensayo se realizó en el mes de julio, en un viñedo ubicado en la Escuela Politécnica Superior de Huesca. Se utilizó un tractor John Deere 6400 trabajando a una velocidad de toma de fuerza de 540 r min^{-1}. Se registró el promedio de temperatura y humedad durante el ensayo con un termohigrómetro digital modelo HI 93640 (HANNA Instruments, Portugal), obteniéndose valores de 39% y 33,6^{0}C, respectivamente. La velocidad promedio del viento se registró con un anemómetro de hilo caliente 445 modelo 0563 4450 (TESTO, Lenzkirch, Alemania), obteniéndose un promedio de 1,1 m s^{-1} y un máximo de 2,3 m s^{-1}.

2.2. Situación estática. Velocidad del aire en función de la altura, la profundidad y la configuración

Se evaluó el comportamiento del flujo de aire generado por el pulverizador para 2 configuraciones del sistema neumático (Tabla 1), en función de la sección de salida y la velocidad seleccionada en la caja de cambios. Para ello, se establecieron 12 puntos de medida dentro del cultivo, asociados a 4 alturas y 3 profundidades, en los que se midió la velocidad del aire durante 10 segundos y se obtuvo el dato promedio, utilizando el anemómetro descrito en el apartado 2.1.

Tabla 2. Características de las configuraciones del sistema neumático utilizadas en el ensayo.

Configuración	Sección de salida de aire (cm^2)	Velocidad caja de cambios	Régimen de giro del ventilador (r min^{-1})	Caudal (m^3 h^{-1})
1	25,00	Marchas cortas	3078	4.774,60
2	12,50	Marchas largas	3564	5.042,74

Las alturas establecidas fueron 70 cm, 97 cm, 123 cm y 150 cm con respecto al suelo (H1, H2, H3 y H4, respectivamente); y 3 profundidades, correspondientes a las caras interna (a 65 cm del difusor), central y externa del seto (P1, P2 y P3, respectivamente), separadas 30 cm entre sí (Figura 2) y con un desfase lateral de 10 cm para evitar solapamientos. Se realizaron cuatro repeticiones en distintos puntos a lo largo del seto, realizándose todas las mediciones sobre la bajante vertical izquierda, en la posición más alejada del ventilador (vista trasera).

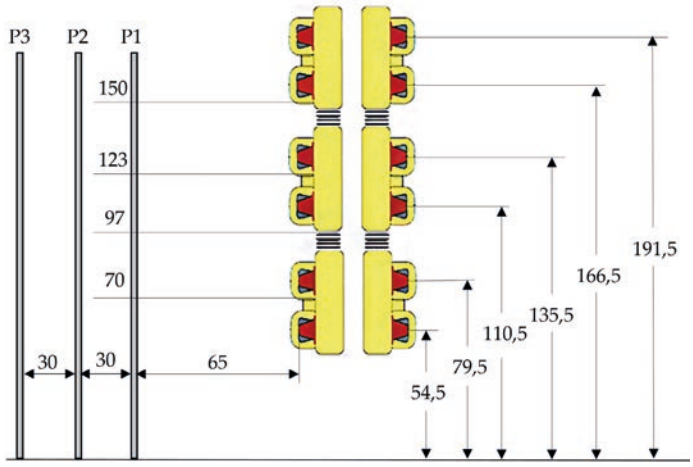


Figura 4. Alturas de los difusores con respecto al suelo (cm) y alturas de medición del aire con respecto a las profundidades 1, 2 y 3 (P1, P2 y P3, respectivamente).

2.3. Situación dinámica. Evaluación de la deposición

Con el fin de evaluar el efecto del caudal de aire del pulverizador sobre la deposición de producto, se colocaron papeles (76 mm x 26 mm) hidrosensibles (Syngenta, Basilea, Suiza) en los 12 puntos descritos en el apartado 2.2. Para cada combinación de configuraciones, se llevó a cabo una aplicación a una velocidad de avance de 6,1 km h^{-1} en 4 secciones diferentes del cultivo. Se cuantificó el porcentaje de cobertura para cada muestra. Por otro lado, se evaluaron dos boquillas de distinta tipología con las condiciones de trabajo detalladas en la Tabla 2, con el objetivo de determinar la influencia de la configuración de aire sobre los distintos tamaños de gota de las boquillas y el efecto de ambos parámetros sobre el perfil de deposición en el cultivo.

Tabla 3. Características de las boquillas estudiadas.

Boquilla		D50 (µm)	Presión (bar)	Caudal (L min^{-1})	Dosis de aplicación (L ha^{-1})
1. ATI 80° lila de cono hueco		119	7	1.53	600
2. TVI 80º amarilla de turbulencia		564	11	1.53	600

El análisis de papeles hidrosensibles se realizó utilizando el software Image J como técnica de procesamiento de imágenes. Por otro lado, con el fin de cuantificar el Índice de Área Foliar (IAF), se recolectaron y analizaron, con el mismo software, todas las hojas contenidas en 1 m lineal del seto. Considerando la distancia entre filas (3 m), se obtuvo un IAF de 0,59, propio del momento vegetativo del cultivo en el mes de julio.

2.4. Análisis de datos

El análisis estadístico de los datos se realizó con el software IBM SPPS Statistics V 26 (IBM Corp., Armonk, Nueva York, EE. UU.). En primer lugar, se realizó una transformación raíz cuadrada sobre los datos de velocidad de aire (m s^{-1}) para cumplir con los supuestos de normalidad, comprobada mediante la prueba de Kolmogórov-Smirnov ($p < 0,05$). Con el objetivo de evaluar el

efecto conjunto de la configuración, altura y profundidad, así como sus interacciones, sobre la velocidad de aire, se llevó a cabo un análisis multifactorial de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia $p < 0,05$. Además, se analizó el efecto individual de cada una de las variables a través del análisis unifactorial de la varianza. Por último, se estudiaron las diferencias significativas entre los grupos de estudio (boquilla, configuración, profundidad y altura) sobre la deposición de producto (% de área mojada) mediante la prueba de Kruskal-Wallis, dada la ausencia de normalidad en la distribución de los datos.

3. Resultados y discusión

3.1. Situación estática. Velocidad del aire en función de la altura, la profundidad y la configuración

La Figura 3 muestra los datos promedio de velocidad de aire obtenidos durante el ensayo, para cada configuración de aire en función de la profundidad y altura en el cultivo.

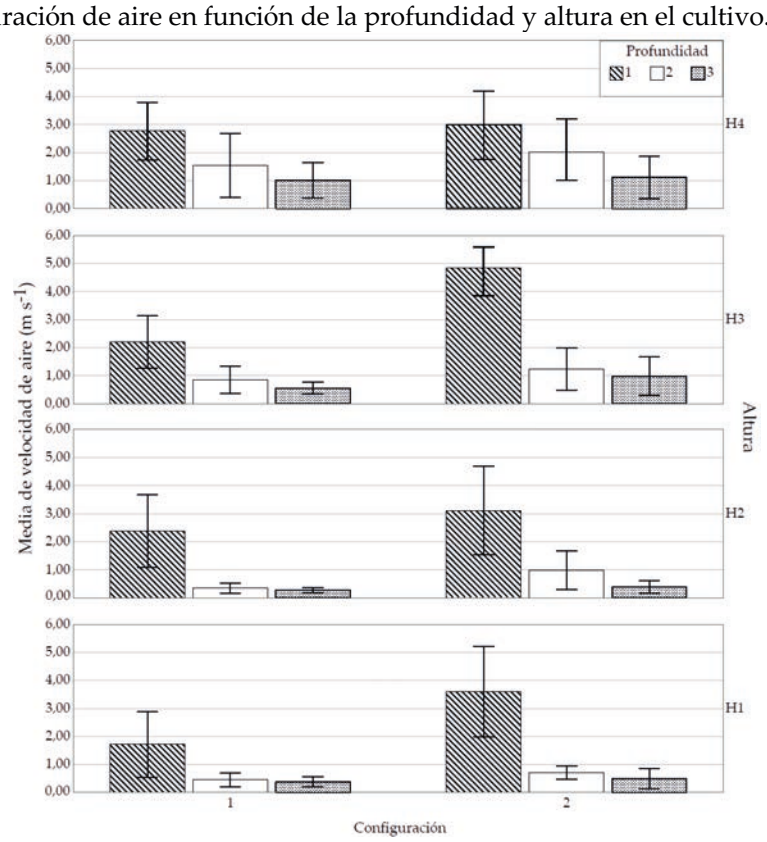


Figura 5. Valor medio y desviación típica de la velocidad del aire (m s^{-1}) en función del caudal (configuración) para las distintas profundidades y alturas estudiadas.

Los datos descriptivos en el estudio del efecto individual de la profundidad sobre la velocidad de aire se muestran en la tabla 3.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos en la evaluación del caudal y la profundidad sobre la velocidad del aire.

Profundidad	N	Media de velocidad (m s^{-1})	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo (m s^{-1})	Máximo (m s^{-1})
					Límite inferior (m s^{-1})	Límite superior (m s^{-1})		
1	32	2,91	1,46	0,26	2,38	3,44	0,39	5,92
2	32	1,01	0,88	0,15	0,69	1,33	0,12	4,11

3	32	0,65	0,51	0,09	0,46	0,83	0,07	2,05
Total	96	1,52	1,42	0,14	1,43	1,95	0,07	5,92

El análisis multifactorial mostró la influencia de la configuración y la profundidad sobre la velocidad del aire, sin embargo, no hubo diferencias significativas debidas a la interacción de los factores ni al efecto de la altura. Los datos de velocidad de aire fueron mayores para el caudal con una relación de velocidad larga en la caja de cambios del pulverizador y una menor sección de salida del aire (configuración 2, $p= 0,021$), sin embargo, esta diferencia solo se observó en la cara externa del seto (profundidad 1), es decir, las velocidades de aire registradas en los puntos restantes en el interior del cultivo y correspondientes a la configuracion 2, fueron ligeramente superiores, pero no de manera significativa. La velocidad de aire disminuyó significativamente al atravesar la profundidad 1 ($p< 0,0001$), sin embargo, los valores de velocidad de aire obtenidos en las profundidades 2 y 3 fueron similares ($p= 0,101$) para las 2 configuraciones de aire estudiadas.

3.2. Evaluación de la deposición

Dada la repetibilidad del patrón obtenido sobre el perfil de distribución en un mismo plano vertical, configuración de aire y tipo de boquilla, se realizó el análisis estadístico mediante la agrupación de los datos correspondientes a las 4 alturas de medición. De esta forma, la prueba de Kruskal-Wallis permitió conocer, mediante comparaciones por parejas de grupos de estudio, la influencia de estos factores sobre los datos de porcentaje de área cubierta de los hidrosensibles (Figura 4).

Al realizar una aplicación con un tamaño de gota fino (boquilla ATI Lila), la deposición en la profundidad 1 se vio penalizada al disminuir el caudal y aumentar la sección de salida de aire de los difusores (configuración 1), con una mediana del 60,81% respecto al 100% obtenido con un caudal alto y menor sección de salida. Esta diferencia no se mantuvo al atravesar el cultivo; se obtuvieron porcentajes de cobertura similares en las profundidades 2 y 3 del cultivo, independientemente del caudal de aire utilizado.

El efecto del caudal de aire sobre la deposición de producto fue despreciable al realizar una aplicación con un tamaño de gota más grueso (Boquilla TVI). En este caso, los hidrosensibles fueron cubiertos al 100% en la cara externa del cultivo para ambos caudales de aire. De forma análoga a la boquilla ATI, se observó una disminución drástica de la cobertura al atravesar la profundidad 1, no alcanzando un 30% en ningún caso en la profundidad 2 y siendo ésta similar a la obtenida en la profundidad 3 ($p > 0,05$). Algunos autores [10] han concluido que un 30% puede considerarse como una cobertura óptima para un control satisfactorio de plagas y enfermedades, considerando incluso excesivos valores superiores a esa cifra.

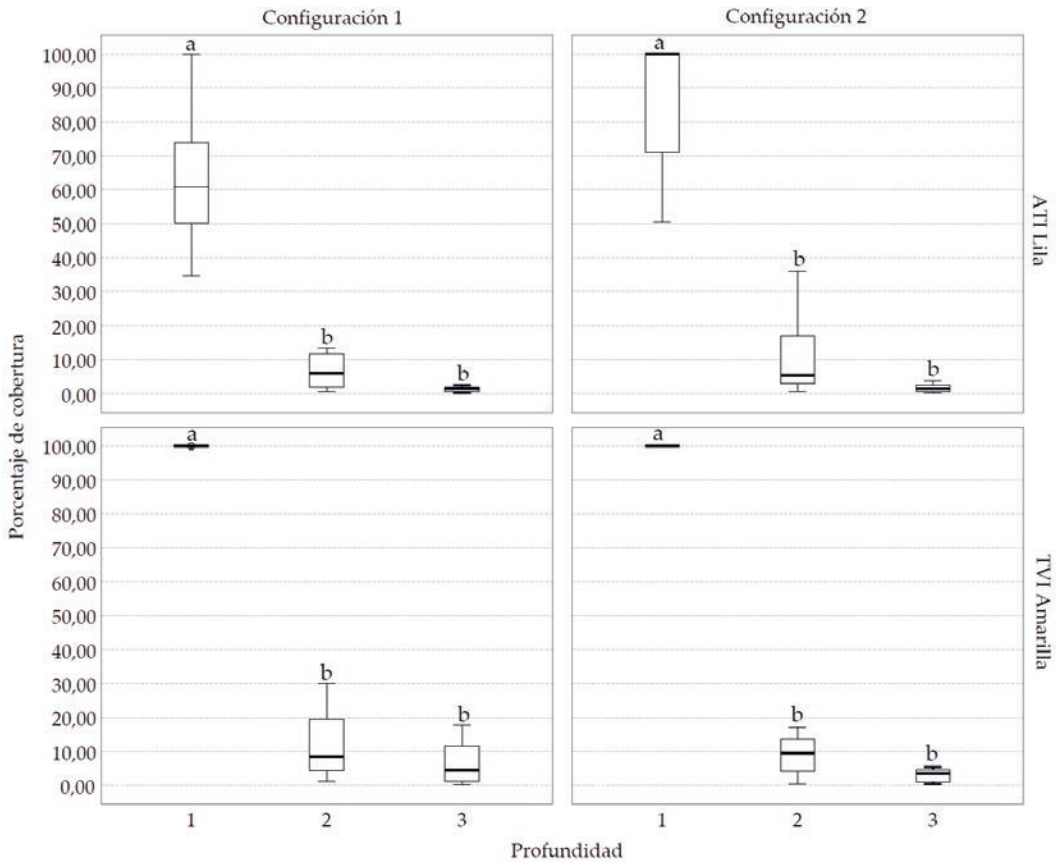


Figura 6. Mediana del porcentaje de cobertura en función del tipo de boquilla, configuración y profundidad estudiadas. Las cajas representan la mediana y el rango intercuartílico, los bigotes representan valores mínimos y máximos.

A pesar de las escasas diferencias observadas en el análisis estadístico, atribuibles al efecto de la boquilla o de la configuración de aire establecida, se muestra la Figura 5 como ejemplo representativo del perfil de mojado obtenido en función de la profundidad, para ambos tipos de boquilla y configuración. En concreto, se muestra la deposición observada in situ a 123 cm de altura (H3) respecto al suelo para una de las repeticiones. Análogamente a los resultados estadísticos, se observa la diferencia en la deposición de producto en la cara expuesta al pulverizador (profundidad 1) para ambos tipos de boquilla. En algunos trabajos se ha observado un aumento en la deposición de producto al aumentar el volumen de aire aportado [4, 11], sin embargo, otros han concluido que este aumento en el caudal de aire podría acarrear el efecto contrario cuando la boquilla utilizada presenta un tamaño de gota pequeño [12]. En este sentido y en este caso de estudio, si bien se han obtenido valores de cobertura del 100% en la cara externa del cultivo en todos los casos al utilizar un caudal de aire mayor, podría considerarse excesivo dada la distribución observada en el hidrosensible. El tamaño de gota asociado a la tipología de boquilla se observa de manera evidente en la Figura 5, así como la influencia del caudal de aire en el caso de las boquillas ATI. Sin embargo, son menos evidentes las diferencias en la deposición en función de dicho caudal en el caso de las boquillas TVI, resultados similares a los obtenidos por [13].

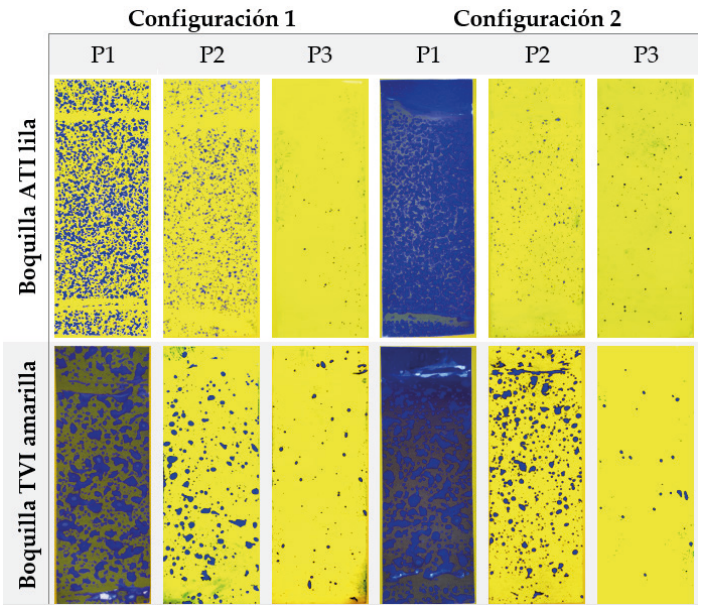


Figura 7. Ejemplo de deposición de producto en el cultivo a una altura de 123 cm respecto al suelo en función de la configuración de aire, boquilla y profundidad.

4. Conclusiones

La velocidad con la que el aire generado por el pulverizador atraviesa el cultivo está influenciada por la variación en el caudal de aire, asociado a una modificación en la sección de salida de los difusores y la relación de velocidad de giro del ventilador (4.774,60 $m^3 h^{-1}$ vs. 5.042,74 $m^3 h^{-1}$), obteniéndose valores de velocidad de aire mayores en todas las profundidades para un caudal mayor.

Por el contrario, para el estadio vegetativo estudiado, la deposición de producto no se vio influenciada por el caudal de aire o el tipo de boquilla, a pesar de haber diferencias en la distribución de las gotas sobre el papel hidrosensible en función del segundo factor. La deposición disminuyó con la profundidad, quedando reflejada una baja capacidad de penetración en el cultivo en todos los casos.

Mediante este estudio se puede concluir que, para estas características de vegetación concretas, un caudal más bajo de aire resultaría una buena opción para la aplicación, ofreciendo resultados aceptables de cobertura y con un consumo energético global inferior. Cabe destacar la necesidad de llevar a cabo estudios en esta línea, que permitan conocer la relación entre el caudal de aire aportado y la deposición de producto en estadios vegetativos diferentes, con el objetivo de conseguir una combinación óptima de parámetros de regulación de estos equipos de aplicación.

5. Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto PID2019-104289RB-C43, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/. Los autores desean expresar su gratitud a Ilemo Hardi S.A.U por proporcionar el pulverizador utilizado en este experimento.

Referencias

1. Balsari, P., M. Grella, P. Marucco, F. Matta, and A. Miranda-Fuentes. Assessing the influence of air speed and liquid flow rate on the droplet size and homogeneity in pneumatic spraying. *Pest management science* (**2019**). *75*(2), 366-379. doi:10.1002/ps.5120
2. Godyń, A., G. Doruchowski, W. Świechowski, and R. Hołownicki. The influence of nozzle configuration on the vertical distribution of spray. *Agricultural Engineering* (**2014**). *18*. doi:10.14654/ir.2014.152.082
3. Wegener, J.K., D. von Hörsten, T. Pelzer, and H.J. Osteroth. Basic research into different parameters influencing the quality of vertical distribution by crop sprayers. *landtechnik* (**2016**). *71*(1), 4-13.
4. Garcia-Ramos, F.J., M. Vidal, and A. Bone. Field evaluation of an air-assisted sprayer equipped with two reversed rotation fans. *Applied Engineering in Agriculture* (**2009**). *25*(4), 481-494.
5. Salcedo, R., C. Garcera, R. Granell, E. Molto, and P. Chueca. Description of the airflow produced by an air-assisted sprayer during pesticide applications to citrus. *Spanish Journal of Agricultural Research* (**2015**). *13*(2). doi:10.5424/sjar/2015132-6567
6. Garcerá, C., A. Fonte, R. Salcedo, A. Soler, and P. Chueca. Dose Expression for Pesticide Application in Citrus: Influence of Canopy Size and Sprayer. *Agronomy* (**2020**). *10*(12). doi:10.3390/agronomy10121887
7. Pergher, G. and N. Zucchiatti. Influence of canopy development in the vineyard on spray deposition from a tunnel sprayer. *Journal of Agricultural Engineering* (**2018**). *49*(3), 164-173.
8. Grella, M., P. Marucco, I. Zwertvaegher, F. Gioelli, C. Bozzer, A. Biglia, M. Manzone, A. Caffini, S. Fountas, and D. Nuyttens. The effect of fan setting, air-conveyor orientation and nozzle configuration on airblast sprayer efficiency: Insights relevant to trellised vineyards. *Crop Protection* (**2022**). 105921. doi:10.1016/j.cropro.2022.105921
9. van de Zande, J., J. Michielsen, H. Stallinga, P. van Dalfsen, and M. Wenneker. *Effect of air distribution and spray liquid distribution of a cross-flow fan orchard sprayer on spray deposition in fruit trees*. in *7th European Workshop on Standardized Procedure for the Inspection of Sprayers in Europe, Athens, Greece, September 26-28, 2018. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut 196, Braunschweig, 2018*. 2018.
10. Hołownicki, R., G. Doruchowski, W. Świechowski, and P. Jaeken. Methods of evaluation of spray deposit and coverage on artificial targets. *Electronic journal of polish agricultural universities* (**2002**). *5*(1), 03.
11. Delele, M.A., A. De Moor, B. Sonck, H. Ramon, B. Nicolaï, and P. Verboven. Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed. *Biosystems engineering* (**2005**). *92*(2), 165-174. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.05.018
12. Pai, N., M. Salyani, and R. Sweeb. Regulating airflow of orchard airblast sprayer based on tree foliage density. *Transactions of the ASABE* (**2009**). *52*(5), 1423-1428.
13. Salas, B., R. Salcedo, P. Ortega, M. Grella, and E. Gil. Use of ultrasound anemometers to study the influence of air currents generated by a sprayer with an electronic control airflow system on foliar coverage. Effect of droplet size. *Computers and Electronics in Agriculture* (**2022**). *202*. doi:10.1016/j.compag.2022.107381

Modelo de integración de tecnologías habilitadoras para la digitalización en invernaderos

F.J. Ferrández[1], S. Pardo[2], J. Muñoz-Acero[2], J.M. Cámara-Zapata[2]

[1] Grupo de Investigación de Informática Industrial y Redes de Computadores (I2RC). Universidad de Alicante; fjferran@dtic.ua.es

[2] Instituto Universitario de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental, de la Universidad Miguel Hernández de Elche (CIAGRO-UMH)

Abstract: The digitization in greenhouse control involves the incorporation of the so-called Digital Enabling Technologies, which represent the current technological level. The transition from automation to digitization signifies an advancement in the potential of digital services to optimize processes and resources. The work proposes an integration model that places the user at the center of the design and deploys a platform capable of integrating different types of technologies according to the installation's needs. The model is tested in a real installation where the proposed concepts are put into practice.

Palabras clave: User-Centred-Desing, Internet of Things - IoT, Inteligencia Artificial - IA

1. Introducción

Un invernadero automatizado que evoluciona hacia el invernadero digital utiliza una combinación de sistemas electromecánicos, robóticos y sensores que permiten monitorear las condiciones externas e internas, y realizar un control de estas últimas con el fin de optimizar la gestión del cultivo [1]. El diseño de estos sistemas y los servicios de la instalación varían en función del tipo de objetivos planteados, como pueden ser la optimización de los recursos, de la producción, los beneficios económicos, etc.

En trabajos previos de investigación se desarrollaron plataformas digitales que integran tecnologías habilitadoras como Internet of Things - IoT e Inteligencia Artificial – IA, con paradigmas de diseño orientados a usuario y hardware embebido con capacidad de procesamiento y comunicación [2, 3]. La arquitectura de estas plataformas permite la división de un mismo escenario en diferentes subsistemas interoperables e integrados mediante capas funcionales que permiten desplegar diferentes servicios.

Por otra parte, el paradigma de diseño orientado al usuario (User Centred Design – UCD) pone de manifiesto la importancia de la participación del productor-técnico como actor clave en la toma de decisiones iniciales y en el desarrollo de los servicios digitales, junto a los expertos en tecnologías habilitadoras. La integración de estas tecnologías permite avanzar en el diseño y desarrollo de instalaciones más inteligentes, con mayor capacidad de ofrecer al usuario información relevante y con menor dificultad en su puesta en funcionamiento, uso y mantenimiento. En este trabajo se expone el diseño y el desarrollo de una plataforma para la monitorización, control y optimización de procesos en un invernadero de tomate con integración de malla fotovoltaica móvil en el CIAGRO-UMH.

2. Materiales y métodos

Las diferentes fases que se establecen para el desarrollo de la plataforma siguen una metodología basada en el paradigma de diseño centrado en el usuario (UCD), que involucra a los diferentes actores. En la Figura 1 se indican las fases del modelo propuesto.

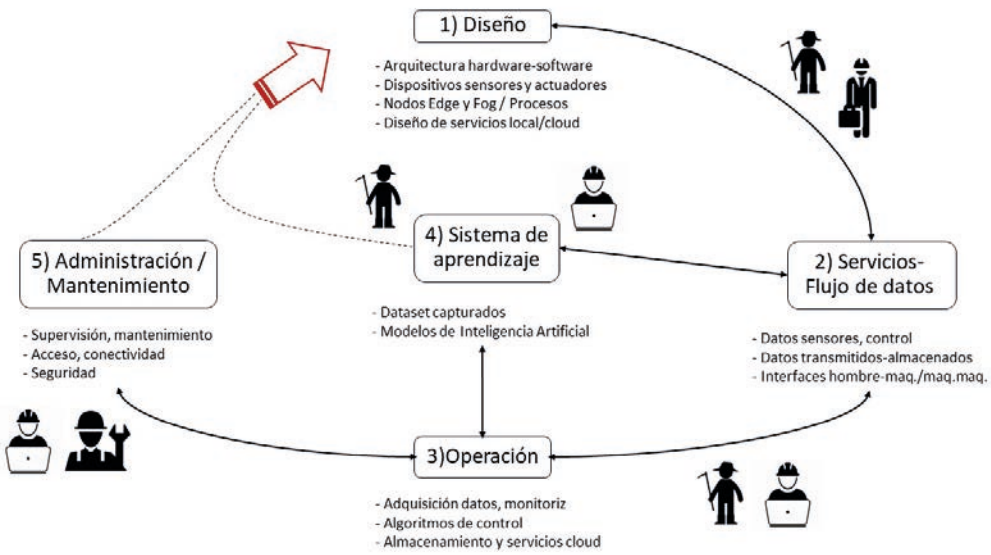


Figura 1. Fases de la metodología del diseño orientado al usuario

2.1. Diseño de la plataforma

El modelo proporciona un soporte tecnológico válido para cualquier tipo de infraestructura inicial, escalable a las ampliaciones previstas y adaptable a los requerimientos de los usuarios. Mediante una arquitectura de comunicaciones basada en los paradigmas del Internet de las Cosas (IoT) se parte de un modelo de capas sobre el que despliegan los servicios de monitorización, control y generación de eventos, entre otros (Figura 2).

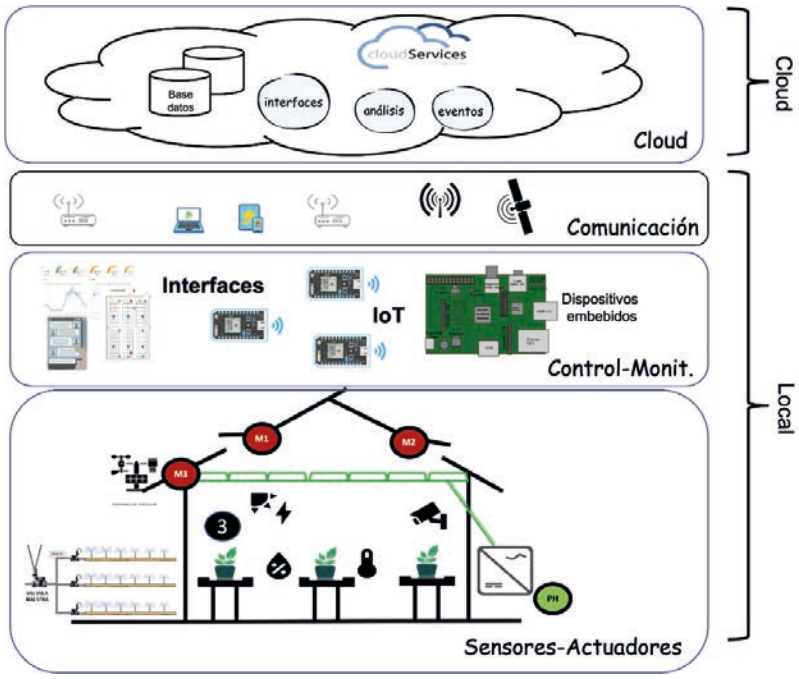


Figura 2. Modelo de capas basado en paradigma IoT

El paradigma IoT permite desplegar sistemas abiertos, con alta capacidad de comunicación y tratamiento de datos, con un coste ajustado a las necesidades y facilidad para su uso y aprovechamiento.

Los materiales utilizados se basan en sistemas embebidos (arquitectura ARM y ESP) con capacidad de cómputo, que incorporan interfaces de comunicación para protocolos IoT (MQTT) y pueden almacenar datos de sensores en bases de datos especializadas. Estos sistemas embebidos incorporan sistemas operativos OPEN-SOURCE. Los sensores y transductores pueden ser conectados a sistemas embebidos, o inalámbricos que incorporan interfaces de comunicación de bajo consumo (BLE) con los sistemas embebidos.

El diseño de la instalación es el primer hito a cumplimentar (Figura 1). En esta fase, tanto el experto TIC, como los usuarios (agricultores, técnicos) describen el punto de partida y los requerimientos de los servicios digitales a desarrollar, introduciendo la información de soporte para abordar la fase 2. En esta fase se propone el diseño de las interfaces y del flujo de datos de los sensores y actuadores, lo cual marcará la infraestructura TIC necesaria.

En la fase 3 se completa el ciclo con la incorporación y puesta en servicio de los algoritmos de control, almacenamiento y despliegue en la nube. La fase de operación dará lugar a un conjunto de datos que, además de ofrecer el estado de la instalación y de controlarla, deberá alimentar los algoritmos de *machine learning* y de predicción basados en IA. Finalmente se implementa una fase de administración, mantenimiento y actualización de la plataforma TIC.

2.2 Adaptación al invernadero del CIAGRO-UMH

El invernadero multicapilla tiene 26 m de ancho, 36 m de profundidad, 4 m de altura hasta el canal y 5 m hasta la cumbrera, con cerramiento de malla de monofilamento transcarnado de densidad 10 x 16. Los objetivos marcados en la fase 1 son instalar los servicios básicos de la plataforma (capa de toma de datos, capa de control, capa de comunicación y capa de servicios cloud), desplegar sensores de suelo y ambientales que puedan ser utilizados para optimizar el riego, compatibles con la plataforma, monitorizar una malla de sombreo con capacidad de generar energía fotovoltaica, desplegar un conjunto de interfaces de usuario (paneles de monitorización) y diseñar los datasets necesarios para el diseño de servicios basados en el reconocimiento de patrones.

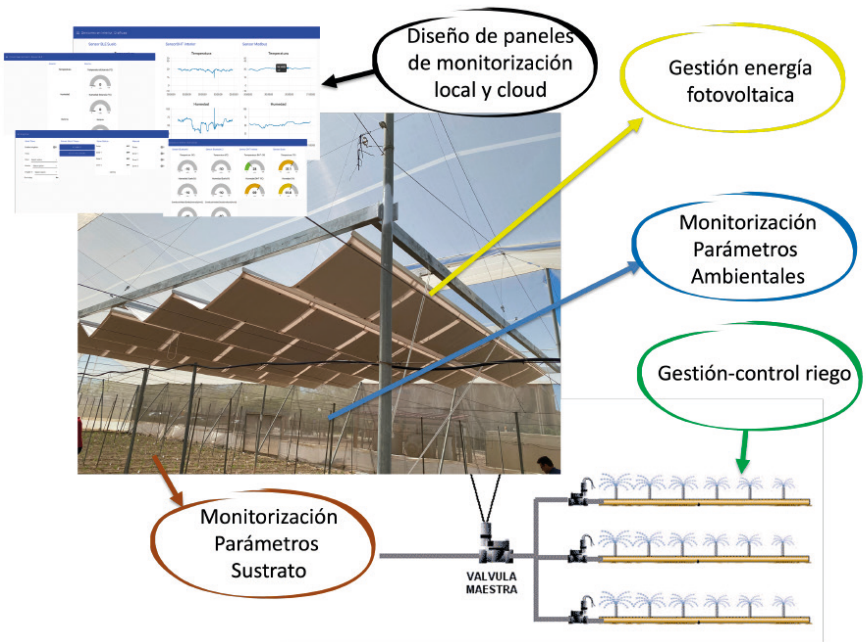


Figura 3: Invernadero del CIAGRO-UMH. Fase de diseño y definición de servicios

3. Resultados y discusión

3.1. Servicios

Para poner en marcha la red se propuso el empleo de varios servicios especializados en el IoT. Los nodos de gestión y de captura de datos tienen un sistema operativo instalado para desplegar servicios de monitorización y control (Node-RED), comunicación IoT (MQTT), almacenamiento (InfluxDB), interfaz HMI (HOME-ASSISTANT) y trazabilidad (formularios web, tecnología QR, tecnología NFT) destacando sus ventajas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ventajas clave de cada componente de la plataforma IoT

Componente	Ventajas
Protocolo MQTT	- Alta eficiencia en IoT con dispositivos de baja potencia y redes no confiables - Comunicación bidireccional para recopilación e intercambio de datos en tiempo real
Node-RED	- Simplificación significativa de la creación y gestión de aplicaciones de IoT - Conexión fácil de componentes mediante flujos de trabajo personalizados - Mejora de la flexibilidad de la plataforma
InfluxDB	- Almacenamiento y análisis eficientes de datos en tiempo real - Capacidad para manejar grandes volúmenes de datos de alta velocidad - Funcionalidades de consulta y agregación para la obtención de información valiosa
Interoperabilidad	- Facilidad de integración con otros sistemas y protocolos en entornos de IoT - Maximización de la compatibilidad - Posibilidad de expansión de la plataforma con dispositivos y servicios adicionales

La utilización de contenedores informáticos o dockers facilitó la implementación y el mantenimiento de la plataforma IoT. La capacidad de empaquetar y distribuir fácilmente las aplicaciones y sus dependencias permitió una rápida puesta en marcha de los nodos y una gestión eficiente de los recursos. Además, la combinación de MQTT, Node-RED e InfluxDB en los contenedores informáticos pone en funcionamiento una plataforma IoT potente, flexible y

fácil de mantener. Esta arquitectura presenta ventajas significativas en términos de implementación, escalabilidad, eficiencia de comunicación, programación visual y almacenamiento de datos.

3.2 Puesta en marcha

A partir de las fases iniciales se desplegó una red IoT formada por tres nodos: nodo de gestión, nodo de captura de datos de sensores y nodo de captura de datos energéticos.

El nodo de gestión de la plataforma se configuró con un sistema embebido (arquitectura ARM) con un sistema operativo Linux y una capa docker que permitió la instalación de los contenedores necesarios. La implementación de los contenedores se realizó mediante el uso del comando docker-compose y el archivo de configuración correspondiente. La instalación de los contenedores se llevó a cabo sin problemas, y se verificó su correcto funcionamiento accediendo a InfluxDB (base de datos), Node-RED (plataforma de control) y MQTT (protocolo de comunicación) Broker Mosquitto a través de las direcciones y puertos correspondientes.

El nodo de captura de datos de sensores ambientales y de sustrato también se configuró con un sistema operativo Linux y una capa de contenedores docker. En este caso, se excluyó el servicio de la base de datos InfluxDB de la configuración.

El nodo de captura de datos de energía consistió en un sistema embebido conectado a la intranet de control. Se desplegó un servidor web que mostraba los datos de corriente, tensión, potencia y energía de los canales correspondientes. Para la integración de estos datos en la plataforma, se utilizó un add-on específico del dispositivo (shelly-EM) en la plataforma open-source HOME-ASSISTANT.

La Figura 4 muestra la puesta en marcha de los nodos y las interfaces de la plataforma. La implementación de los nodos de gestión y captura de datos de sensores permitió un despliegue eficiente de los servicios requeridos, mientras que el nodo de gestión energética demostró su capacidad para capturar y enviar datos de energía de manera efectiva. Estos resultados respaldan la viabilidad y el funcionamiento adecuado de la plataforma en el entorno de IoT. Sin embargo, es importante destacar que se requerirá un seguimiento continuo y posibles ajustes en el futuro para garantizar un rendimiento óptimo y una integración exitosa con los dispositivos y servicios adicionales.

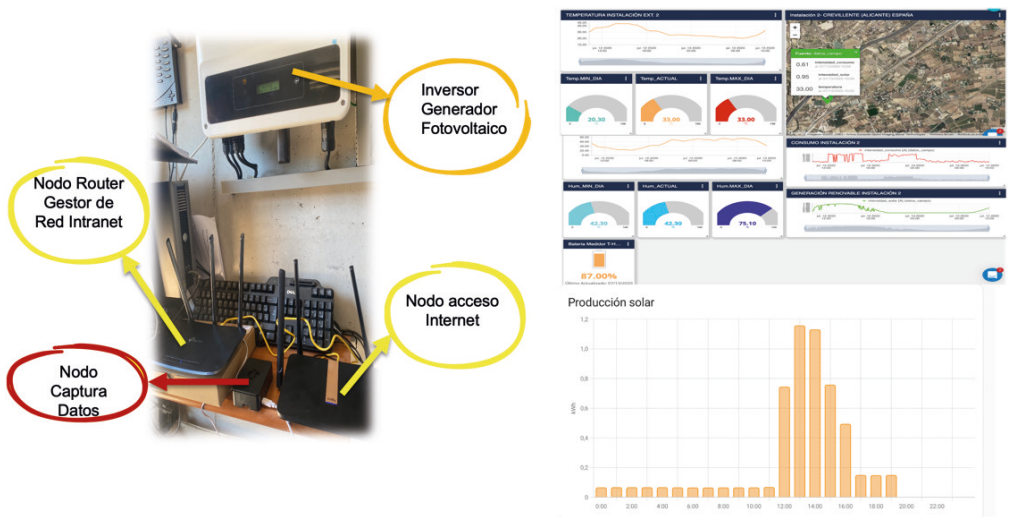


Figura 4: Puesta en marcha de la plataforma. Nodos, interfaces de control y monitorización de la producción solar

3.3 Captura de datos. Análisis y propuesta de un sistema de aprendizaje

Los sensores fueron capaces de enviar información al sistema de monitorización, captura y análisis después de la instalación de los nodos de la red y testado de su funcionamiento. El modelo de aprendizaje automático propuesto se basa en paradigmas de *Machine Learning* ya que permite analizar y diseñar patrones en los datos para optimizar el control de las variables en el invernadero. Se puede entrenar algoritmos de aprendizaje supervisado o no supervisado, dependiendo de si los datos están etiquetados (con información sobre las condiciones óptimas para tus plantas) o no.

Para llevar a cabo este modelo de aprendizaje se planteó seguir las siguientes fases:

1. Elegir las características relevantes para invernadero: temperatura, humedad, consumo eléctrico, generación con placas fotovoltaicas, y descarte de aquellas que no fueron útiles.
2. Recopilación y preprocesamiento de datos: Los datos estaban completos, limpios y en un formato adecuado para el algoritmo que se diseñó.
3. Selección de un algoritmo de aprendizaje automático ajustado a las necesidades y datos. Se presentaron como posibles algoritmos: regresión lineal, árboles de decisión, K-Vecinos más cercanos y redes neuronales.
4. Entrenamiento del modelo: Dividiendo los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba asegurando ajustar los parámetros del algoritmo para obtener el mejor rendimiento.
5. Implementación del modelo: Una vez probado el rendimiento del modelo, se pudo implementar en el invernadero para controlar automáticamente las variables clave y optimizar la gestión del cultivo.

Un modelo de aprendizaje automático es un archivo que se entrena para reconocer determinados tipos de patrones, pudiendo entrenar un modelo con un conjunto de datos y proporcionarle un algoritmo que puede usar para obtener información de esos datos [4, 5]. Por ello, el uso del aprendizaje automático en la captura de datos y análisis en un invernadero ofrece una solución efectiva para mejorar el control de variables y optimizar las condiciones de cultivo. Este enfoque proporciona beneficios significativos en términos de rendimiento y calidad de los cultivos.

4. Conclusiones

El modelo propuesto, a través de la implementación de una red de nodos de sistemas embebidos programables, con interfaces de comunicación IoT, unido al diseño de servicios especializados de monitorización y control, ha demostrado ser una solución viable, de fácil implementación y aceptación por parte de los usuarios finales de los servicios de la plataforma.

La propuesta de la automatización en la captura y análisis de datos en un invernadero ofrece beneficios en el control de variables y optimización de condiciones de cultivo. Los resultados obtenidos con el uso y aceptación de la plataforma validan el modelo. El diseño de un sistema de aprendizaje basado en paradigmas de inteligencia artificial forma parte de la evolución de este tipo de instalaciones, una vez la plataforma desplegada es utilizada y explotada a través de sus fuentes de datos y del conocimiento de los expertos.

5. Agradecimientos

Este estudio forma parte del programa AGROALNEXT (AGROALNEXT/2022/048) y ha sido apoyado por MCIN con financiación de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y

de la Generalitat Valenciana. También ha sido realizado gracias al proyecto AGCOOP_A/2022/004 financiado por la Agencia Valenciana de fomento y garantía agraria, con fondos de la Unión Europea, el Ministerio de agricultura, pesca y alimentación y la Generalitat Valenciana.

Referencias

96. Romera, P. Invernadero digital: una realidad. S.f., Descargado de https://www.agrointeligencia.com/invernadero-digital-una-realidad/ (Accedido el 13 de abril de 2023)
97. Ferrández-Pastor, F. J., García-Chamizo, J. M., Nieto-Hidalgo, M., y Mora-Martínez, J. Precision agriculture design method using a distributed computing architecture on internet of things context. Sensors. 2018, 18 (6), 1731.
98. Ferrández-Pastor, FJ; García-Chamizo, JM; Nieto-Hidalgo, M.; Mora-Pascual, J.; Mora-Martínez, J. Desarrollo de una plataforma de red de sensores ubicuos utilizando Internet de las cosas: aplicación en agricultura de precisión. Sensores. 2016, 16 (7), 1141.
99. QuinnRadich, e., v-alje. Modelo de aprendizaje automático. S.f., Descargado de https://learn.microsoft.com/es-es/windows/ai/windows-ml/what-is-a-machine-learning-model (Accedido el 13 de abril de 2023)
100. Catraio, R. A. Guía de 4 pasos para la implementación del modelo de aprendizaje automático. S.f., Descargado de https://cynoteck.com/es/blog-post/model-deployment-guide/ (Accedido el 13 de abril de 2023)



Towards a sustainable water use in apple orchards with permanent mulch: a study case on Lis Valley, Portugal

S. Ferreira[1], J. M. Sanchéz[1], J. M. Gonçalves[2]

[1] UCLM Universidad de Castilla-La Mancha, Instituto de Desarrollo Regional, 02071 Albacete, Spain; susana.carvalho@alu.uclm.es; juanmanuel.sanchez@uclm.es

[2] IPC Instituto Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária de Coimbra, Coimbra, 3045-093 Coimbra, Portugal; jmmg@esac.pt

Abstract: Apple orchards have a high representation in terms of agricultural production in the Western region of Portugal. To ensure productivity, this crop must be irrigated. Due to environmental issues, permanent mulching in orchards has been progressively used as an accepted practice in the management of orchards. As a contribution to the performed studies, an experimental field work is under development in the Lis Valley Irrigation District, Portugal. Monitoring technologies are being applied on several crops, using sensors and telemetry, assessing its performance. The objective is to calculate the water needs of apple orchards, with permanent cover of the soil, allowing to develop an irrigation schedule from a water saving perspective, to achieve a sustainable cultivation of apple orchards. The preliminary results were obtained from ground observations, using portable equipment, and will be used to calibrate the results provided by satellite images in further studies.

Keywords: Apple orchard; Lis Valley Irrigation District; permanent mulching; water management

1. Introduction

Apple orchards are a perennial crop with high representation in terms of agricultural production worldwide, with China being the main producer. In Portugal, the most recent statistics, from 2021, indicate that the cultivated area represents 13.920 hectares, and the production reached 368.230 tons, being the 8th most produced commodity [1]. During the growing season, rainfall amounts do not cover crop evapotranspiration requirements, so modern fruit orchards need to be irrigated during the fruit growth phase, in opposition to the traditional system of cultivation in marginal irrigated areas. A better understanding of the soil water balance and factors that control crop evapotranspiration are critical for proper irrigation management, to ensure uniform distribution of water and nutrients and optimization of production quality, in terms of fruit size and organoleptic, nutritional and conservation characteristics.

Permanent mulching has been used as an accepted practice in the management of orchards [2,3]. Comparing this technique to conventional mobilization of the soil, proves to be more favourable for the orchard: i) increases soil structure and fertility; ii) regulates the microclimate of the orchard, reducing wind speed and soil temperature fluctuations; iii) reduce soil erosion; iv) reduces the pest population and weeds, increasing the abundance of natural enemies of orchard pests; v) improves production and fruit quality and vi) regulates the composition of the soil microbial community [4-9]. Lanauskas et al. studied the effect of permanent mulching in an apple orchard of the *Lodel* variety and verified that there were correlations between tree productivity and the quality of the fruits [10].

According to the methodology suggested by the Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), crop water requirements are commonly calculated by multiplying the reference evapotranspiration (ET_o) by the crop coefficient (K_c) to estimate the actual

evapotranspiration (ET_a) of a particular crop [11]. The RS approach has been used as an alternative for the calculation of K_c, in particular through the use of vegetation indices (VI's) derived from satellite data [12]. As a contribution to this study, an experimental field work is under development carried out in the Lis Valley Irrigation District (LVID), located in Coastal Center of Portugal. The objective of this preliminary study consist of discuss the contribution of permanent cover of the soil, mainly rainfed mulching, on soil water balance. Therefore, this study aims to contribute to improve irrigation water use in LVID, considering the sustainability and response to climate change of local production of apples.

2. Material and Methods

2.1. Lis Valley Irrigation District study site

The study site was LVID, located in the Administrative District of Leiria (Central Coast of Portugal), with a total area of 2136 ha, while the irrigated area represents about 1639 ha [13]. The climate is Cbs type (Köppen climate classification) and is characterized by temperate summers and winters with mild temperatures. Rainfall is concentrated mainly from October to March and the average values decrease from the headwaters of the Lis Valley basin towards the coastal region. Its annual average temperature is 15.9 °C and annual average rainfall is 790 mm [14]. The soils are alluvial type, with different textures that vary between clayey, sandy-clay and sandy [15] and have great agricultural value, although some areas are poorly drained. The irrigation infrastructure comprises Lis River, as water source, an irrigation network (with canals), and a drainage network, supported by pumping stations and portable electric pumps for temporary use. Also, the system was reinforced with dams and weirs, to ensure the existence of sufficient water reserves during periods of scarcity. This is a common model in the countries of the Mediterranean basin, where rainfall fluctuates over the course of the year and the collective management of water supplies and irrigation are crucial for agriculture [16].

Fruit production (including apples, pears and small fruits) occupy nearly 20 ha of the total irrigated area in LVID [13] and it is expected that these crops will have a very large expansion in the near future. Apple orchards are mainly cultivated by one familiar enterprise. The experiments focused on a plot owned by this farmer, identified as "Vitor Duarte Experimental Plot" (N 39°51'36.74", W 8°52'9.52"), with an area of 3 ha (Figure 1) occupied since 2014 with "Fuji" and "Gala" apples, with a spacing of 4 x 1 meters. The average yield is 30 tons per hectare. Soil has a silty clay texture, with 2.6% of organic matter and a PH of 8.1. The soil electrical conductivity (EC) was 0.21 mS cm^{-1}, which indicates the absence of salinity effects. The irrigation is done by drip irrigation, starting in mid-May-June, and ending a week before the harvest. Drainage conditions were reasonable and the water table is high, being controlled by a network of ditches. Fertilization is based on phosphorus and potassium, being incorporated into the crop through fertirigation. The soil is permanently occupied with spontaneous Poaceae and Fabaceae species (Figure 2), which are cut 3 times a year: 1) in January-February, when the pruning firewood is incorporated into the soil; 2) in May, in mid-spring and 3) in August, before the harvest. The most worrisome weed is *Convolvulus arvensis*, which climbs apple trees, wrapping itself around the trunk, which can interfere with yield. The main phytosanitary problems are caused by *Venturia inaequalis*, which causes apple scab disease, and by powdery mildew, whose treatments, carried out using a towable atomizer, are always preventive. The farmer resorts to the mass capture of *Drosophila melanogaster*, through food baits containing attractant and insecticide, installed on the borders of the orchard. In recent years, the presence of various birds that nest in the orchard has been notorious, namely pheasants, blackbirds, and jays, as well as auxiliary insects (e.g. *Chrysoperla carnea*).

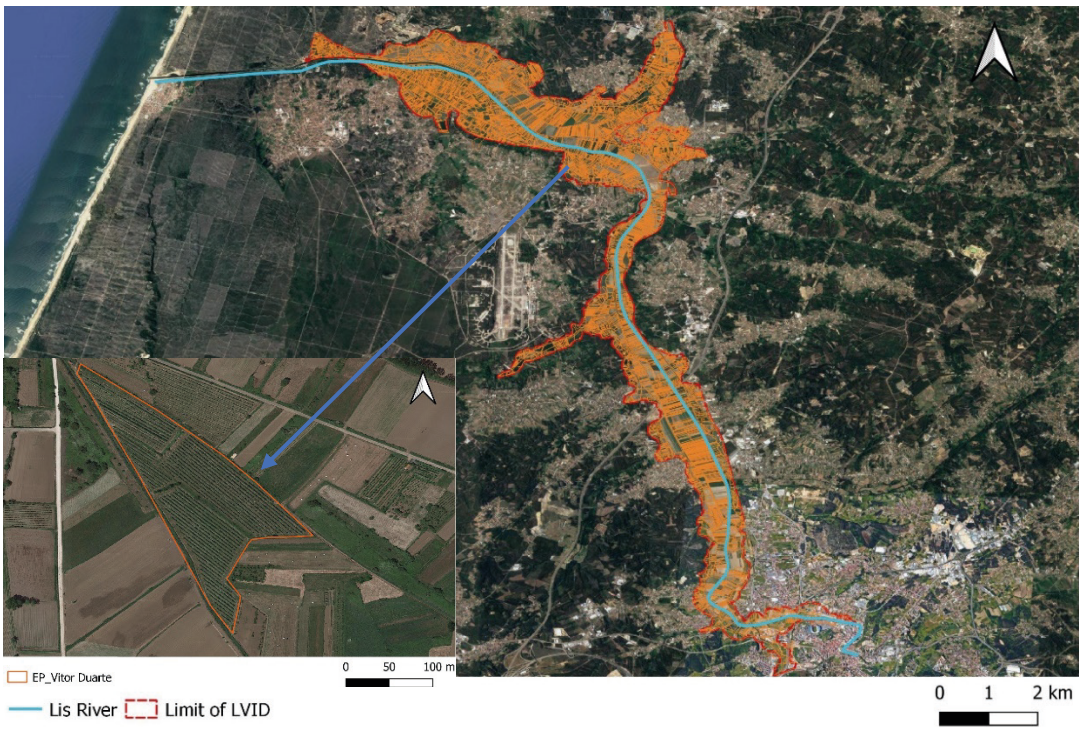


Figure 1. Geographic location of LVID. Red line represents the delimitation of LVID, blue line represents Lis river and orange lines represent the limits of the plots. In the lower left corner is presented the configuration of "Vitor Duarte Experimental Plot" (orange line) (source: Google Earth, https://earth.google.com, accessed on 12th May 2023).



Figure 2. Permanent mulching of the orchard (picture taken in 12th June 2023).

2.2. Weather Station, Reference and Actual Evapotranspiration through the FAO56 Methodology

The weather conditions during the two study seasons were measured from an automated agrometeorological station (N 39°51′22.32″, W 8°50′56.44″), located at a distance of 1.8 km from the experimental plot (Figure 3a). The variables measured were: air temperature, relative humidity, wind speed, wind direction, daily average incoming solar radiation, and precipitation.

The evapotranspiration was calculated following the FAO-56 single crop coefficient approach [11], as follows:

$$ET_a = K_c \; ET_o$$

where ET_a is crop evapotranspiration (mm d^{-1}), K_c is the crop coefficient according Table 12 of FAO and ET_o is the reference evapotranspiration. The daily ET_o values were calculated using the FAO56 Penmann–Monteith reference ET equation for grass [11]:

where R_n is the net radiation (MJ m^{-2} d^{-1}), G is the soil heat flux density (MJ m^{-2} d^{-1}), T is the air temperature at a 2 m height (°C), u_2 is the wind speed at a 2 m level (m s^{-1}), e_s is the saturation vapor pressure of the air (kPa), e_a is the actual vapor pressure (kPa), Δ is the slope vapor pressure curve (kPa $°C^{-1}$), and γ is the psychrometric constant (kPa $°C^{-1}$).

2.3. Field data aquisition

The observations include:

i) Measurement of soil moisture content: the field measurements were taken in 3 points, in the same line: near the beginning of the line; in the middle; and near the end of the line, using a portable TDR probe model H2D IMKO (Figure 3c). The probe measured soil EC, simultaneously with soil moisture content percentage. Measurements were collected during June-August of the two seasons, at 20, 30 and 50 cm depth.

ii) Measurement of NDVI: for the assessment of the satellite estimates of this key input, the field measurements of the NDVI were conducted near the 3 points indicated in i), using a GreenSeeker Handheld Crop Sensor, and were used as ground truth (Figure 3b). Measurements were collected during June-August of the 2020 season. Due to the height of the canopy, an extensor was necessary. The sensor was handheld over the canopy and over the permanent mulching, obtaining differentiate measures, at an average height of 1 m and the existence of a remote switch allowed for capturing the NDVI measures with precision.

iii) Ground water: a piezometer was installed with 3 m depth, to measure the height of the water table, near the line where the observations was made.



Figure 3. Measurement of soil moisture, with portable probe (**a**), GreenSeeker Handheld Crop Sensor being used in maize (**b**) and automatic agrometeorological station (**c**).

3. Results and Discussion

3.1. Meteorological and soil data

Meteorological data obtained for 2019 and 2020 are presented in Figures 4 and 5. Monthly averages of mean air temperature ranged between 7.8–22.9 °C. Cumulative rainfall resulted 707 mm in 2019 and 715 mm in 2021, mainly concentrated in September-November, although March 2020 was considerably rainy. In terms of temperature, the summer of 2019 was cold and dry while in 2020 hot periods were registered in May, July and September (occurrence of a heatwave). The

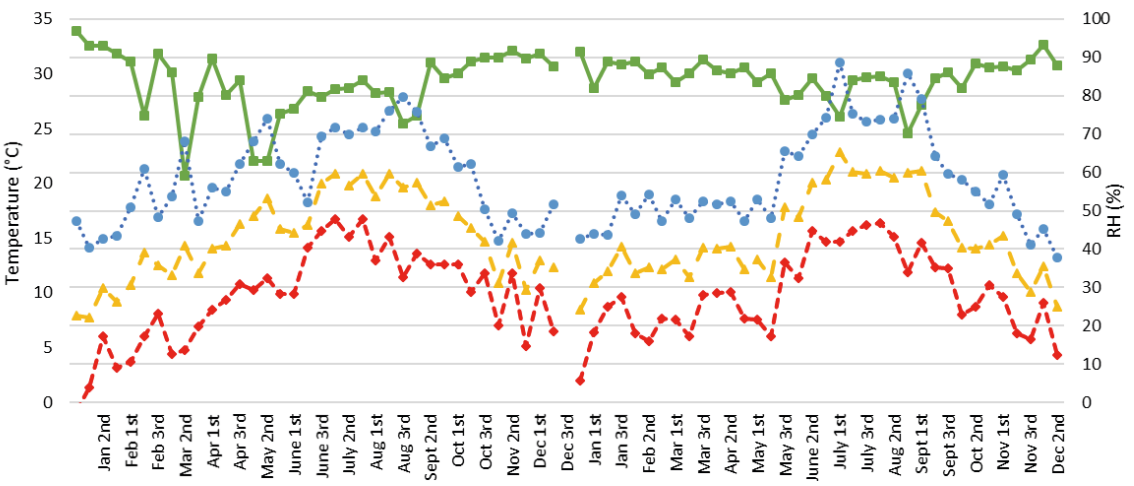


Figure 4. Temperature and Relative Humidity (RH) during 2019 and 2020 (ten-days data). T_{max} is the maximum air temperature, T_{mean} is the mean air temperature, T_{min} is the minimum air temperature and RH is the relative humidity. 1st is the period of the first ten days of each month, 2nd is the period between day 11

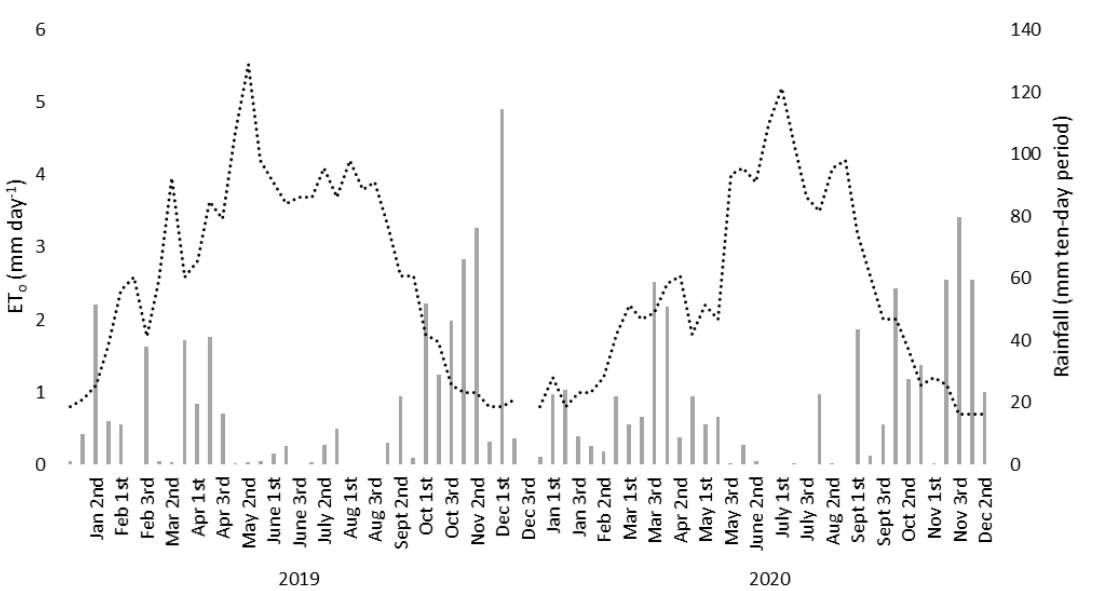


Figure 5. Daily ET_o (10-day average values) and rainfall (accumulated) during 2019 and 2020.

3.2. Crop coefficients, actual evapotranspiration and growing period stages

The crop coefficient curve for apple orchards with permanent mulching, according to FAO, is illustrated in Figure 6. As the soil in the interline of the orchards was permanently covered, a K_c of 0.8 after leaf drop was considered, during the period from December to end of February. Growing period stages are also represented in Figure 6: i) Winter rest: at the beginning of autumn, the tree completely loses its foliage and begins a dormancy phase that will last all winter; ii) Flowering: in early spring, new leaves appear and flower buds emerge, which will quickly give way to flowers; iii) Pollination: in mid-spring, apple trees are full of clusters of white or pink flowers; iv) Fruit development: At the end of spring and beginning of summer, there are already small apples on the trees and some are removed so that the rest can grow more and reach adequate sizes (calibers); v) Harvest: at the end of summer and beginning of autumn, the fruits, now ripe, must be harvested to be introduced into the marketing circuit.

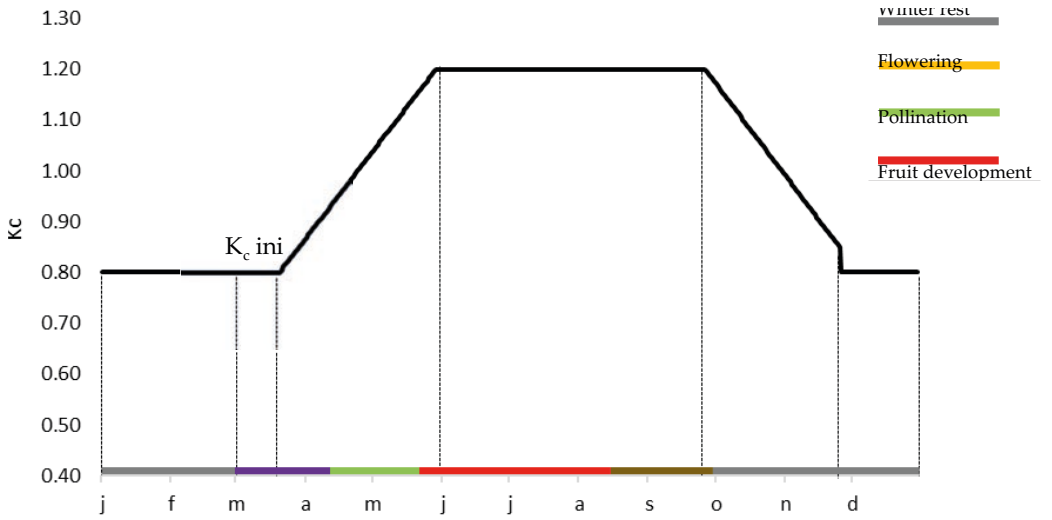


Figure 6. Crop coefficient curve calculated for apple orchards with permanent mulching [11], in the initial stage ($K_{c\ ini}$), mid-season stage ($K_{c\ mid}$) and at the end of the late season stage ($K_{c\ end}$). The K_c after leaf drop was adapted from Table 12. The length of the crop development stages was adapted from Table 11. Color bars represent the growing period stages.

Following the FAO56 methodology, and suggested values of K_c, as described in Section 2.2, the accumulated ET_a resulted 996 mm in 2019 and 890 mm in 2020 (Figure 7). ET_a values were higher than those obtained by ET_o, because of the positive contribution given by K_c.

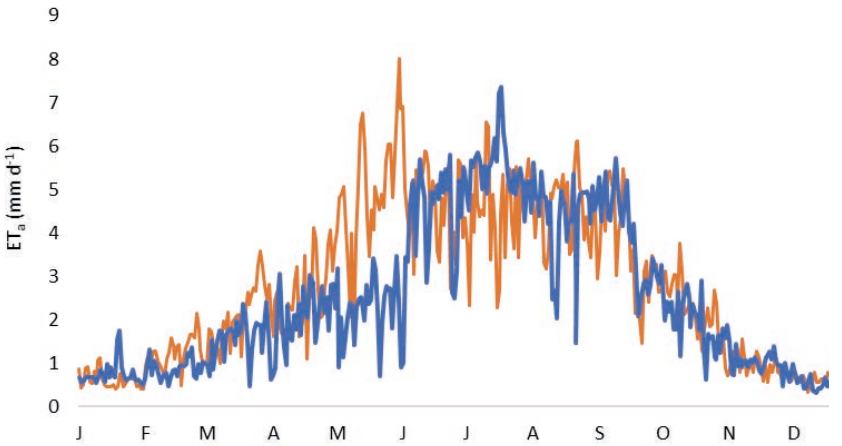


Figure 7. Comparison between daily ET_a calculated during 2019 and 2020 growing seasons.

3.3. Ground observations

The water depth above soil surface ranged, on average, between 0.50-0.60 m, during the two seasons, as illustrated in Figure 8. In 2020, this value peaked in the observation of 14th July, as a consequence of a flood irrigation.

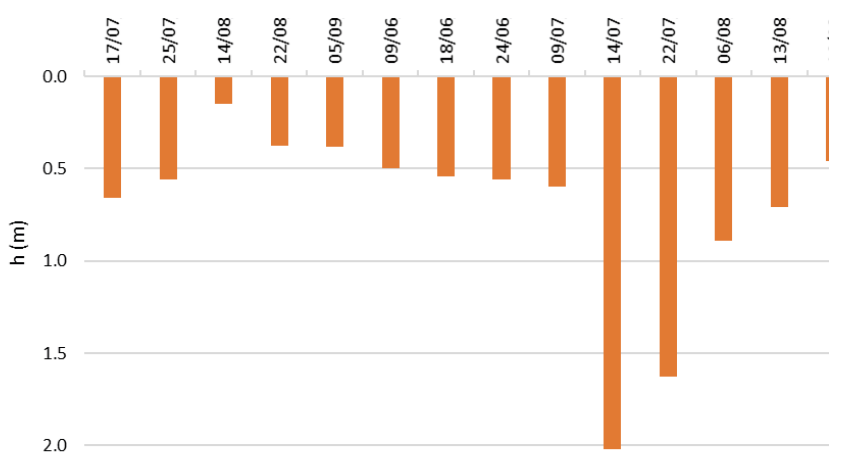


Figure 8.

The soil moisture content percentage in the two seasons is shown in Figure 9, and integrates the average for the three measurement points. The major values were observed at 50 cm by approximation of the water table.

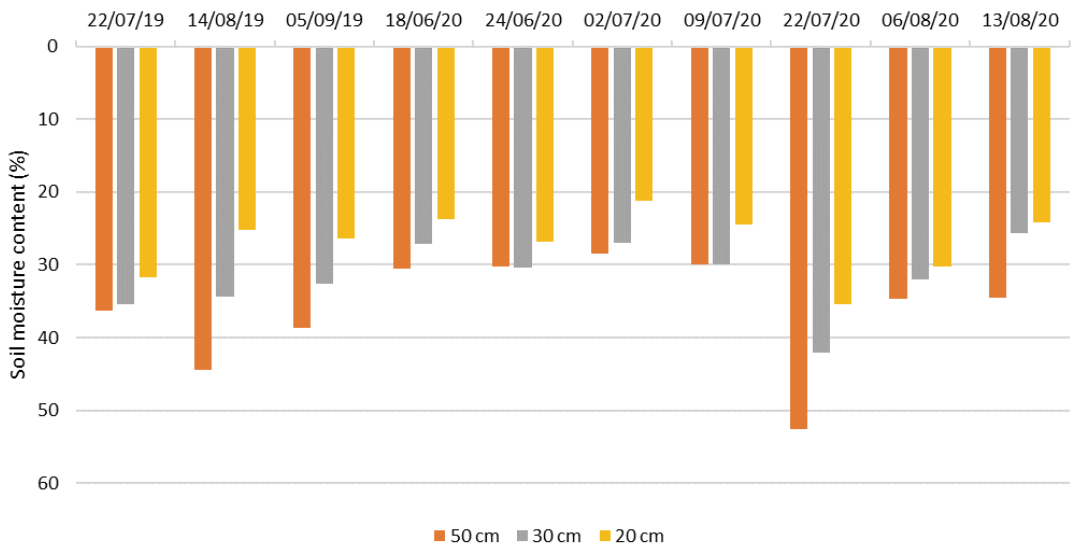


Figure 9. Average soil moisture content (%) at 20, 30 and 50 cm depth, in 2019 and 2020. Error bars indicate the variability in the three measurement points.

Soil available water content was calculated in relation to field capacity and permanent wilting point of each layer (Figure 10). The total available water (AW) was 78.5 mm, while the available water (SWS) varied between 29 mm and 78.5 mm.

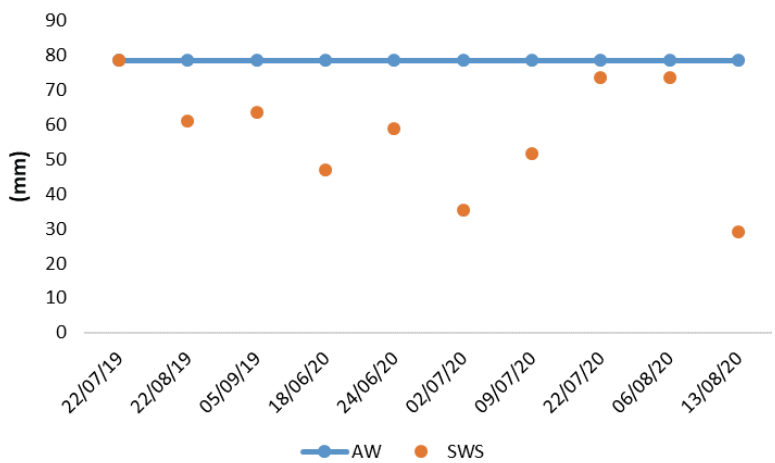


Figure 10. Total Available water (AW) and soil water storage (SWS) of the soil.

The NDVI measured in the 2020 season is plotted in Figure 11, presenting the values measured in mulching and in apple trees. Since the space between rows is 4 meters (the tree canopy projects by about 1 meter and the mulching by 3 meters) the NDVI obtained was multiplied by 25% for the tree canopy and 75% for the area covered. The Figure also shows the constant Kc tabulated in the FAO for the 120 days' length for middle phase (1.15), within the observations were made. A relation between average NDVI of mulching plus apple trees (0.61, represented with a dashed line) and K_c can be suggested as: $K_c = 1.88$ NDVI (the coefficient 1.88 is the ratio 1.15/0.61). This result deserves further discussion, as it raises the question of greater

variation and lower value of NDVI in the rainfed mulching between rows, because of high variability during summer. In practice, the FAO suggestion of a continuous K_c advocates irrigated mulching during the summer season, which does not happen on the plot under study, since irrigation is carried out by dripping and the water table is located at about 50-60 cm, as shown in Figure 8.

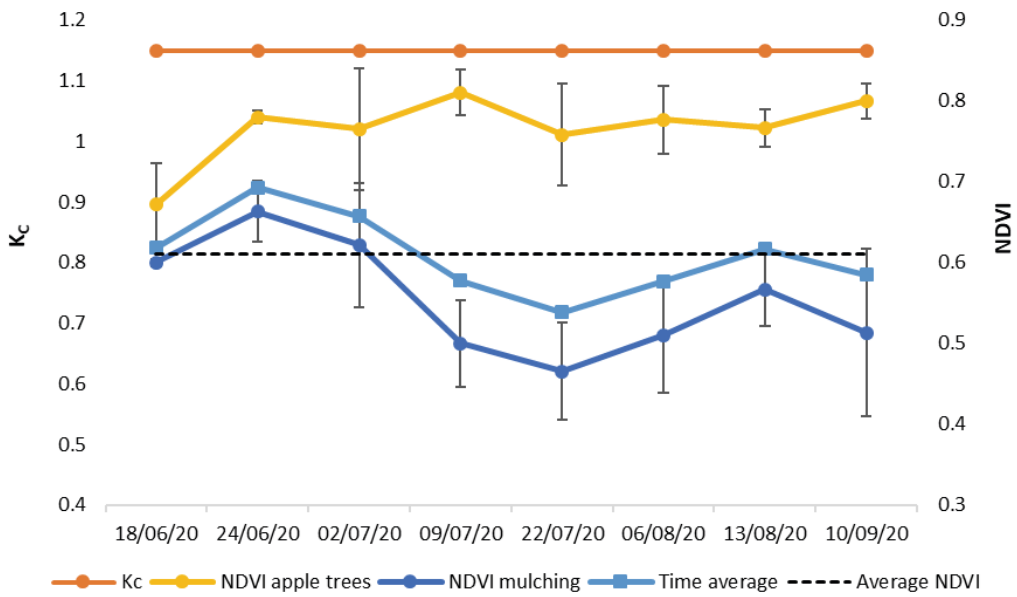


Figure 11. Average NDVI observed in 2020 measurements and K_c tabulated in FAO during middle stage. Error bars indicate the variability in the three measurement points.

4. Final considerations

This work shows some preliminary results in the framework of a more comprehensive effort to improve our understanding and characterization of water management practices in apple orchards. FAO56 suggests K_c values for orchards with irrigated permanent ground cover, which does not apply to rainfed orchards, with variability during summer, such as the plot under study. Further studies will focus on the quantification of the K_c of non-watered mulching, distinguishing from the K_c of apple trees, using RS tools, including a drone flight and satellite images. This study will be developed with the aim of showing the potential of the RS-assisted method for monitoring water use and water productivity in apple orchards, becoming a useful and free tool available to farmers.

5. Acknowledgments

- Project Grupo Operacional para a Gestão da Água no Vale do Lis, PDR2020-1.0.1-FEADER-030911, funded by Program PDR2020, co-funded by FEDER, Innovation Measure, Portugal.

- PhD research grant funded by Portuguese Foundation for Science and Technology, ref. 2020.07088.BD.

References

101. FAOSTAT. Available online: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize (accessed on 12 May 2023).
102. Paušič, A., Tojnko, S., Lešnik, M. Permanent, undisturbed, in-row living mulch: A realistic option to replace glyphosate-dominated chemical weed control in intensive pear orchards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021, 318. doi.org/10.1016/j.agee.2021.107502.

103. Tu, A., Xie, S., Zheng, H., Li, H., Li,Y., Mo, M. Long-term effects of living grass mulching on soil and water conservation and fruit yield of citrus orchard in south China. *Agricultural Water Management* 2021, 252. doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106897.
104. Nikiema, P., Nzokou, P., Rothstein, D., & Ngouajio, M. Soil microbial biomass as affected by groundcover management in a Fraser fir (*Abies fraseri* [Pursh] *Poir*) plantation after 1 year. *Biology and Fertility of Soils* 2012, 48, 727-733. doi:10.1007/s00374-012-0666-5.
105. Scholberg, J., Dogliotti, S., Leoni, C., Cherr, C., Zotarelli, L., & Rossing, W. Cover Crops for Sustainable Agrosystems in the Americas. In*: Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming* (Vol. 4, pp. 23- 58), 2010. Springer. doi:10.1007/978-90-481-8741-6_2.
106. Atucha, A., Merwin, I., Brown, M., Gardiazabal, F., Mena, F., Adriazola, C., & Lehmann, J. (2013). Soil erosion, runoff and nutrient losses in an avocado (*Persea americana Mill*) hillside orchard under different groundcover management systems. *Plant and Soil* 2013, 368(1), 393-406. doi:10.1007/s11104-012-1520-0.
107. Aguilar-Fenollosa, E., & Jacas, J. Effect of ground cover management on *Thysanoptera* (thrips) in clementine mandarin orchards. *Journal of Pest Science* 2013, 86, 469-481. doi:10.1007/s10340-013-0494-x.
108. Sánchez, E., Giayetto, A., Cichon, L., Fernández, D., Aruani, M., & Curetti, M. Cover crops influence soil properties and tree performance in an organic apple (*Malus domestica Borkh*) orchard in northern Patagonia. *Plant and Soil* 2007, 293, 193- 203. doi:10.1007/s11104-007-9215-7.
109. St. Laurent, A., Laurent, A., Merwin, I., & Thies, J. Long-term orchard groundcover management systems affect soil microbial communities and apple replant disease severity. *Plant and Soil* 2008, 304(1-2), 209-225.
110. Lanauskas, J., Kviklys, D., Kviklienė, N., Uselis, N., Viškelis, P., & Rubauskis, E. *Xth IS on Integrating Canopy, Rootstock and Environmental Physiology in Orchard Systems.* Effect of Soil Management on Tree Nutrition and Yield in Apple Organic Orchards (1058), 2014, pp. 175-180. doi:10.17660/ActaHortic.2014.1058.19.
111. Allen, R.G.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements*; Irrigation and Drainage Paper No. 56; FAO: Rome, Italy, 1998.
112. Odi-Lara, M.; Campos, I.; Neale, C.M.U.; Ortega-Farías, S.; Poblete-Echeverría, C.; Balbontín, C.; Calera, A. Estimating Evapotranspiration of an Apple Orchard Using a Remote Sensing-Based Soil Water Balance. *Remote Sens.* 2016, 8, 253. https://doi.org/10.3390/rs8030253.
113. Gonçalves, J.M.; Ferreira, S.; Nunes, M.; Eugénio, R.; Amador, P.; Filipe, O.; Duarte, I.M.; Teixeira, M.; Vasconcelos, T.; Oliveira, F.; et al. Developing Irrigation Management at District Scale Based on Water Monitoring: Study on Lis Valley, Portugal. *AgriEngineering* 2020, 2, 78–95. https://doi.org/10.3390/agriengineering2010006.
114. Ferreira, S.; Oliveira, F.; Gomes da Silva, F.; Teixeira, M.; Gonçalves, M.; Eugénio, R.; Damásio, H.; Gonçalves, J.M. Assessment of Factors Constraining Organic Farming Expansion in Lis Valley, Portugal. *AgriEngineering* 2020, 2, 111–127. https://doi.org/10.3390/agriengineering2010008.
115. COBA. Environmental Impact Study of the Lis Valley Reparcelling Project; IHERA: Lisbon, Portugal, 2001. (In Portuguese).
116. Fernández-Aracil, P.; Melgarejo-Moreno, J.; López-Ortiz, M.-I. From Private Company to Water User Association and Natural Park over a Century: The Case of Riegos de Levante, Izquierda del Segura (Spain). *Water* 2021, 13, 680. https://doi.org/10.3390/w13050680.

Estimación del volumen de copas en plantaciones frutales de olivo (Olea europaea L.), a partir de datos LIDAR aerotransportados.

J. Santamaría-Peña[1*], E. Tarancón-Andrés[1], E. Martínez-Cámara[1], D. Arancón-Pérez[1], J.C. Gómez-Chomón[1], T. Santamaría-Palacios[2]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de La Rioja; * jacinto.santamaria@unirioja.es
[2] Consejería de Desarrollo Autonómico del Gobierno de La Rioja

Abstract:

In this paper, a methodology is developed for the automatic detection of the geometry and canopy volume in a fruit orchard from LIDAR points from Airborne Laser Scanning (ALS). The density of points with which we have worked is of the order of 5 p/m2 in the crowns and the process has been applied in a plantation of adult olive trees arranged in a real frame of 5m x 5m.

Segmentation and filtering initials have been applied to the original point cloud that individualize the points of the crown, to later apply rasterization algorithms of maximum points and minimum points on the crown, which delimit the outer geometry of the crowns as much as possible. By comparing the layer of maximum points and minimum points, the crown volume of each of the trees in the plantation is obtained.

The results obtained show a certain tendency to estimate crown volumes by default, with values approximately 30% lower than reality. In addition, worse geometric definitions were observed in the delimitation of the inner and lower areas of the crowns due to the difficulty of penetrating laser pulses and generating rebounds in those areas.

The methodology can be applied with small adaptations to other studies in different fields (agroforestry, hydrology, environment or urban development), and is currently contributing to sustainable environmental development.

Keywords: LIDAR-ALS; vegetable mass; Olea europaea; lidar algorithms; crown volume.

1. Introducción

En diversas ocasiones resulta útil saber con antelación el volumen de masa vegetal de una plantación frutal concreta, bien para realizar una planificación de tratamientos fitosanitarios o bien para conocer con detalle la morfología actual antes de iniciar un proceso de poda. La toma directa de datos objetivos en campo resulta muy laboriosa y en la gran mayoría de las veces dichos datos resultan escasos para obtener conclusiones que puedan ser significativas. Se hace necesario, por tanto, acudir a sistemas de captura de datos masivos, no destructivos y tomados a distancia. [1]

Las características geométricas de las copas de los árboles están muy relacionadas con el crecimiento y con su productividad e influyen decisivamente en las futuras estimaciones de la cantidad de biomasa, de sus producciones, de sus consumos de agua, etc. [2]

La tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging) permite obtener nubes de puntos del terreno y de otros elementos ubicados sobre él, de una forma precisa y georreferenciada. Con suficiente número de puntos es posible definir geométricamente la vegetación e incluso individualizar los árboles dispuestos sobre el terreno. Hoy en día, es relativamente sencillo disponer de nubes de puntos 3D (X, Y, Z) con los que poder reconstruir digitalmente la estructura de árboles a nivel individual o de una plantación en su conjunto. [1, 2]

Se suelen considerar tres tipologías de sensores LIDAR para este propósito: los que van situados en aviones, helicópteros o drones (Airborne Laser Scanning) y los que se manejan desde tierra, bien estáticamente posicionados (Terrestrial Laser Scanning) o en movimiento (Mobile Laser Scanning). En este estudio, nos centraremos en el uso de datos LIDAR aerotransportados (ALS), de media y baja resolución, como fuente masiva de datos disponible para la obtención de la geometría de las copas de árboles frutales. El objetivo es que mediante procesos de análisis de la nube de puntos con software específico, aplicando algoritmos adecuados, logremos definir la geometría de la copa de los árboles y deducir el volumen de masa vegetal que cada uno encierra.

Las nubes de puntos obtenidos contienen multitud de elementos (puntos) distribuidos irregularmente en el espacio, que complican la extracción de las características geométricas de las copas. Por ello, resulta imprescindible realizar algún tipo proceso de filtrado de los puntos antes de realizar la extracción de formas y cálculo de volúmenes. [3,4]

Para el tratamiento y gestión de estas nubes de puntos existen diversas herramientas informáticas. En este estudio se ha utilizado software freeware o shareware tipo CloudCompare®, Fusión®, Fugroviewer®, LasTools®, demostrando que para estudios locales de no demasiada entidad, son herramientas suficientemente potentes y muy adecuadas.

2. Materiales y métodos

En este estudio, nosotros mostraremos un procedimiento para determinar la geometría y el volumen de árboles frutales, y lo concretaremos en una plantación de olivos, usando como material de partida datos LIDAR procedentes de vuelos realizados por la administración nacional y/o regional en España, no necesariamente clasificados. Estos vuelos se han desarrollado dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), en su segunda cobertura y se hallan disponibles vía web y son descargables de forma gratuita en https://centrodedescargas.cnig.es/. Las propiedades técnicas del vuelo LIDAR utilizado aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del vuelo LIDAR LaRioja-2016

PROPIEDAD	Característica
Cobertura territorial	5.034 km²
Densidad de captura	2 pulsos/m²
Fecha del vuelo	septiembre 2016
Sistema geodésico de referencia	ETRS89
sistema de referencia de coordenadas	UTM Huso 30N
Altitudes originales	Elipsoidales referidas a ETRS89 (Elipsoide GRS80)
Altitudes transformadas	Ortométricas, en base al geoide EGM08_REDNAP
Precisión horizontal nadiral	RMSE (X,Y) ≤ 20 cm
Precisión general altimétrica	RMSE Z ≤ 0.15 cm

La hoja utilizada corresponde a dicho vuelo del año 2016, con denominación *pnoa_2016_rio_544-4696_cla-001-irc.laz* y abarca una superficie de 2 km x 2 km. El número total de puntos georreferenciados de esta hoja es de 15.639.201.

2.1. Zona de estudio (Parcela de Olivos (Olea europaea, L.)

Este estudio se realizará sobre una plantación de olivos en el municipio de Lardero (La Rioja-Spain), con ejemplares ya adultos y formados en vaso, con copas amplias bien desarrolladas. Esto facilitará disponer de suficientes puntos o rebotes LIDAR para estudiar y definir de forma adecuada la geometría y el volumen de la copa del árbol. En la figura 1 se aprecia la ubicación concreta de la zona de estudio.

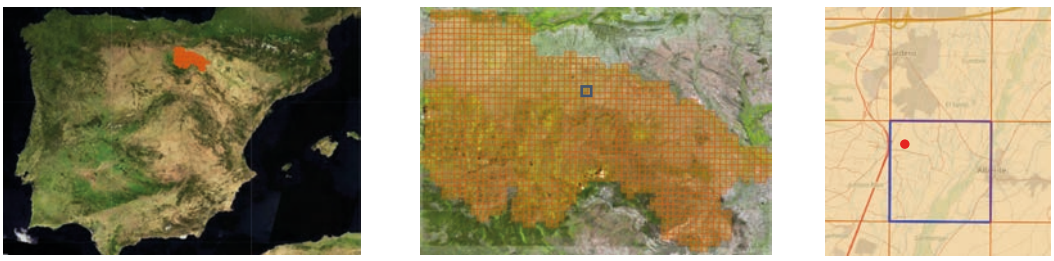


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio Lardero (La Rioja).

En concreto, se trata de la parcela con referencia catastral 26084A008003300000TX, con una superficie de 2.573 m2 de forma rectangular (83 m x 31 m) y 75 olivos plantados a marco real (5 m x 5 m) y una edad de 20 años. En la figura 2 se muestra la ubicación y el estado de la plantación en el año 2016.



Figura 2. Nube de puntos LIDAR (Infrarrojo) e imagen de la plantación de olivos (2016).

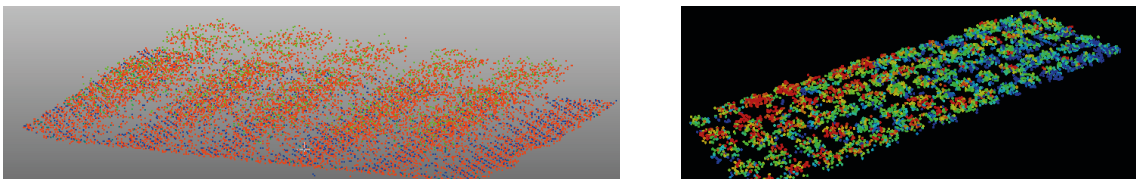
2.2. Procesos de análisis de la nube de puntos LIDAR

Para conseguir los objetivos propuestos de individualización de copas y estimación de volúmenes, se ha seguido los siguientes procesos aplicados a la nube de puntos LIDAR original.

2.2.1. Segmentación inicial

Nuestro objetivo es estudiar una plantación concreta de olivos. Mediante un primer proceso de segmentación de la nube de puntos original, se extraen los puntos correspondientes a la

parcela a estudiar. Con ello, se pasa de trabajar con una nube de puntos de más de 15 millones de puntos a operar con una nube de solamente 14.023 puntos. Ver figura 3.



a) b)

Figura 3. a) Nubes de puntos 3D segmentada (14.023 puntos). b) Disposición de copas aisladas.

2.2.2. Separación de copas y puntos suelo

En un segundo proceso se separan los puntos suelo de los puntos de la copa. Este proceso se ha llevado a cabo mediante el filtro Cloth Simulation Filter (CSF) de CloudCompare, generando dos nubes de puntos independientes, una para los puntos suelo (7.907 puntos) y otra para los puntos de copa (6.116 puntos). Ver figura 4

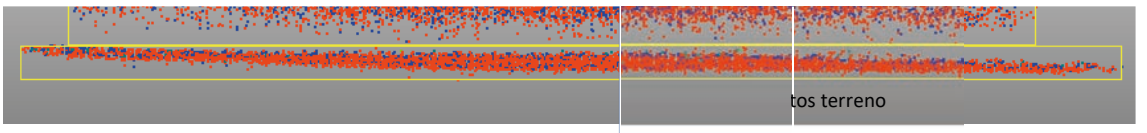


Figura 4. Segmentación: a) puntos de copa (6.116 pu[illegible] 7 puntos)

A partir de este momento, todas las operaciones pueden realizarse sobre la nube de puntos de copa. En la Figura 5 pueden apreciarse la nube de copas general con sus cotas ortométricas, la individualización de cada copa siguiendo en marco real de plantación 5m x 5m y los rangos de altura sobre el suelo de los puntos de copa (obtenida por cómputo de distancias entre los puntos copa y los puntos suelo, resultando ésta entre 0,7 m y 3,5 m).

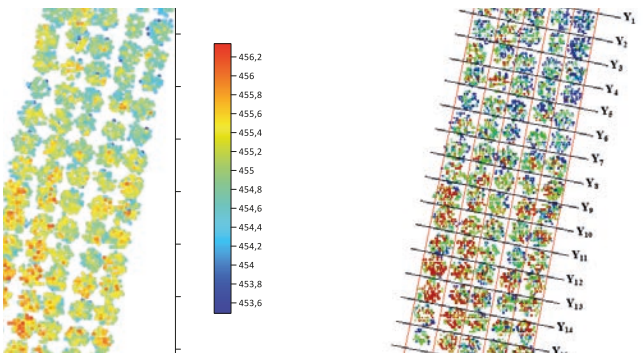


Figura 5. a) Alturas ortométricas. b) Orientación marco de plantación. c) Alturas sobre el terreno

Hay 6.116 puntos de copa en toda la parcela, o sea, una media de 82 puntos por cada copa. En una vista en planta, los puntos se ven agrupados, siendo la densidad media de 2,4 puntos de copa /m2. Es evidente que en la zona de copas, la densidad de puntos es mayor, ya que en este tipo de plantaciones con marcos amplios, un porcentaje importante de terreno queda sin ser cubierta por la masa vegetal y por tanto queda sin rebotes de vegetación registrados [2]. Esto es importante tenerlo en cuenta a la hora de establecer el tamaño de rejilla o paso de malla para ajustar el algoritmo de rasterización [4—6], que se explica en el apartado siguiente. En nuestra muestra, el mejor resultado se ha dado al correr al algoritmo con tamaño de rejilla entre 0,6-0,7 m.

2.2.3. Identificación de puntos máximos de copa y mínimos de copa, por rasterización

Este proceso se hará por rasterización de los máximos y mínimos de la nube de puntos de copas y exportación de la nube de puntos. Siguiendo los razonamientos expuestos en Zhang el al [3-4], nosotros proponemos generar una rasterización de máximos con paso de malla 0,6 m y rellenar las celdas vacías con cota fija de 450 m, próxima pero algo inferior a la mínima cota de cualquier punto en la nube. De esta forma quedarán perfectamente identificadas las zonas de copa y los huecos en las copas y generamos un plano de comparación a una cota prefijada (450 m).

Paralelamente y de modo similar, nosotros proponemos realizar una rasterización de mínimos, para detectar las zonas bajas de las copas, e igualmente, rellenar las celdas vacías con una cota de 450 m. De esta forma, cuando se computen los volúmenes entre ambas nubes procedentes de la rasterización, dichos volúmenes corresponderán exclusivamente a las zonas de la copa y quedarán completamente excluidos los huecos entre los árboles. En las figuras 6-7-8 se representa un esquema del proceso propuesto.

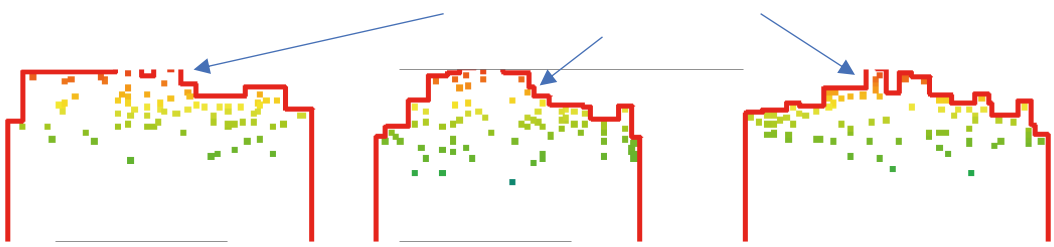


Figura 6 Rasterización de MÁXIMOS, fijando plano de comparación a 450 m.

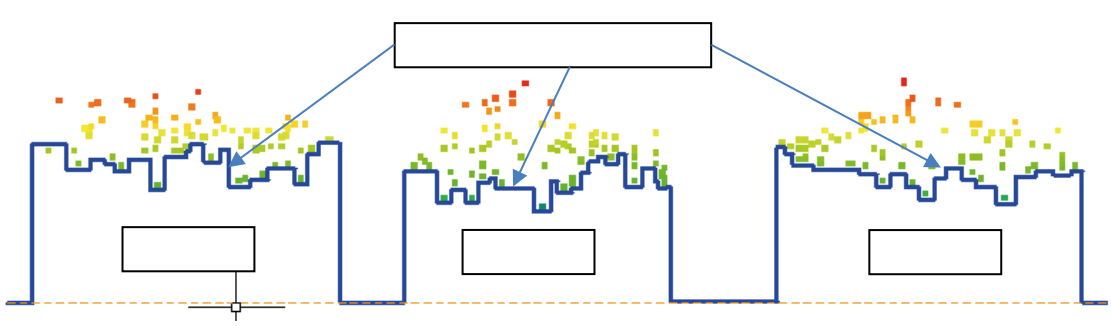


Figura 7. Rasterización de MÍNIMOS, fijando plano de comparación a 450 m.

Para el cálculo de volúmenes se enfrentan los dos ráster (el de máximos y el de mínimos) comparando la altura pixel a pixel y obteniendo el volumen de copas global.

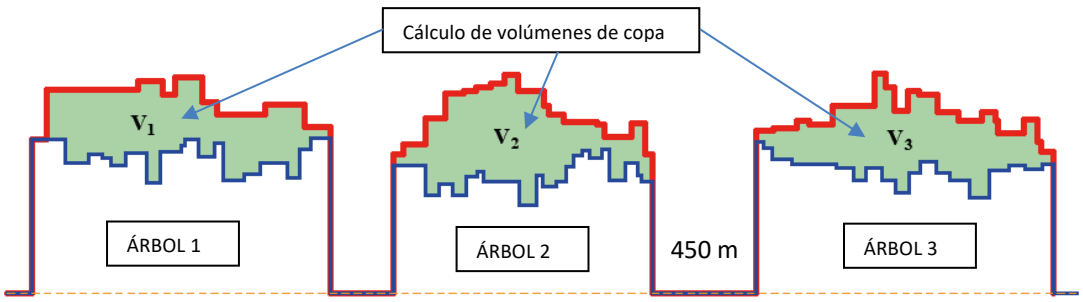


Figura 8 Volumen entre máximos y mínimos.

El resultado obtenido es el que se observa en la figura 9. Obsérvese, cómo el rango de espesores de copa va desde los 0 m para las celas vacías (que se corresponde en mayor medida con las zonas de huecos entre árboles) y los 2,2 m que aparece como mayor espesor detectado en toda la plantación. La principal ventaja de realizar la rasterización de máximos y de mínimos es que el proceso de cálculo de volúmenes se realiza mucho más rápido, ya que sólo se tiene que enfrentar punto a punto cada una de las celdas de los dos ráster.

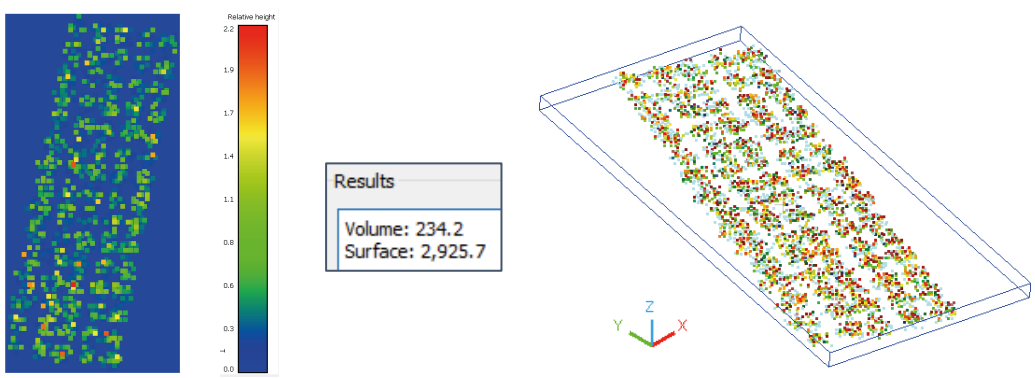


Figura 9. Espesores de copa, entre máximos y mínimos y volumen de copas computado (m³).

3. Resultados y discusión

En este estudio se ha calculado el volumen de copas de una parcela con 75 olivos adultos, obteniéndose como resultado un total de 234,2 m³ de volumen de copas, que representan un promedio de 3,1 m³/árbol. Delineando sobre la nube de puntos LIDAR de copas un contorno medio y haciéndolo girar sobre el eje del árbol, se obtiene un sólido 3D cuyo volumen de copa es de 4,7 m3. Ver figura 10.

Se observa, que el volumen de copa promedio obtenido tras el proceso descrito, trabajando con la nueve de puntos total de la parcela, es inferior al volumen de copa promedio obtenido por revolución de un perímetro tipo (3,1 m³ frente a 4,7 m³). Representa una estimación por defecto de entorno al 33,3 %.



Figura 10. Contorno tipo de Olivo y modelado 3D de su copa (3,1 m³).

La explicación para este resultado, la deberíamos buscar en la propia naturaleza de los puntos LIDAR de origen aerotransportado (ALS). Los rebotes internos dentro de la copa son algo escasos y no consiguen representar con toda la exactitud la geometría de las copas, especialmente las zonas bajas. La nube de puntos de copa global, como ya se indicó en apartados anteriores, tiene 6.116 puntos, lo que supone, estimando un radio máximo de árbol de 2 m., unos 6,49 puntos /m² en una vista en planta. Analizando la estructura de los rebotes en las copas de los árboles, se observa un claro defecto de puntos en las zonas centrales y bajas de la copa, cuestión lógica por ser puntos procedentes de vuelos LIDAR aerotransportados de media densidad [7,9]. Es por ello que la nube de puntos mínimos de copa tendrá mucha menos precisión y resolución espacial que la nube de puntos máximos, por lo que con seguridad estará ajustada en el proceso a mayor altura que la real, lo que producirá un defecto en la estimación de los volúmenes. Los primeros rebotes se dan siempre con mayor frecuencia en zonas externas superiores de la copa.

4. Conclusiones

En este estudio se desarrolla un procedimiento rápido y sencillo para, a partir de datos LIDAR aerotransportados de baja o media densidad, extraer la geometría y el volumen de las copas de árboles concretos de una plantación de olivo (Olea europaea L.). Se demuestra que utilizando herramientas sencillas de análisis de datos LIDAR con software específico, se pueden estimar con suficiente precisión los volúmenes de copa y su disposición a lo largo de la plantación. Estos datos pueden ser fundamentales en estudios avanzados de estado de la biomasa, en la planificación de los tratamientos fitosanitarios o en la aplicación de abonos foliares, así como en la preparación de estrategias de poda sobre plantaciones frutales.

De los resultados obtenidos se deduce que una densidad de puntos LIDAR de entre 3 y 4 puntos/m², tal vez no sea suficiente si se quiere estimar con mucha precisión la forma, estructura y volumen de las copas de plantaciones frutales. Estimaciones por defecto del orden del 30 % serán muy probables utilizando este tipo de datos. Recientemente, en el año 2022, se ha iniciado el Proyecto PNOA-LIDAR (3ª cobertura) para cubrir toda la geografía española con densidades de 5 pulsos/m² y superiores, lo que permitirá en breve período de tiempo disponer de un material LIDAR más adecuado y fiable para este tipo de estudios.

Los procesos presentados en este estudio pueden ser aplicados a otros cultivos para los mismos o similares propósitos, pero será necesario tener en cuenta en cada caso la tipología de la formación del cultivo, marcos de plantación, tipo de poda, estructura teórica de la vegetación, etc. En cada caso concreto habrá que adaptar los parámetros de rejilla adecuados y establecer los mejores filtros y combinación de procesos que obtengan unos resultados más ajustados a la realidad.

La metodología presentada puede ser aplicada también para otros estudios en el ámbito forestal (estudios de estructura del bosque y de otros ecosistemas, estudios de crecimiento de biomasa y balances de CO_2, superficies afectadas por incendios o por defosteración, etc.); en el ámbito agrario (estudios de pendientes, estructura de la vegetación, etc.); en el ámbito hidrográfico (definición precisa de zonas inundables); en el ámbito de la navegación aérea (para detectar obstáculos en zonas de servidumbre aeroportuaria); en el ámbito urbano (para la modelización precisa de edificaciones y arbolado; diseño de red de telecomunicaciones de mayor cobertura, etc.).

En definitiva, se vislumbra un futuro prometedor para el uso masivo de datos LIDAR aerotransportados (ALS) para todo un conjunto de prácticas agroambientales sostenibles y claramente encuadradas en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la Agenda 2030 aprobada por la ONU en el año 2015.

5. Agradecimientos

Al Instituto Geográfico Nacional y a la Comunidad Autónoma de La Rioja, por el trabajo desarrollado para poner a disposición del público en general los productos LIDAR y otros materiales derivados.

Referencias

1. Rivera, G., Porras, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, J. P. (2023). LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. *Computers and Electronics in Agriculture*, *207*, 107737. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737
2. Rosell, J.R., Sanz, R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 81, 2012, Pages 124-141, ISSN 0168-16 https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.007
3. Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., & Yan, G. (2016). An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. Remote sensing, 8(6), 501. https://doi.org/10.3390/rs8060501
4. Zhou, H., Zhang, J., Ge, L., Yu, X., Wang, Y., & Zhang, C. (2021). Research on volume prediction of single tree canopy based on three-dimensional (3D) LiDAR and clustering segmentation. *International Journal of Remote Sensing*, *42*(2), 738-755. https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1811917
5. Miranda-Fuentes, A., Llorens, J., Gamarra-Diezma, J. L., Gil-Ribes, J. A., & Gil, E. (2015). Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement. Sensors, 15(2), 3671-3687. https://doi.org/10.3390/s150203671
6. Estornell, J., Hadas, E., Martí, J., & López-Cortés, I. (2021). Tree extraction and estimation of walnut structure parameters using airborne LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *96*, 102273. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102273
7. Liu, X., Wang, Y., Kang, F., Yue, Y., & Zheng, Y. (2021). Canopy parameter estimation of citrus grandis var. Longanyou based on Lidar 3d point clouds. *Remote Sensing*, *13*(9), 1859. https://doi.org/10.3390/rs13091859

8. Berk, P., Stajnko, D., Belsak, A., & Hocevar, M. (2020). Digital evaluation of leaf area of an individual tree canopy in the apple orchard using the LIDAR measurement system. Wu, D., Johansen, K., Phinn, S., & Robson, A. (2020). Suitability of airborne and terrestrial laser scanning for mapping tree crop structural metrics for improved orchard management. *Remote Sensing*, *12*(10), 1647.Computers and Electronics in Agriculture, 169, 105158. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105158

Riggi, E., Avola, G., Di Gennaro, S. F., Cantini, C., Muratore, F., Tornambè, C., & Matese, A. (2019, October). UAV-based 3D models of olive tree crown volumes for above-ground biomass estimation. In International Symposium on Precision Management of Orchards and Vineyards 1314 (pp. 353-360). https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1314.44



Reducción de la exposición humana a fitosanitarios con el uso de CitrusVol y boquillas de baja deriva en cítricos

C. Garcerá, A. Fonte, P. Chueca

Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), Ctra. CV-315 km. 10.7 Moncada, Valencia, Spain; garcera_cru@gva.es, fonte_alb@gva.es, chueca_pat@gva.es.

Abstract: Bystander exposure to plant protection products has to be assessed for their registration worldwide. Airborne spray drift is considered the main direct source of dermal exposure. In the absence of measured values, in the European Union, EFSA gives reference values to be used. Values for orchard crops were obtained in apple orchards from Northern Europe 30 years ago. Nevertheless, application technique and crop characteristics play an important role in spray drift, and thus have to be taken into account for a reliable exposure assessment. The aim of this work was to asses potential dermal exposure of adult bystanders, and airborne and sedimenting drift in citrus crops grown in Southern Europe, comparing conventional and optimized applications. The latter consisted on using the volume rate recommended by CitrusVol tool according to the specific characteristics of the application, together with the use of low-drift nozzles and the orientation of the cloud and the use of fan deflectors to match the canopy shape.

Conventional application resulted in an average potential dermal exposure, sedimenting and airborne drift of 0,537 ml spray/person, 14,609 ml spray/m^2 and 20,228 ml spray/m^2, respectively. And the optimized application reduced by 82% the exposure, by 99% the sedimenting drift and by 90% the airborne drift, therefore it is really important to promote the use of optimization tools and techniques.

Palabras clave: deriva, análisis de riesgos, CitrusVol, pulverizador hidroneumático, control integrado

1. Introducción

El objetivo principal de un tratamiento con fitosanitarios (PPP) por pulverización es depositar una cantidad óptima del producto sobre la zona de la planta afectada o susceptible al ataque de una plaga o enfermedad para poder controlarla. Sin embargo, durante su aplicación se producen pérdidas al medioambiente, por escorrentía, deriva… La deriva se define como la cantidad de PPP que sale del área tratada por la acción de las corrientes de aire durante el proceso de aplicación. Se distingue entre deriva depositada, que es la que se deposita en el suelo cercano a la parcela tratada, y deriva aérea, que es la que se mantiene suspendida y arrastrada por el viento hasta zonas más alejadas [1]. La deriva se considera la principal fuente de contaminación ambiental durante las aplicaciones de PPP, ya que puede tener efectos nocivos sobre los organismos vivos en áreas adyacentes al tratamiento, afectando a los residentes cercanos, transeúntes, fauna y flora [2]. El registro de PPP en la Unión Europea requiere un análisis de riesgos ambientales y humanos en todos los escenarios de exposición que se pueda esperar que ocurran como consecuencia de los usos autorizados en la etiqueta [3]. Uno de los grupos de personas que se considera expuesto a la deriva son los transeúntes que, según Matthews y Hamey

[4], se definen como personas que podrían encontrarse dentro o directamente adyacentes al área donde se esté realizando una aplicación de PPP o donde se acabó recientemente; cuya presencia es bastante incidental y no está relacionada con el trabajo que involucra el uso del PPP, pero cuya posición puede llevarlos a estar expuestos durante un corto período de tiempo y que no toman medidas para evitar o controlar la exposición. EFSA considera la deriva como la principal fuente de exposición no alimentaria de los transeúntes, estableciendo diferentes vías de exposición, dérmica directa y por inhalación debida a la deriva aérea, y dérmica indirecta o por ingestión por contacto con superficies con depósitos de PPP debidos a la deriva sedimentada [5]. En caso de ausencia de valores de exposición y deriva medidos en condiciones reales, EFSA [5] proporciona valores de referencia tanto para cultivos bajos como para cultivos arbóreos. Para los cultivos arbóreos, estos valores fueron obtenidos en el norte de Europa en manzanos, empleando técnicas y parámetros de aplicación, así como conformaciones de las parcelas, habituales en esta zona y para este cultivo [6,7]. Es muy importante tener en cuenta que la deriva depende principalmente de las características y geometría del cultivo (follaje, densidad, dimensiones, etc.) [8-10], la configuración del equipo (volumen de aplicación, uso de ventilador, velocidad de avance, etc.) [11-15], y condiciones meteorológicas (viento, humedad, temperatura, etc.) [16-19]. Por tanto, para realizar una evaluación precisa de la exposición y riesgo de los tratamientos fitosanitarios, es necesario tener datos obtenidos en las condiciones de uso.

Las especificidades y prácticas de los productores de cítricos en el sur de Europa difieren sustancialmente de las de otros cultivos y países. Los cítricos se caracterizan por ser cultivos perennes, globulares, de grandes dimensiones y alta densidad foliar, que en función del marco de plantación y crecimiento vegetativo de la variedad se pueden presentar en las filas como árboles aislados o formando setos anchos. Las aplicaciones de fitosanitarios suelen realizarse en primavera – verano, con temperaturas medias superiores y humedades relativas inferiores a las que se dan en el norte de Europa. Además, las aplicaciones se llevan a cabo con pulverizadores hidráulicos asistidos por aire, comúnmente conocidos como turboatomizadores, utilizando altos volúmenes de caldo (1000-5000 L/ha), altos caudales de aire (40000-60000 m^3/h), y bajas velocidades de avance (1.5-3 km/h).

Con el objetivo de optimizar las aplicaciones de fitosanitarios en cítricos el Centro de Agroingeniería del IVIA ha desarrollado CitrusVol, una herramienta informática sencilla que recomienda el volumen de caldo de la aplicación con turboatomizador acorde a las características particulares del tratamiento, es decir, ajustándolo a las características de la vegetación/parcela(teniendo en cuenta el volumen de las copas, el marco de plantación, la densidad foliar y el nivel de poda), la plaga o enfermedad objetivo, y el producto fitosanitario [20].

Otro aspecto clave para optimizar las aplicaciones es la calibración y el adecuado ajuste de los turboatomizadores, adaptando el perfil de pulverización a las características geométricas de la vegetación objetivo, para lo cual es necesario seleccionar las boquillas operativas para la aplicación y su inclinación, así como la orientación de los deflectores de aire. Por último, hay que señalar que existen en el mercado algunas tecnologías de fácil uso para prevenir y reducir la deriva, como son las boquillas de baja deriva, que aumentan el tamaño de gota, reduciendo la posibilidad de ser arrastradas por el viento.

El objetivo de este estudio fue determinar la exposición dérmica potencial de transeúntes adultos, así como la deriva aérea y sedimentada en cítricos cultivados en el sur de Europa, y evaluar el efecto de la optimización de la aplicación, basada en el ajuste del volumen de aplicación, adecuación de la configuración del equipo y uso de boquillas de baja deriva.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

El factor de ensayo fue el tratamiento a 2 variantes:

- Convencional: tratamiento realizado según las directrices del técnico de la finca, en el que no se reguló el arco de boquillas para controlar el volumen aplicado ni para ajustar la nube de pulverización a la vegetación

- Optimizado: aplicación del volumen recomendado por la herramienta CitrusVol, junto con el uso de boquillas de baja deriva y el ajuste del arco de boquillas y los deflectores del ventilador para que la nube de pulverización se ajustase a la forma de la vegetación. El caso de estudio que se utilizó para la herramienta CitrusVol fue:

- Plaga: Diaspídidos.

- PPP: Abamectina.

Se realizaron 4 repeticiones, la repetición 1 en otoño de 2020, las repeticiones 2 y 3 en primavera de 2021, y la repetición 4 en otoño de 2021.

2.2. Parcela de ensayo

El estudio se llevó a cabo en una parcela comercial de Clementinos variedad Esbal (39° 36' 47 " N, 0° 21' 09.5" W). La vegetación se caracterizó en cada repetición, para ajustar en cada momento el volumen a aplicar en el tratamiento optimizado (Tabla 1).

Tabla 1. Características de la parcela de ensayo

Parámetro	Repetición 1	Repeticiones 2&3	Repetición 4
Marco de plantación (Distancia entre filas x Distancia entre árboles, m)		7 x 4.5	
Sistema de conducción		Tradicional (árboles globulares y elipsoidales aislados)	
Árboles (altura x $Ø_{a\ través}$ x $Ø_{a\ lo\ largo}$, m)	2.1 x 3.2 x 2.9	2.0 x 3.1 x 3.0	2.3 x 3.2 x 3.2
Huecos entre copas (m)	1.6	1.5	1.3
Distancia suelo-falda (m)	0.63	0.73	0.53
Volumen de vegetación (m^3/árbol)*	10.24	9.55	12.22
Nivel de densidad foliar		Media	
Nivel de poda		Normal	

* Calculado como un elipsoide

2.3. Aplicaciones

Las aplicaciones se realizaron en el extremo a sotavento de la parcela, pulverizando una longitud de 50 m de las filas, comenzando en la última fila y continuando en las 4 filas adyacentes en dirección contraria al viento (Figura 1).

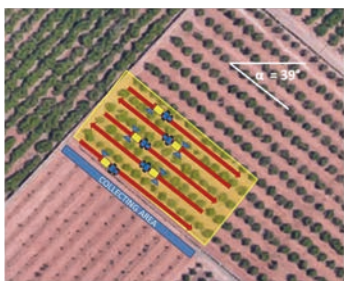


Figura 1. Esquema de la zona de ensayo.

Las condiciones operativas para cada repetición se muestran en la Tabla 2. El tratamiento convencional se aplicó sin variaciones entre las 4 repeticiones. En cuanto a la configuración del pulverizador para la aplicación optimizada, éste se ajustó para cada repetición en términos de

orientación y número de boquillas operativas, y orientación de los deflectores de aire, en función de la vegetación objetivo. En cuanto a las boquillas, se utilizaron boquillas cerámicas de cono hueco, modelo ATR 80, para el tratamiento convencional, y boquillas cerámicas de cono hueco de inducción de aire, modelo TVI80, para el tratamiento optimizado (Albuz Solcera. Evreux, Francia).

Tabla 2. Condiciones operativas de las aplicaciones

Parámetro	Convencional	Optimizado		
		Repetición 1	Repeticiones 2&3	Repetición 4
Equipo (tipo y modelo)	Turboatomizador (GBV Citfruit Plus 2000)			
Velocidad de avance (km/h)	1.6			
Presión en las boquillas (bar)	10			
Boquillas operativas (#)*	28	20	12	16
Volumen (L/ha)	4060	1730	1560	1824
TDF (rpm)	480			
Caudal de aire (m^3/h)	≈70000			

* Mezcla de tamaños de boquillas en el arco para ajustar el volumen que se aplica en cada tratamiento

Se aplicó la sustancia activa lambda-cihalotrina, ingrediente activo de Karate Zeon + 1.5 SC (lambda-cihalotrina 1.5% [CS] P/V) (Syngenta Limited. Bershire, Reino Unido), a la concentración máxima recomendada por la etiqueta para cítricos, que es 130 mL/HL, lo que resulta en una concentración de 19.5 mg lambda-cihalotrina/L.

Durante las aplicaciones se registraron los datos meteorológicos a 2 m por encima de la vegetación con una frecuencia de 1 Hz, que incluían la velocidad y dirección del viento en el plano horizontal, la velocidad del viento en la dirección vertical, y la temperatura y la humedad relativa del aire (Tabla 3).

Tabla 3. Condiciones meteorológicas (valores promedio) durante las aplicaciones

	Parámetro	Repetición 1		Repetición 2		Repetición 3		Repetición 4	
		Conv	Opt	Conv	Opt	Conv	Opt	Conv	Opt
Viento	Velocidad en plano horizontal (m/s)	0.78	0.85	1.83	1.16	0.56	0.83	1.35	1.25
Viento	Dirección en plano horizontal (°)	295.60	356.47	80.10	332.24	308.93	351.58	1.08	0.70
Viento	Velocidad en dirección vertical (m/s)[a]	-0.08	0.00	0.03	-0.01	0.00	0.01	*	0.01
	Temperatura (°C)	33.5	24.8	20.8	13.9	23.4	25.0	19.8	17.7
	Humedad relativa (%)	38.7	56.8	75.5	81.8	49.4	49.8	81.8	84.9

[a]Si>0, esta componente del viento iba hacia arriba; Si <0, esta componente del viento iba hacia abajo

2.4 Evaluaciones

Se evaluó la exposición dérmica potencial de transeúntes adultos mediante el método de la dosimetría de cuerpo entero. Para ello, durante las aplicaciones, se colocaron tres maniquíes adultos, que se vistieron con monos de Tyvek® (DuPont), que se utilizaron como colectores del PPP depositado.

Además, se midió la deriva depositada y aérea junto a los maniquíes, para lo que se utilizaron colectores artificiales horizontales, papeles de filtro de 52,3x5 cm, y verticales, hilos de nylon de 2 mm de diámetro y 2 m de altura, respectivamente.

Todos los colectores, y maniquíes se ubicaron a 8 m de distancia del área tratada (medida en perpendicular desde el centro de la fila del borde de la parcela) y se distribuyeron homogéneamente a lo largo de la longitud de la misma (Figura 2).



Figura 2. Imágenes del ensayo.

Tras la aplicación, cada mono se cortó en las nueve piezas indicadas en la Figura 3, los hilos se cortaron en 4 trozos de 0.5 m y el papel se recogió entero. La lambda-cihalotrina depositada en cada pieza de mono, trozo de hilo y papel de filtro se extrajo con un volumen conocido de ciclohexano y este se analizó mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas en tándem (GC-MS/MS) para determinar la concentración de lambda-cihalotrina en el extracto. Con ello se calculó la cantidad depositada y, teniendo en cuenta la concentración real de cada aplicación, se calculó la deposición total de caldo sobre el mono, hilo y papel, respectivamente, y con ello, la cantidad a la que está potencialmente expuesto el transeúnte, la deriva aérea y la deriva depositada a 8 m de distancia de la parcela.

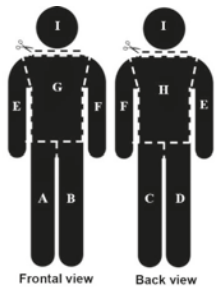


Figura 3. Muestreo del mono.

3. Resultados y discusión

Como se observa en la Tabla 4, a pesar de las diferencias entre las repeticiones, probablemente debidas a las condiciones meteorológicas durante la aplicación de cada tratamiento y repetición, la aplicación optimizada redujo en todos los casos la exposición dérmica potencial, la deriva sedimentada, y la deriva aérea respecto al tratamiento convencional.

El tratamiento convencional obtuvo una exposición dérmica potencial, deriva sedimentada, y deriva aérea medias de 0,537 ml de caldo/persona, 14,609 ml de caldo/m^2 y 20,228 ml de caldo/m^2, respectivamente. Y la aplicación optimizada obtuvo unos valores medios de 0,097 ml de caldo/persona, 0,135 ml de caldo/m^2 y 2,056 ml de caldo/m^2, respectivamente para cada parámetro. Esto indica que la optimización del tratamiento redujo en un 82% la exposición potencial de transeúntes, en un 99% la deriva sedimentada y en un 90% la deriva aérea, lo que a su vez indica una reducción de la exposición por inhalación y la exposición dérmica indirecta por contacto con residuos de deriva.

Tabla 4. Exposición dérmica potencial (mL caldo/persona), deriva sedimentada (mL caldo/m^2), y deriva aérea 0-2 m (mL caldo/m^2) (media (error estándar)) de cada tratamiento y repetición (el valor entre corchetes indica la reducción del tratamiento optimizado respecto al convencional).

Repetición	Exposición dérmica potencial (mL caldo/persona)		Deriva sedimentada (mL caldo/m²)		Deriva aérea 0-2 m (mL caldo/m²)	
	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado	Convencional	Optimizado
1	0,083 (0,014)	0,010 (0,003) *[88,6%]*	0,460 (0,134)	0,036 (0,005) *[92,1%]*	1,993 (0,706)	0,024 (0) *[98,8%]*
2	0,760 (0,252)	0,097 (0,022) *[87,3%]*	29,578 (11,074)	0,063 (0,054) *[99,8%]*	52,943 (8,707)	4,085 (2,047) *[92,3%]*
3	0,676 (0,104)	0,156 (0,021) *[76,9%]*	27,518 (7,658)	0,228 (0,081) *[99,2%]*	24,387 (3,973)	2,962 (1,335) *[87,9%]*
4	0,628 (0,237)	0,124 (0,061) *[80,3%]*	0,879 (0,339)	0,213 (0,118) *[75,8%]*	1,590 (0,506)	1,151 (0,717) *[27,6%]*
PROMEDIO	**0,537 (0,154)**	**0,097 (0,031) *[82,0%]***	**14,609 (8,059)**	**0,135 (0,049) *[99,1%]***	**20,228 (12,136)**	**2,056 (0,908) *[89,8%]***

Los resultados de exposición dérmica potencial del tratamiento convencional son mucho menores que el valor de referencia de EFSA [5] para transeúntes, que para aplicaciones en cultivos arbóreos considera una exposición dérmica potencial de adultos a 8 m de distancia de 12,9 mL caldo/persona, considerando el percentil 95 del estudio de referencia [6]. Si calculamos el P95 de nuestros datos, obtenemos un valor de 1,166 mL/persona, que también es muy inferior. La diferencia radica en que los datos de referencia se obtuvieron en manzanos y con las condiciones operativas habituales para este cultivo en el norte de Europa (volumen de 500 L/ha, presión de trabajo de 6,9 bar, y velocidad de avance de 5,8 km/h), muy diferentes a los empleados en nuestro estudio. Sin embargo, en el trabajo realizado por HSE [21], donde se realizaron evaluaciones en distintos países, entre ellos España, el valor medio de exposición dérmica potencial en manzanos en estados de desarrollo tardíos (con follaje) fue de 1,271 mL/persona. Por su lado, los valores obtenidos por Butler Ellis et al. [22] en manzanos cultivados en el Reino Unido son similares a los de nuestro estudio, tanto a 5 como a 10 m de distancia, lo que puede deberse a que en ambos casos se ha utilizado el mismo modelo de boquilla, y también al menor volumen aplicado (200 L/ha) y menor caudal de aire utilizados en ese estudio respecto al de Lloyd et al. [6]. Cabe destacar que Butler Ellis et al. [22] también realizaron medidas con boquillas antideriva, pero en este sólo redujeron en un 63% la exposición de los transeúntes situados a 10 m de la parcela, lo que puede deberse a la menor densidad foliar de los manzanos respecto a los cítricos.

En cuanto a los valores de deriva sedimentada que recomienda EFSA [5] para evaluar la exposición de transeúntes, vienen expresados como el percentil 90 del porcentaje del volumen aplicado obtenido a 5 (8,41%) y 10 m (3,60%) por Ganzelmeier y Rautmann [7], que también realizaron el estudio en manzanos con las condiciones operativas habituales para este cultivo. En el presente estudio, la deriva sedimentada a 8 m así expresada resulta en un percentil 90 de 8,97%, siendo superior al recomendado para cultivos frutales con follaje a 10 m. El valor medio (3,58%) es similar al medido por Meli et al. [23] a 6 m de distancia de la parcela en tratamientos de cítricos con turboatomizador (3,20%), e inferior al encontrado por van de Zande et al. [24] (8,31%), estimado en manzanos tratados con turboatomizador a 8 m. En cuanto a la deriva aérea, EFSA [5] no indica valores de referencia. Los valores encontrados en nuestro estudio corresponden a un valor medio de 4.85% del volumen aplicado, que es muy inferior al encontrado por van de Zande et al. [24] (26,28%) en manzanos, y por Torrent et al. [25] en cítricos (30%).

Todo ello evidencia que las características de la vegetación, las condiciones de aplicación y las condiciones meteorológicas durante las evaluaciones son fundamentales a tener en cuenta a la hora de medir la exposición y estimar el riesgo de las aplicaciones de fitosanitarios en cultivos arbóreos.

4. Conclusiones

La herramienta de ayuda a la decisión CitrusVol, las boquillas de baja deriva, y la calibración del equipo y su ajuste a la vegetación objetivo son herramientas y técnicas de fácil uso para los

productores de cítricos que reducen en gran medida el impacto de las aplicaciones de productos fitosanitarios en el medio ambiente y las personas. Además, es necesario realizar estudios más amplios de las pérdidas que se producen en las aplicaciones de fitosanitarios en cítricos en el sur de Europa y la exposición que estas producen al medio ambiente y las personas para realizar una evaluación precisa de la exposición y riesgo en estos tratamientos.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto LIFE PERFECT "Pesticide Reduction using Friendly and Environmentally Controlled Technologies" (proyecto ref. LIFE17/ENV/ES/000205), a través del instrumento financiero LIFE cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Rural (FEDER). Cruz Garcerá es beneficiaria de un contrato postdoctoral DOC-INIA financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Agroalimentaria (ref. DR2015-0318).

Los autores agradecen a la empresa Fontestad, S.A. que nos permitió realizar los ensayos en sus parcelas comerciales de cítricos.

Referencias

9. ISO. ISO/FDIS 22866, Equipment for Crop Protection - Methods for Field Measurement of Spray Drift. ISO. 2005, Geneva.
10. Gil Y, Sinfort C. Emission of pesticides to the air during sprayer application: A bibliographic review. Atmospheric Environment. 2005, 39, 5183–5193.
11. CE. Reglamento (CE) n.º 1107/2009 del parlamento europeo y del consejo de 21 de octubre de relativo a la comercialización de productos fitosanitarios y por el que se derogan las Directivas 79/117/CEE y 91/414/CEE del Consejo. Revista Oficial de la Unión Europea. 2009, L 309, 1-50.
12. Matthews GA, Hamey PY. Exposure of bystanders to pesticides. Pesticide Outlook. 2003, 14(5), 210-212.
13. EFSA. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment of plant protection products. EFSA Journal. 2022, 20(1), 7032.
14. Lloyd GA, Bell GJ, Samuels SW, Cross JV, Berry AM. Orchard sprayers - Comparative operator exposure and spray drift study. Internal Report MAFF. 1987, 49 pp.
15. Ganzelmeier H, Rautmann D. Studies on the spray drift of plant protection products. Mitteilungen aus der BBA für Land-und Forstwirtschaft. 1995, 305, 111 pp.
16. Belcher SE, Jerram N, Hunt JCR. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements. The Journal of Fluid Mechanics. 2003, 488, 369-398.
17. Farooq M, Salyani M. Modeling of spray penetration and deposition on citrus tree canopies. Transactions of the ASABE. 2004, 47, 619-627.
18. Da Silva A, Sinfort C, Tinet C, Pierrot D, Huberson S. A lagrangian model for spray behaviour within vine canopies. Aerosol Science. 2006, 37, 658-674.
19. Walklate PJ. A simulation study of pesticide drift from an air-assisted orchard sprayer. Journal of Agricultural Engineering Research. 1992, 51, 263-283.
20. Farooq M, Salyani M. Spray penetration into the citrus tree canopy from two air-carrier sprayes. Transactions of the ASAE. 2002, 45, 1287-1293.
21. Delele MA, De Moor A, Sonck B, Ramon H, Nicolaï BM, Verboven P. Modelling and validation of the air flow generated by a cross flow air sprayer as affected by travel speed and fan speed. Biosystems Engineering. 2005, 92, 165-174.
22. Derksen RC, Zhu H, Fox RD, Brazee RD, Krause CR. Coverage and drift produced by air induction and conventional hydraulic nozzles used for orchard applications. Transactions of the ASABE. 2007, 50, 1493-1501.
23. Garcerá C, Moltó E, Chueca P. Spray pesticide applications in Mediterranean citrus orchards: Canopy deposition and off-target losses. Science of the Total Environment. 2017, 599–600, 1377–1362.

24. Miller DR, Stoughton TE, Steinke WE, Huddleston EW, Ross JB. Atmospheric stability effects on pesticide drift from an irrigated orchard. Transactions of the ASAE. 2000, 43, 1057-1066.
25. Gil Y, Sinfort C, Brunet Y, Polveche V, Bonicelli B. Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying. Atmospheric Environment. 2007, 41, 2945-2957.
26. Wang M, Rautmann D. A simple probabilistic estimation of spray drift factors determining spray drift and development. Environmental Toxicology and Chemistry. 2008, 27, 2617-2626.
27. Endalew AM, Debaer C, Rutten N, Vercammen J, Delele MA, Ramon H, Nicolaï BM, Verboven P. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow. Computers and Electronics in Agriculture. 2010, 71, 128-136.
28. Garcerá C, Fonte A, Moltó E, Chueca P. Sustainable use of pesticide applications in citrus: A support tool for volume rate adjustment. Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017, 14, 715.
29. Health and Safety Executive (HSE), Dawick H, Hamey P, MacDonald A, Chan J, Stevens M, Childs K, Saint-Mart J, Wesley C. Proposals for new spray drift exposure values in orchard and vineyards for residents and bystanders. Bystander Resident Orchard Vineyard (BROV) Project report, 120 pp.
30. Butler Ellis MC, Lane AG, O'Sullivan CM, Alanis R, Harris A, Stallinga H, van de Zande JC. Bystander and resident exposure to spray drift from orchard applications: field measurements, including a comparison of spray drift collectors. Aspects of Applied Biology. 2014, 122, 187-194.
31. Meli SM, Renda A., Nicelli M, Capri E. Studies on pesticide spray drift in a Mediterranean citrus area. Agronomie. 2003, 23, 667–672.
32. van de Zande JC, Butler Ellis MC, Wenneker M, Walklate PJ, Kennedy M. Spray drift and bystander risk from fruit crop spraying. Aspects of Applied Biology. 2014, 122, 177-186.
33. Torrent X, Garcerá C, Moltó E, Chueca P, Abad R, Grafulla C, Román C, Planas S. 2017. Comparison between standard and drift reducing nozzles for pesticide application in citrus: Part I. Effects on wind tunnel and field spray drift. Crop Protection. 2017, 96, 130-143.

Composición y grupos funcionales del aceite de *Moringa oleifera* de Colombia: un estudio comparativo con aceites vegetales de España y Portugal

L. Lozano-Castellanos[1*], L. Navas-Gracia[1], A. Correa-Guimaraes[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia; luisafernanda.lozano@uva.es* (L.F.L.-C.); luismanuel.navas@uva.es (L.M.N.-G.); adriana.correa@uva.es (A.C.-G.)

Abstract: *Moringa oleifera* oil is known for its high nutritional value and content of unsaturated fatty acids and antioxidants. In this study, the oil obtained from moringa seeds from the Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) located in the department of Tolima, Colombia, was examined. The objective was to identify and compare the functional groups of moringa oil with commercial vegetable oils from Spain and Portugal using the Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) technique. The results revealed that moringa oil is of excellent quality for consumption thanks to its high oleic acid content, low levels of polyunsaturated fatty acids, and a wide variety of primary and secondary antioxidant metabolites. Furthermore, compared to the other oils, moringa was highly pure, with no signs of aging, no presence of contaminants, and no lipid peroxidation. These findings suggest that moringa oil has excellent potential in the food and pharmaceutical industry due to its similarity with highly demanded vegetable oils.

Palabras clave: Moringa, FTIR, calidad alimentaria, ácidos grasos.

1. Introducción

La *Moringa oleifera*, originaria de la región del Himalaya, es un árbol ampliamente estudiado en el campo de la ciencia debido a sus propiedades nutricionales y medicinales [1-3]. Aunque todas sus partes son aptas para consumo humano y animal, el aceite posee una composición importante de ácidos grasos saturados, behenico, esteárico y araquidico, y de ácidos grasos monoinsaturados que podrían sustituir el aceite de oliva [4]. Esta especie se ha extendido por todo el mundo debido a su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas y a su capacidad para crecer en suelos de baja fertilidad [5-7], aunque se ha observado un desarrollo óptimo comercial en regiones subtropicales y tropicales como en India, África, América del Sur y Central, México, Hawai, y Asia [8]. En Colombia, este árbol posee una oportunidad de crecimiento en un área aproximada de 75,758 km^2, y 85,721 km^2 en asociación con otros cultivos oleíferos [9]. El municipio de Armero Guayabal en el departamento del Tolima, hace parte del área prometedora para su establecimiento [10]. No obstante, a pesar de los proyectos de investigación y empresariales emprendidos para promover su desarrollo, no se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de la calidad del aceite extraído de las plantaciones en Armero, particularmente del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar los grupos funcionales presentes en el aceite de moringa obtenido en el CURDN, así como comparar su calidad con otros aceites disponibles en el mercado (aceite de oliva extra virgen de España y aceites de macauba de Portugal) para identificar su composición química y determinar su calidad en términos de propiedades físicas y nutricionales. Para ello, se empleó como técnica analítica la Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

1.1. Metabolitos primarios y secundarios del aceite de moringa

Los seres vivos sintetizan metabolitos primarios para sostener sus funciones vitales, mientras que los metabolitos secundarios tienen roles específicos en adaptación y supervivencia [11]. La moringa ha sido estudiada con diversas técnicas (Tabla 1), evidenciando la presencia de ácidos grasos, glucósidos, flavonoides, taninos y compuestos fenólicos, los cuales se asocian con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas [12-13].

Tabla 1. Metabolitos secundarios presentes en el aceite de *Moringa oleifera*

Componentes	Cantidad	Referencia
Ácidos Grasos		
C16:0	6.45 ± 0.20 %	[14]
C16:1	0.97 ± 0.07 %	[14]
C18:0	5.50 ± 0.25 %	[14]
C18:1	73.22 ± 0.50 %	[14]
C18:2	1.27 ± 0.12 %	[14]
C18:3	0.30 ± 0.07 %	[14]
C20:0	4.08 ± 0.10 %	[14]
C20:1	1.68 ± 0.10 %	[14]
C22:0	6.16 ± 0.15%	[14]
Polifenoles totales	53,4 ± 2,26 mg ácido gálico/kg	[15]
Flavonoides totales	18.24 ± 0.01 mg rutina/g	[16]
Vitamina E (α-Tocoferol)	274,65 ± 0,18 mg/kg	[15]
Capacidad antioxidante	37.94 ± 0.02 mg ácido ascórbico/g	[16]
Esterol (β-Sitosterol)	1613.3 ± 84.3 mg/kg	[17]
Glucomoringin	8619.44 ± 573.20 mg/100 g	[18]

1.2. Grupos funcionales de aceites vegetales y minerales

Cada enlace y grupo funcional muestra una firma de absorción única, posibilitando la identificación y caracterización de compuestos mediante técnicas espectroscópicas como FTIR. La Tabla 2 presenta investigaciones que emplearon dicho método para identificar los grupos funcionales en aceites vegetales y minerales, y su comparación con el aceite de moringa.

Tabla 2. Principales bandas de absorción (expresados en cm^{-1}) en el espectro ATR-FTIR del aceite de moringa frente a aceites vegetales y minerales (aceites estándar)

Bandas de absorción		Grupo funcional	Referencia
Aceite moringa	Aceites estándar		
721,94	720 – 680	(CH_2) rocking Aliphatic $(CH_2)_n$	[19]
	724	Fingerprint region C-H	[20]
	720	str, bend, and rocking vib of aliphatic hydrocarbon	[21]
	721	$–CH_2–$ Balanceo (Rocking) $–(CH_2)_n–$	[22]
	724	–HC=CH –(cis-) *Bend (rocking)*	[23]
1.096,35	1.094	Fingerprint region C-H	[20]
	1.099	C–O *str*	[21]

Bandas de absorción		Grupo funcional	Referencia
Aceite moringa	Aceites estándar		
	1.100	–C–O *str*	[23]
1.117,82	1.114	Fingerprint region C-H	[20]
	1.114	C–O *str*	[21]
	1.110	–C–O *str*	[22]
	1.120	–C–O *str*	[23]
1.160,51	~1.160, ~1.075	=C–H in-plane *def vib* Aromatic = C–H (substituted benzenes)	[19]
	1.164	Fingerprint region C–H	[20]
	1.162	C–O *str*	[21]
	1.160	–C–O *str*	[22]
	1.165	–C–O, –CH2– *str*, *bend*	[23]
	1.162	Enlace éter	[24]
1.377,28	1.390 – 1.370	C–H *def vib sym* (C–CH_3)	[19]
	1.465 – 1.377	str, bend, and rocking vib of aliphatic hydrocarbon	[21]
	1.375	–C–H (CH_3) *Sym bend*	[22]
	1.378	–C–H, –CH_3– *bend sym*	[23]
1.464,50	1.465 – 1.440	C–H *def vib asym* –CH_3 (alcane)	[19]
	1.500 – 1.450	Presencia de Benceno C=C	[24]
	1.459	δ(CH_2), δ(CH_3) CH_2 scissoring CH_3 asym	[20]
	1.465 – 1.377	str, bend, and rocking vib of aliphatic hydrocarbon	[21]
	1.465	–C–H (CH_2) bend	[22]
	1.465	–C–H, (CH_2, CH_3) bend scissoring	[23]
1.743,65	1.760 – 1.665	Grupo funcional éster (C=O) str	[24]
	1.743	C=O (éster) Triacigliceroles	[21]
	1.746	–C=O (éster) *str*	[22]
	1.749	–C=O (éster) *str*	[23]
2.852,36	2.870 – 2.840	C–H str vib sym –CH_2–	[19]
	3.000 – 2.700	*sym* y *asym str* C–H del grupo CH_2	[24]
	2.858	γ (C–H) CH_2 *sym*	[20]
	3.000 – 2.800	str, bend, and rocking vib of aliphatic hydrocarbon	[21]
	2.856	–C–H (CH_2) *Sym str*	[22]
	2.856	–C–H (CH_2) *str sym*	[23]
2.921,49	2.940 – 2.915	C–H str vib asym – CH_2–	[19]
	3.000 – 2.700	*sym* y *asym str* C–H del grupo CH_2	[24]
	2.931	γ (C–H) CH_3, CH_2 asym	[20]
	3.000 – 2.800	str, bend, and rocking vib of aliphatic hydrocarbon	[21]
	2.924	–C–H (CH_2) *str*	[22]
	2.929	–C–H (CH_2) *str asym*	[23]

*str (stretching), sym (symmetric), asym (asymmetric), def (deformation), vib (vibration), bend (bending)

2. Materiales y métodos

2.1. Obtención muestra de aceite de moringa

El aceite fue suministrado por la Red Internacional de Universidades - RedMoringa, en Colombia. Su extracción se basó en un sistema de extracción en frío mediante prensado de la semilla en la Planta Piloto Móvil Extractora de Aceite de Moringa (RedMoringa, Colombia). Los aceites provenientes de España y Portugal fueron adquiridos en establecimientos de venta al por menor en España. Con el objetivo de mantener la confidencialidad y lograr una evaluación imparcial de los aceites disponibles en el mercado, esta investigación opta por no divulgar las marcas específicas para preservar su identidad.

2.1. Metodología ATR – FTIR

Los aceites fueron analizados en estado líquido utilizando el espectrómetro FTIR Nicolet iS50 ATR (Thermo Scientific's, Estados Unidos) en modo de reflectancia total atenuada. Resolución de 0,482 cm^{-1} en el rango espectral de 400 - 4000 cm^{-1} con 64 escaneos para obtener los resultados en formato de absorbancia. Se utilizó el software OMNIC Spectra 9.3.32 (Thermo Scientific's, Estados Unidos) para la visualización de los datos espectrales de las muestras.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis FTIR aplicada al aceite de moringa

Las principales bandas de absorción del espectro infrarrojo del aceite se encuentran en los rangos de 600 – 1400 cm^{-1}, conocida como Fingerprint region (C-C; C-O; C-N), entre 1600 - 1800 cm^{-1} con predominancia de C=C; C=O y C=N, y entre 2700 a 3500 cm^{-1} con enlaces C-H, O-H y N-H (Figura 1). El espectro infrarrojo (Tabla 3) demuestra que no hay señales de agua por la ausencia de bandas en las regiones 3.700 – 3.100 cm^{-1} (O-H stretching vibration) y 1.640 cm^{-1} (O-H stretching vibration) [23]; no hay signos de envejecimiento por la ausencia del grupo carbonilo en las regiones de 1.665 – 1.572 cm^{-1} (C=C str vib) [20], y tampoco hay algún tipo de contaminación por la ausencia de las bandas 2.942 y 2.863 cm^{-1} (C–H stretching vibration asymetric – symmetric), 1.450 cm^{-1} (C–H deformation vibration asymetric), 1.606 y 1.051 cm^{-1} (C=C stretching vibration), 1.033 cm^{-1} (S=O stretching vibration), y 879 y 809 cm^{-1} (Aromatic =C–H, deformation vibration), a excepción de la banda a 1.377 cm^{-1} (C–H deformation vibration symetric) [19].

Las bandas entre los 4.000 – 3.100 cm^{-1} (O-H stretching), 1.650 – 1.550 cm^{-1} (C=C- (cis-) stretching), 1.050 cm^{-1} (C-O bands) - 800 cm^{-1} (C-H bands) y 690 cm^{-1} (Aromatic= C-H deformation vibration), correspondientes a la presencia de cadenas, grados, o formas de insaturación de los grupos acilo asignados a hidroperóxidos, ácidos u otros productos de oxidación [21,22] no son representativas en la moringa debido al bajo contenido de ácidos grasos poliinsaturados y el alto nivel de ácido oleico [20,24]. La débil presencia de la banda en 3.010 cm^{-1} (=C-H (cis-) stretching) confirma la ausencia de peroxidación lipídica [22], indicando que no hay presencia de sulfóxidos, grupos carbonilo, alcoholes, fenoles u otros derivados de ácidos debido a la oxidación del aceite [19,24]. Por otra parte, se distingue la presencia de algunos terpenos (metabolitos secundarios) en las bandas 2.931 cm^{-1} (CH_3, CH_2 asymetrical – symetrical) 1.709 cm^{-1} (C=O acid), 1.248 cm^{-1}, 1.114 cm^{-1}, 1.011 cm^{-1} y 984 cm^{-1} (C-O bands), 838 – 826 cm^{-1}, 655 cm^{-1}, y 581 cm^{-1} (C-H bands), las cuales se registran cercanas a las bandas de los triacigliceroles [20].

La región entre los 2.800 – 3.000 cm^{-1} (methylene C-H asymetric – symetric stretching), 1.743 cm^{-1} (ester C=O stretching), 1.465 cm^{-1} (methylene C-H bending), 1.375 cm^{-1} (methyl C-H

symmetric bending), 1.240 cm^{-1}, 1.160 cm^{-1}, 1.120 cm^{-1} y 1.110 cm^{-1} (ester C-O stretching) y 720 cm^{-1} (C-H rocking) corresponden a los triacilgliceroles, componentes principales de los aceites derivado de glicerol y tres cadenas de ácidos grasos, y por tanto, dominantes en ese espectro [24,21,22]. De las bandas mencionadas, 2.800 – 3.000 cm^{-1}, 1.743 cm^{-1}, 1.160 cm^{-1}, y 722 cm^{-1} concuerdan con un triacilglicerol que tiene ácidos grasos insaturados en su estructura [25].

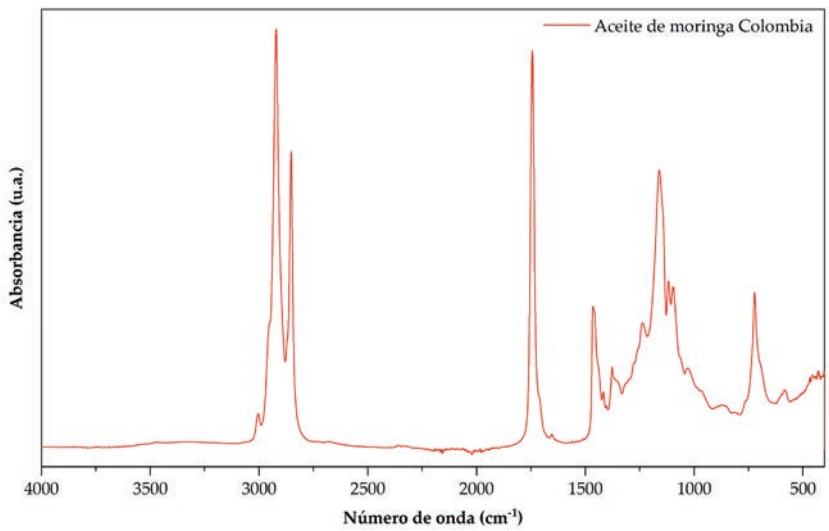


Figura 1. *Espectro infrarrojo del aceite de Moringa oleífera* de Colombia.

Tabla 3. Bandas de absorción y grupos funcionales del aceite de *Moringa oleífera* en el espectro ATR-FTIR

Banda de absorción cm^{-1}	Grupo funcional	Intensidad
721,94	CH_2 *rocking*	w
1.096,35	C – O *str*	w
1.117,82	C – O *str*	w
1.160,51	C – O (éter) *str*	m
1.377,28	C-H (CH_3) *sym bending*	vw
1.464,50	C-H (CH_2) *bending*	w
1.743,65	C=O (éster) *str*	s
2.852,36	C – H (CH_2) *sym str*	m
2.921,49	C – H (CH_2) *asym str*	vs

*str (stretching), sym (symmetric), asym (asymmetric), vs (very strong), s (strong), m (medium), w (weak), vw (very weak)

3.2. Comparación del FTIR aceite de moringa con otros aceites vegetales

Debido a que los triacigliceroles son los componentes más importantes de los aceites vegetales, los espectros tienen grandes similitudes en los grupos funcionales (Figura 2) (Tabla 4). Las mayores disparidades se observan entre el aceite refinado de Portugal y el aceite de oliva de España. El primero se caracteriza por presentar múltiples bandas de absorción en la región Fingerprint, específicamente entre 1.200 cm^{-1} y 1.350 cm^{-1}, mientras que el espectro del aceite de oliva de España se distingue por tener mayor intensidad en las bandas 3.700 cm^{-1} – 3.100 cm^{-1} (O-H stretching vibration) y en 1.640 cm^{-1} (O-H stretching vibration) indicando presencia de agua en su composición [23], y entre las bandas 1665 cm^{-1} – 1572 cm^{-1} (C=C str vib) indicando un mayor grado de envejecimiento [20].

Los aceites analizados exhiben altos niveles de ácido oleico y bajas cantidades de aceites saturados, como se evidencia en las bandas de absorción en la región Fingerprint entre 3.010 cm^{-1} y 3.000 cm^{-1} (=C-H (cis-) stretching) y 1.120 cm^{-1} – 1.095 cm^{-1}. Aquellos aceites con un mayor contenido de ácido linoleico (un ácido graso poliinsaturado) muestran una mayor frecuencia en la primera banda mencionada en comparación con aquellos que contienen grupos del ácido oleico [26]. El aceite de oliva de España exhibe la mayor intensidad en estas bandas, seguido por el aceite de oliva de Portugal, el aceite de moringa de Colombia y los demás aceites de Portugal. En cuanto al otro rango del espectro mencionado, en todos los casos se observan dos bandas alrededor de ~1.095 cm^{-1} y ~1.115 cm^{-1}, que indican la proporción de grupos saturados y oleicos, siendo sus alturas inversamente relacionadas [26]. Estas concentraciones son similares en los aceites de oliva de España, Portugal y moringa, mientras que los demás aceites muestran diferencias significativas en estas bandas, lo que indica un mayor contenido de ácidos grasos saturados.

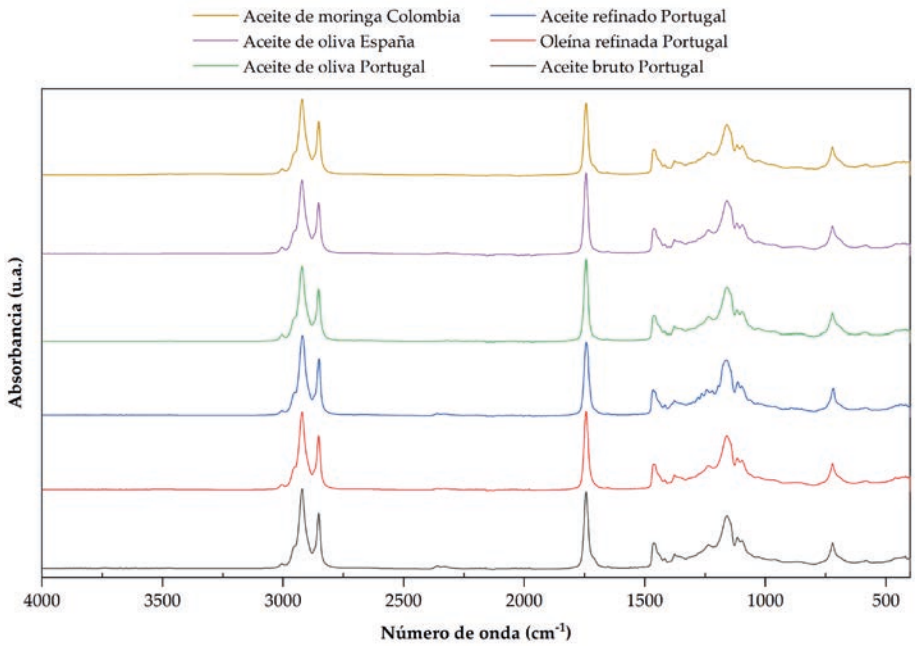


Figura 2. Espectros infrarrojos de los aceites de Colombia, España y Portugal.

Tabla 4. Principales bandas de absorción en el espectro ATR-FTIR de los aceites de Colombia, España y Portugal (datos expresados en cm^{-1})

Aceite de moringa de Colombia	Aceite de oliva de España	Aceite de oliva de Portugal	Aceite refinado de Portugal	Oleína refinada de Portugal	Aceite bruto de Portugal
721,94	722	722,04	718,17	721,69	721,51
1.096,35	1.095,77	1.096	1.096	1.096	1.096
1.117,82	1.118,05	1.117,83	1.114,97	1.116,38	1.116
1.160,51	1.159,82	1.159,74	1.161,28	1.159,99	1.159,99
1.377,28	1.377,28	1.377,31	1.377,47	1.377,29	1.377,29
1.464,5	1.463,99	1.464,03	1.466,05	1.464,62	1.464,77
1.743,65	1.743,68	1.743,65	1.743,04	1.743,43	1.743,55
2.852,36	2.852,66	2.852,64	2.851,3	2.852,43	2.852,34
2.921,49	2.921,85	2.921,82	2.919,94	2.921,55	2.921,42

4. Conclusiones

El aceite de moringa obtenido por prensado en frío en el CURDN presenta una alta calidad para el consumo humano debido a su destacado contenido de ácido oleico y niveles reducidos de ácidos grasos poliinsaturados.

Su comparación con otros aceites vegetales reveló notables similitudes en los grupos funcionales debido a los triacigliceroles, sin embargo, el aceite de moringa presenta características distintivas en su espectro las cuales se atribuyen a la presencia de terpenos y a su condición libre de agua, envejecimiento, contaminantes y oxidación lipídica. Estos hallazgos corroboran la pureza y singularidad de la composición química del aceite, la cual puede ser atribuida a sus reconocidas propiedades nutricionales y medicinales, como la existencia de metabolitos secundarios con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias.

Estos resultados respaldan la promoción de la moringa como una opción prometedora para la agricultura sostenible en el municipio de Armero Guayabal (Tolima, Colombia). Además, los resultados permitirán establecer estándares de calidad para garantizar la confiabilidad y aceptación del aceite en el mercado nacional e internacional. No obstante, se sugiere realizar investigaciones adicionales para una evaluación más exhaustiva de las propiedades y beneficios potenciales, con el fin de profundizar en su comprensión y optimizar su aprovechamiento.

5. Agradecimientos

La autora principal agradece a su equipo de trabajo quienes motivaron la redacción de este artículo. L.F.L.-C. ha sido financiada dentro de la convocatoria de contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciada por el Fondo Social Europeo y la Consejería de Educación Junta de Castilla y León (España).

Referencias

34. Huang, M.; Cople-Rodrigues, C.d.S.; Waitzberg, D.L.; Rocha, I.M.G.d.; Curioni, C.C. Changes in the Gut Microbiota after the Use of Herbal Medicines in Overweight and Obese Individuals: A Systematic Review. *Nutrients* **2023**, 15, 2203. https://doi.org/10.3390/nu15092203
35. Sokhela, H.; Govender, L.; Siwela, M. Complementary Feeding Practices and Childhood Malnutrition in South Africa: The Potential of Moringa Oleifera Leaf Powder as a Fortificant: A Narrative Review. *Nutrients* **2023**, 15, 2011. https://doi.org/10.3390/nu15082011
36. Pareek, A.; Pant, M.; Gupta, M.M.; Kashania, P.; Ratan, Y.; Jain, V.; Pareek, A.; Chuturgoon, A.A. Moringa oleifera: An Updated Comprehensive Review of Its Pharmacological Activities, Ethnomedicinal, Phytopharmaceutical Formulation, Clinical, Phytochemical, and Toxicological Aspects. *Int. J. Mol. Sci.* **2023**, 24, 2098. https://doi.org/10.3390/ijms24032098
37. Leone, A.; Spada, A.; Battezzati, A.; Schiraldi, A.; Aristil, J.; Bertoli, S. Moringa oleifera Seeds and Oil: Characteristics and Uses for Human Health. *Int J Mol Sci.* **2016** 20;17(12):2141. doi: 10.3390/ijms17122141.
38. Tzec-Gamboa, M.; Álvarez-Rivera, O.O.; Ramírez y Avilés, L.; Ku-Vera, J.; Solorio-Sánchez, F.J. Productivity and Nutritional Quality of Nitrogen-Fixing and Non-Fixing Shrub Species for Ruminant Production. *Agronomy* **2023**, 13, 1089. https://doi.org/10.3390/agronomy13041089
39. Trigo, C.; Castelló, M.L.; Ortolá, M.D.; García-Mares, F.J.; Desamparados Soriano, M. Moringa oleifera: An Unknown Crop in Developed Countries with Great Potential for Industry and Adapted to Climate Change. *Foods* **2021**, 10, 31. https://doi.org/10.3390/foods10010031
40. Stohs, S.; Hartman, M. Review of the Safety and Efficacy of Moringa oleifera. *Phytother Res.* **2015**, 29(6):796-804. https://doi.org/10.1002/PTR.5325.
41. Noulèkoun, F.; Khamzina, A.; Naab, J.B.; Khasanah, N.; Van Noordwijk, M.; Lamers, J.P.A. Climate Change Sensitivity of Multi-Species Afforestation in Semi-Arid Benin. *Sustainability* **2018**, 10, 1931. https://doi.org/10.3390/su10061931

42. Lozano-Castellanos, L.F.; Méndez-Vanegas, J.E.; Tomatis, F.; Correa-Guimaraes, A.; Navas-Gracia, L.M. Zoning of Potential Areas for the Production of Oleaginous Species in Colombia under Agroforestry Systems. *Agriculture* **2023**, 13, 601. https://doi.org/10.3390/agriculture13030601
43. Castaño, V.; Garcia, I.; Mora, J. Árboles y arbustos para silvopasturas. *Universidad del Tolima* **2018**, 1-136. ISBN:978-958-8932-56-9.
44. Fathil, N.M. The histological and physiological study of Moringa oleifera. *International Journal of Applied Sciences and Technology* **2022**, 4(3). ISSN:2717-8234
45. Bajwa, M.N.; Khanum, M.; Zaman, G.; Ullah, M.A.; Farooq, U.; Waqas, M.; Ahmad, N.; Hano, C.; Abbasi, B.H. Effect of Wide-Spectrum Monochromatic Lights on Growth, Phytochemistry, Nutraceuticals, and Antioxidant Potential of In Vitro Callus Cultures of *Moringa oleifera*. *Molecules* **2023**, 28, 1497. https://doi.org/10.3390/molecules28031497
46. Ángeles-Mayorga, Y.; Cen-Cen, E.R.; Crosby-Galván, M.M.; Ramírez-Bribiesca, J.E.; Candelaria-Martínez, B.; Sánchez-Villarreal, A.; Ramírez-Mella, M. Foliage of Tropical Trees and Shrubs and Their Secondary Metabolites Modify In Vitro Ruminal Fermentation, Methane and Gas Production without a Tight Correlation with the Microbiota. *Animals* **2022**, 12, 2628. https://doi.org/10.3390/ani12192628
47. Anwar, F.; Rashid, U. Physico-chemical characteristics of Moringa oleifera seeds and seed oil from a wild provenance of Pakistan. *Pak. J. Bot.* **2007**, 39(5), 1443-1453
48. Fernández, J.; Pascual, G.; Silva, M.; Salvá, B.; Guevara, A.; Encina, C. Efecto del tratamiento enzimático de la semilla de moringa (*Moringa oleífera*) sobre las características físico-químicas del aceite obtenido por extracción con prensa expeller. *Scientia Agropecuaria*, **2018** 9(3), 371 – 380
49. Ogbunugafo, H. A.; Eneh, F. U., Ozumba, A. N., Igwo-Ezikp, M. N., Okpuzor, J., Igwilo, I. O., Onyekwelu, O. A. Physico-chemical and Antioxidant Properties of Moringa oleifera Seed Oil. *Pakistan Journal of Nutrition*, **2011** 10(5), 409-414
50. Ruttarattanamongkol, K.; Siebenhandl E., S.; Schreiner, M.; Petrasch, A. M. Pilot-scale supercritical carbon dioxide extraction, physico-chemical properties and profile characterization of Moringa oleifera seed oil in comparison with conventional extraction methods. *Industrial Crops and Products*, **2014** 58, pp. 68–77
51. Maldini, M.; Maksoud, S. A.; Natella, F.; Montoro, P.; Petretto, G. L.; Foddai, M.; Pintore, G. Moringa oleifera: study of phenolics and glucosinolates by mass spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry*, **2014** 49(9), 900–910
52. Abbas, O.; Rebufa, C.; Dupuy, N.; Permanyer, A.; Kister, J. Assessing petroleum oils biodegradation by chemometric analysis of spectroscopic data. *Talanta*, **2008** 75(4), pp. 857-871
53. Colombini, M.P.; Giachi, G.; Iozzo, M.; Ribechini, E. An Etruscan ointment from Chiusi (Tuscany, Italy): its chemical characterization. *Journal of Archaeological Science*, **2009** 36(7), pp. 1488- 1495
54. Mahboubifar, M.; Hemmateenejad, B.; Yousefinejad, S. Classification of Edible Oils Based on ATR-FTIR Spectral Information During a Long Heating Treatment. *Journal of AOAC International*, **2017** 100(2), 351–358
55. Lu, Y.; Du, C.; Shao, Y.; Zhou, J. Characterization of rapeseed oil using FTIR-ATR spectroscopy. *Journal of Food Science and Engineering* **2014**
56. Yang, H.; Irudayaraj, J. Characterization of semisolid fats and edible oils by Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, **2000** 77, 291-295
57. Payal R., Bhutada; Ananda J. Jadhav; Dipak V., Pinjari; Parag R., Nemade; Ratnesh D., Jain. Solvent assisted extraction of oil from *Moringa oleifera Lam*. Sedes. *Industrial Crops and Products*, **2016** 82 pp.74-80
58. Gomez, N.,A.; Abonia, R.; Cadavid, H.; Vargas, I.,H. Chemical and spectroscopic characterization of a vegetable oil used as dielectric coolant in distribution transformers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **2011** 22(12), 2292-2303
59. Jaswir, I.; Mirghani, M. E. S.; Hassan, T. H.; Said, M. Z. M. Determination of Lard in Mixture of Body Fats of Mutton and Cow by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Journal of Oleo Science*, **2003** 52(12), 633–638

Estimación de los niveles nutricionales de hojas de cítricos mediante análisis no destructivo aplicando técnicas de aprendizaje automático

Guillem Miralles[1], Isabel Rodríguez-Carretero[2], Sergio Cubero[3], Marcelino Martínez[1], Fernando Mateo[1], Francisco Albert[4], Ana Quiñones[2], José Blasco[3], Juan Gómez-Sanchís[1*]

[1] IDAL, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Valencia, Av. de la Universidad , S/N, 46100Burjassot, Valencia (España). Email: Juan.Gomez-Sanchis@uv.es
[2] Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), CV-315, km 10,7, 46113 Moncada (Valencia), España.
[3] Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), CV-315, km 10,7, 46113 Moncada (Valencia), España.
[4] Departamento de Ingeniería Gráfica. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España.

Abstract: One of the characteristics of all living beings is that adequate nutrition has a positive impact on health. In the case of plants, and specifically in fruit trees, adequate nutrition is also essential for them to grow healthy and produce fruits in the highest quantity and quality possible. Therefore, optimal nutrition is key for any farmer. However, excessive use of fertilisers can harm the environment and be a waste of resources for farmers. One of the keys to achieving adequate fertilisation is an accurate diagnosis of the nutritional status of the tree. Traditionally, this diagnosis is made by destructive ionomics analysis, which represents a high economic cost and a delay in obtaining the results. This work proposes Vis-NIR hyperspectral imaging and machine learning regression models to estimate the concentrations of macronutrients (N, P, K, and Ca) and micronutrients (Mn and Fe) in citrus leaves. The methodology involved the application of several machine learning regression methods (linear regression, partial least squares, random forest, support vector regression, and Ada Boost). Data were normalised with standard normal variable (SNV), and principal component analysis (PCA) was used to reduce dimensionality. The results were promising in estimating nutrients with R^2 greater than 0,50 in all cases, especially nitrogen (R^2 of 0.77).

Palabras clave: aprendizaje automático, imagen hiperespectral, espectroscopia, agricultura de precisión, cítricos

1. Introducción

La integración de las tecnologías de la información (TIC) en la agricultura ha optimizado la toma inteligente de decisiones basadas en datos, impulsando la productividad y minimizando el impacto ecológico de los procesos agrícolas [1]. Las plantas requieren nutrientes esenciales para crecer de manera saludable y proporcionar productos de calidad [2]. Por lo tanto, una nutrición óptima es clave para cualquier agricultor. Sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes puede dañar el medio ambiente y representar una pérdida de recursos para los agricultores [3]. Una de las claves para lograr una fertilización adecuada es un diagnóstico preciso del estado nutricional del árbol. Tradicionalmente, este diagnóstico se realiza mediante análisis destructivos de la ionómica, lo que representa un costo económico elevado y un retraso en la obtención de los resultados.

La imagen hiperespectral es una técnica que captura información en múltiples bandas del espectro electromagnético. Esto permite identificar y distinguir variaciones en la reflectancia o

emisión de energía de los objetos en la escena relacionada con el estado de la planta, lo que es útil para el análisis de los cultivos. Debido a su amplio rango espectral, las imágenes hiperespectrales pueden proporcionar información rápida sobre las propiedades bioquímicas de los cultivos, como la concentración de clorofila, contenido de humedad, estado vegetativo y contenido de nutrientes. Esto facilita la monitorización del estado de los cultivos, la detección temprana de enfermedades o estreses y la optimización de los programas de riego y fertilización. Este trabajo propone el uso de imágenes hiperespectrales Vis-NIR y modelos de regresión de aprendizaje automático para estimar las concentraciones de macronutrientes (N, P, K y Ca) y micronutrientes (Mn y Fe) en hojas de cítricos, a partir de los datos obtenidos de las imágenes y modelos de regresión de aprendizaje automático.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño Experimental

El material vegetal procede de una parcela de cítricos en Almenara (Castellón) de la variedad Clemenules. En mayo de 2021, se tomaron muestras de 33 árboles, 3 muestras de 60 hojas en diferentes orientaciones: este, oeste y cenital. De cada orientación, se seleccionaron 30 hojas jóvenes (brotación de primavera) y 30 de hojas viejas, con un total de 5940 hojas. De cada muestra, se destinaron 22 hojas para la obtención de los niveles de referencia de nutrientes mediante un análisis de la ionómica foliar y otras 8 se utilizaron para adquirir imágenes hiperespectrales. Debido a su diferente tamaño, en el caso de las hojas viejas, se tomaron 2 imágenes en grupos de 4 hojas; y en las jóvenes, una sola imagen de las 8. Así, se obtuvieron 3 imágenes hiperespectrales por árbol y orientación: hojas jóvenes, primera partición de hojas viejas y segunda partición de hojas viejas. El proceso se describe en la siguiente Figura 1.

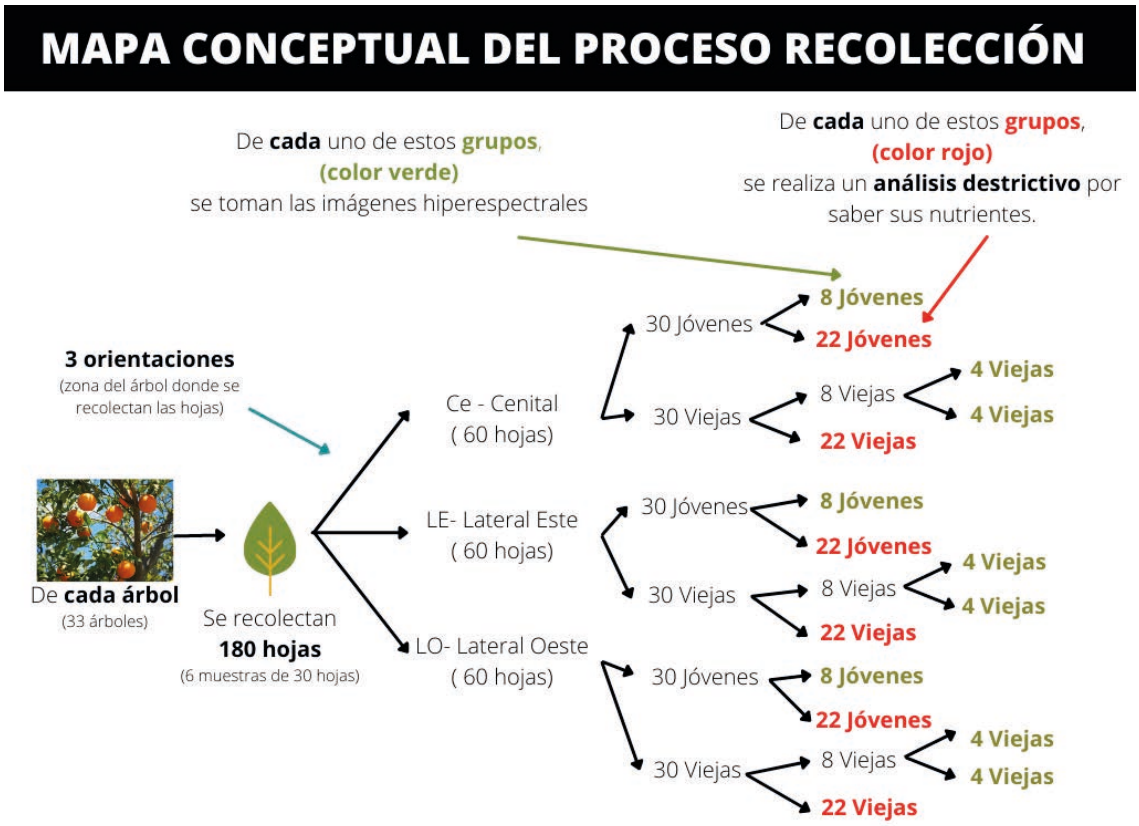


Figura 1. Esquema del proceso de recolección de datos hiperespectrales y nutricionales.

2.2. Toma y procesado de imágenes

Se utilizó un sistema de adquisición de imágenes hiperespectrales en el rango Vis-NIR, consistente en una cámara industrial y dos filtros sintonizables de cristal líquido (LCTF). Se capturaron imágenes de 1392 x 1040 píxeles con una resolución espacial de 0,14 mm/píxel en el rango espectral de 400 nm a 1050 nm, en pasos de 10 nm. Cada imagen se componía de 65 bandas.

Se utilizó un sistema basado en iluminación halógena difusa, compuesto por 12 lámparas halógenas de 35 W situadas dentro de una campana semiesférica. Para evitar problemas de imágenes borrosas debido a la dispersión cromática de la lente, se estableció el enfoque de la misma en la longitud de onda central (730 nm) del rango de trabajo. Se adquirió una imagen hiperspectral de un blanco de referencia certificada para optimizar el rango dinámico, evitar la saturación de la imagen y corregir la sensibilidad espectral del sistema.

Después de obtener las imágenes hiperespectrales, se realizaron tres etapas de procesamiento digital para extraer el espectro de cada hoja. Primero, se calibraron por referencia blanca y negra las imágenes registradas. Luego, se corrigió el desplazamiento espacial entre las imágenes. Debido a que las imágenes se obtuvieron con dos LCTF, existía una ligera variación entre ellas ocasionada por la geometría del sistema. Finalmente, se segmentó la hoja del resto de la escena mediante una máscara de umbralización y se obtuvo el espectro promedio de los píxeles de la hoja. Este espectro promedio constituyó la entrada a la etapa de preprocesado espectral y aprendizaje automático. La metodología de preprocesado se detalla en Fazari et al. [4].

2.3. Conjuntos de calibración y prueba, preprocesado espectral e ingeniería de características.

Para evaluar el rendimiento de los modelos de regresión, el conjunto inicial se dividió en un conjunto de calibración (Cal) (75 %) y un conjunto de prueba independiente (Test) (25 %). Se realizo un preporcesado espectral simple. En particular, se normalizaron las bandas espectrales estandarizándolas con el fin de uniformizar el rango de variación de las mismas. El método empleado fue standard normal variate (SNV) [5]. También se exploró una opción simple de ingeniería de características (ICR) usando el análisis de componentes principales (PCA) [6]. Se evaluaron modelos de regresión empleando como entrada diferente número de componentes principales (5, 7, 9, 12, 15, 18, 20, 25 y 30, estos números se determinaron de forma empírica hasta no conseguir mejora en el rendimiento de los métodos de regresión) y con todas las bandas sin aplicar PCA.

2.4. Modelos

En este estudio, se utilizaron cinco técnicas de regresión del campo del aprendizaje automático entre los que se incluyen la Regresión Lineal, partial least squares (PLS), support vector regression (SVR), Random Forest y Ada Boost. Todos ellos se implementaron en el lenguaje de programación Python con la ayuda de la librería Scikit-learn.

- **Regresión Lineal**, se usó como método de referencia para comparar con las otras técnicas empleadas en el trabajo. Basa su funcionamiento en suponer una relación lineal entre las variables independientes y la variable dependiente, su principal ventaja radica en la interpretabilidad del modelo [7].
- **PLS**, es un método de regresión especialmente indicado cuando las variables de entrada del problema están altamente correlacionadas. El método permite modelizar el problema reduciendo el conjunto de variables a un conjunto más pequeño de componentes no correlacionados [8].
- **SVR**, es una técnica basada en las máquinas de vectores de soporte. Esta técnica de regresión es capaz de gestionar relacionales no lineales entre las variables entrada y la

variable independiente del problema, proporcionando una solución robusta frente a posibles *outliers* [9].

- ***Random Forest***, es un método de regresión basado en la combinación (*ensemble methods*) de árboles de decisión. Se caracteriza por agregar múltiples soluciones para mejorar la predicción y la robustez de la solución [10].
- ***Ada Boost*** es un método de regresión basado en *boosting* que se basa en la idea de crear un modelo fuerte a partir de varios modelos débiles [11].

2.5. Construcción de los modelos.

Para garantizar una correcta construcción de los modelos, se empleó el conjunto de calibración. Con el fin de evitar el sobreajuste de los modelos y conseguir una combinación óptima de hiperparámetros en la fase de entrenamiento, se adoptó un enfoque de validación cruzada *K-Fold* [12] con 3 subconjuntos (*folds)*. Se empleó técnica *Grid Search* [13] para conseguir una combinación adecuada de hiperparámetros. Los rangos de variación de los hiperparámetros (en aquellos modelos con hiperparámetros libres) escogidos de forma empírica para cada modelo fueron:

- **PLSRegression**: *n_components* [1-25], *scale* [False, True], *max_iter* [100-1000], *tol* [0,1-0,00001].
- **SVR**: *kernel ['linear', 'rbf', 'sigmoid'], gamma ['scale', 'auto'], C* [0,1-250], epsilon [0,1-0,00001].
- ***RandomForest***: *n_estimators* [5-500], *max_depth* [10, 50, 100, None], *min_samples*_split [2-10], *min_samples_leaf* [1-4], *max_features ['auto', 'sqrt', 'log2', None], bootstrap [True, False].*
- ***AdaBoost***: *n_estimators* [5-500], *learning_rate* [0,001-1], *loss ['linear', 'square', 'exponential'].*

3. Resultados y discusión

3.1 Macronutrientes.

La Tabla 1 muestra los resultados relativos a la estimación de los macronutrientes nitrógeno, fosforo, potasio y calcio. Se muestran diferentes índices de rendimiento de los modelos, en particular el coeficiente de determinación R^2, el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE), tanto en el conjunto de calibración como en el de prueba.

Se observa que, para el nitrógeno todos los modelos presentan una mejora respecto a la regresión lineal. Esta tendencia se va a mantener en todos los nutrientes incluidos en el estudio. La metodología basada en *Random Forest* empleando como entrada todas las bandas, presenta los mejores resultados en el conjunto de prueba para el nitrógeno (R^2 de 0,77). Respecto al fósforo, la metodología que proporciona mejores resultados es la combinación de *Ada Boost* empleando como entradas 18 componentes principales consiguiendo un coeficiente de determinación R^2 de 0,66. En relación con el potasio, la mejor metodología es SVR empleando 9 componentes principales con una R^2 de 0,61. Del mismo modo, *Ada Boost* con 20 componentes principales es la metodología que mejores resultados proporciona para el calcio con un valor de R^2 de 0,62. La capacidad de estimación de las mejores metodologías para todos los macronutrientes es buena, con valores del coeficiente de determinación por encima de 0,6 en todos los casos.

Las mejores metodologías de estimación extraídas del análisis del coeficiente de determinación para los macronutrientes se mantienen si se analizan los otros índices de rendimiento calculados. Así, si se examinan los valores de MAE y RMSE para cada macronutriente, se observa que los valores mínimos de los errores de estimación coinciden con los valores máximos de R^2. Esto pone de manifiesto la robustez de los resultados en cuanto a la estimación del rendimiento de los modelos.

Tabla 1. Resultados de los modelos para los macronutrientes N, P, K y Ca. La columna FE muestra la mejor opción de ingeniería de características (ICR), indicando el número de componentes principales (CP) o empleando todas las bandas (No). En negrita se muestra la mejor metodología para cada macronutriente en base al valor de R^2 en el conjunto de prueba.

	MODELO	ICR	R^2 Cal	MAE Cal	RMSE Cal	R^2 Test	MAE Test	RMSE Test
	LinearRegresion	5 CP	0,585	0,132	0,180	0,335	0,145	0,223
	PLSRegression	7 CP	0,724	0,120	0,149	0,726	0,112	0,143
N	SVR	No	0,792	0,102	0,129	0,677	0,122	0,155
	RandomForest	**No**	0,813	0,087	0,123	**0,772**	**0,102**	**0,130**
	AdaBoost	No	0,793	0,101	0,129	0,761	0,105	0,133
	LinearRegresion	5 CP	0,115	0,030	0,050	0,210	0,035	0,055
	PLSRegression	7 CP	0,667	0,021	0,032	0,604	0,025	0,038
P	SVR	9 CP	0,742	0,017	0,028	0,586	0,027	0,039
	RandomForest	12 CP	0,686	0,020	0,031	0,562	0,026	0,034
	AdaBoost	**18 CP**	0,700	0,020	0,030	**0,657**	**0,025**	**0,033**
	LinearRegresion	5 CP	0,482	0,195	0,274	0,268	0,257	0,331
	PLSRegression	5 CP	0,575	0,171	0,246	0,618	0,153	0,241
K	**SVR**	**9 CP**	0,623	0,144	0,232	**0,614**	**0,144**	**0,239**
	RandomForest	No	0,658	0,132	0,222	0,510	0,179	0,271
	AdaBoost	12 CP	0,596	0,156	0,241	0,597	0,167	0,246
	LinearRegresion	5 CP	0,340	0,724	1.214	0,528	0,791	1,123
	PLSRegression	7 CP	0,730	0,504	0,763	0,537	0,675	1,113
Ca	SVR	12CP	0,794	0,353	0,662	0,595	0,623	1,041
	RandomForest	No	0,747	0,399	0,732	0,533	0,693	1,118
	AdaBoost	**20 CP**	0,739	0,405	0,741	0,**620**	**0,612**	**1,008**

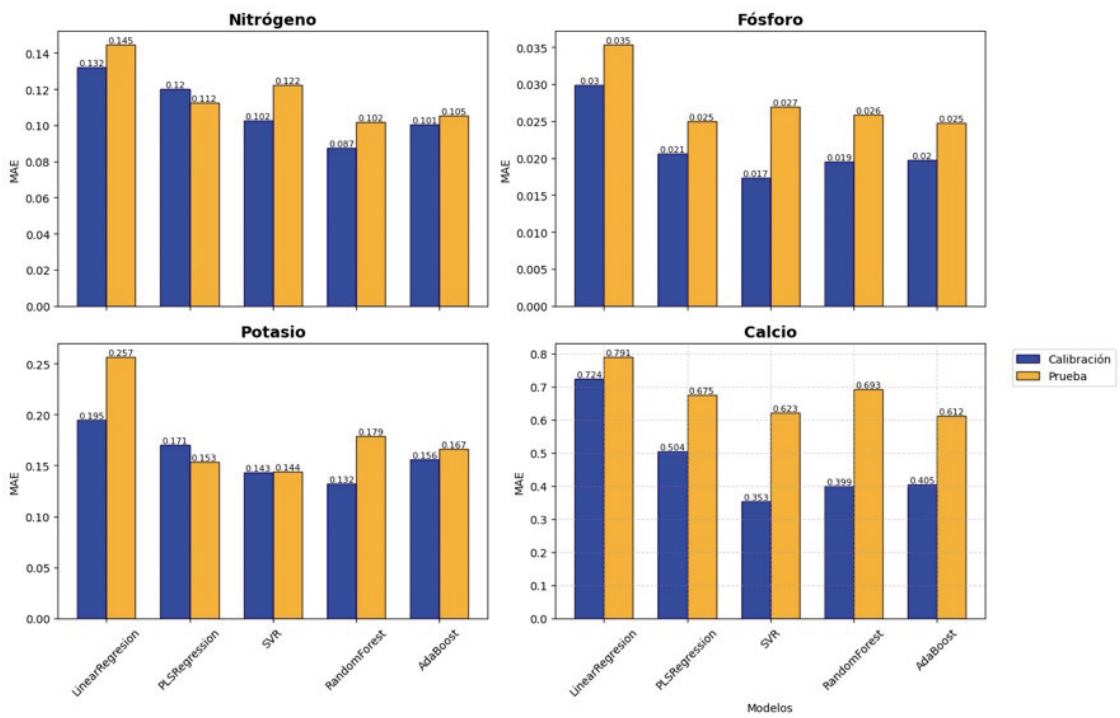


Figura 2. Comparación del R^2 obtenido calibración y prueba de los diferentes modelos que predicen los macronutrientes.

La figura 2 muestra, en un gráfico de barras, la comparación entre el MAE de los conjuntos de calibración y prueba para cada macronutriente con cada una de las metodologías empleadas. La pauta general es que el error producido en los conjuntos de calibración y prueba son muy similares (dentro de cada metodología). Este hecho pone de manifiesto que no ha habido sobreajuste en la construcción de los modelos y que la capacidad de generalización de los modelos es óptima.

3.2 Micronutrientes.

La Tabla 2 muestra los resultados relativos a la estimación de los micronutrientes manganeso, y hierro. Se muestran los mismos índices de rendimiento que en el caso de los macronutrientes. Se observa que, para el manganeso todos los modelos presentan una mejora respecto a la regresión lineal. Esta tendencia se mantiene también con el hierro. Las metodologías que mejores resultados proporcionan para el manganeso y el hierro son *Random Forest* y *Adaboost* respectivamente (R^2=0,57 y R^2=0,52). La capacidad de estimación de las mejores metodologías para los micronutrientes es menor que en el caso de los macronutrientes, no consiguiéndose valores del coeficiente de determinación mayores a 0,57 en el conjunto de prueba.

Al igual que en el caso de los macronutrientes, las mejores metodologías de estimación extraídas del análisis del coeficiente de determinación para los micronutrientes se mantienen si se analizan los otros índices de rendimiento calculados. Si se estudian los valores de MAE y RMSE para cada micronutriente, se observa que los valores mínimos de los errores de estimación coinciden con los valores máximos de R^2, esto pone de manifiesto la robustez de los resultados en cuanto a la estimación del rendimiento de los modelos.

Tabla 2. Resultados de los modelos para los micronutrientes Mn y Fe. La columna ICR muestra la mejor opción de ingeniería de características, indicando el el número de componentes principales (CP) o empleando todas las bandas (No). En negrita se muestra la mejor metodología para cada micronutriente en base al valor de R^2 en el conjunto de prueba.

	MODELO	ICR	R^2 Cal	MAE Cal	RMSE Cal	R^2 Test	MAE Test	RMSE Test
Mn	LinearRegresion	5 CP	0,331	4,838	6,081	0,277	5,384	8,321
	PLSRegression	5 CP	0,525	3,866	5,206	0,569	3,988	4,810
	SVR	5 CP	0,517	3,713	5,236	0,566	3,861	4,862
	RandomForest	**No**	0,535	3,777	5,174	**0,570**	**3,832**	**4,808**
	AdaBoost	No	0,543	3,671	5,130	0,391	4,463	5,718
Fe	LinearRegresion	5 CP	0,318	14,337	18,542	0,367	16,070	20,537
	PLSRegression	25 CP	0,410	12,990	17,359	0,465	15,590	18,876
	SVR	5 CP	0,430	12,518	17,089	0,371	14,989	20,479
	RandomForest	25 CP	0,511	12,351	15,816	0,496	14,675	18,326
	AdaBoost	**25 CP**	0,495	12,973	16,091	**0,518**	**14,298**	**17,917**

La figura 3 muestra la comparación entre el MAE de los conjuntos de calibración y prueba para cada micronutriente con cada una de las metodologías empleadas. Al igual que ocurría en el caso de los macronutrientes, los modelos no muestran sobreajuste ya que el error de calibración y test son muy similares.

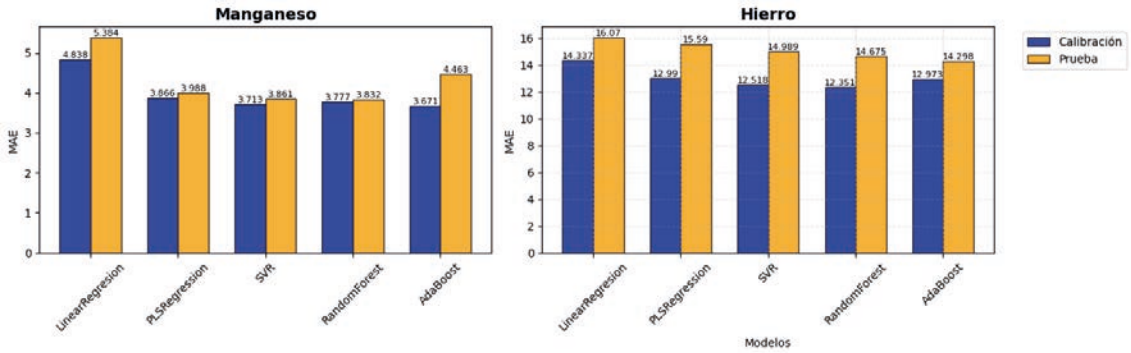


Figura 3. Comparación del R^2 calibración y prueba de los modelos que estiman el hierro y el manganeso.

4. Conclusiones

La metodología propuesta, basada en el uso de un sistema de visión hiperspectral Vis-NIR y técnicas de regresión de aprendizaje automático, permite estimar el contenido del nitrógeno con un R^2 de 0,77. Para el fósforo, potasio y calcio, se obtuvieron valores de R^2 de 0,66, 0,61 y 0,62 respectivamente. En el caso de los dos micronutrientes probados, manganeso y hierro, se obtuvieron valores de 0,57 y 0,51 respectivamente, lo que indica una mayor dificultad en su estimación.

La utilización del sistema de visión hiperspectral Vis-NIR y los modelos de regresión de aprendizaje automático se demuestran como una alternativa útil para estimar los niveles de nutrientes en las hojas de cítricos. Estos métodos ofrecen una solución no destructiva, más económica, rápida y precisa en comparación con las técnicas destructivas, costosas y lentas, cumpliendo así nuestro objetivo principal de eficiencia y reducción del impacto ambiental.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos TED2021-130117B-C31 y C33, financiados por MCIN/AEI/1 0,13039/501100011033 y por la UE "NextGenerationEU"/PRTR, y los proyectos GVA-IVIA 52203, 52204 y la UE a través del FEDER de la Generalitat Valenciana 2021-2027.

Referencias:

1. Geovanny Rambauth-Ibarra, "Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola", J. Comput. Electron. Sci.: Theory Appl., vol. 3 no. 1 pp. 34-38. January - June, 2022, doi: http://dx.doi.org/1 0,17981/cesta.03.01.2022.04
2. Petra Marschner , "Marschnner's Mineral Nutrition of Higher Plants", (3rd ed.), Elsevier, 2012, doi: https://doi.org/1 0,1016/C2009-0-63043-9
3. Jiao Chen, Shaoyu Lü, Zhe Zhang, Xuxia Zhao, Xinming Li, Piao Ning, Mingzhu Liu, "Environmentally friendly fertilisers: A review of materials used and their effects on the environment", Science of The Total Environment, Volumes 613–614, 2018, Pages 829-839, ISSN 0048-9697, doi: https://doi.org/1 0,1016/j.scitotenv.2017.09.186
4. Antonio Fazari, Oscar J. Pellicer-Valero, Juan Gómez-Sanchıs, Bruno Bernardi, Sergio Cubero, Souraya Benalia, Giuseppe Zimbalatti, Jose Blasco, "Application of deep convolutional neural networks for the detection of anthracnose in olives using VIS/NIR

hyperspectral images", Computers and Electronics in Agriculture, Volume 187, 2021, 106252, ISSN 0168-1699, doi: https://doi.org/1 0,1016/j.compag.2021.106252

5. Emily Grisanti, Maria Totska, Stefan Huber, Christina Krick Calderon, Monika Hohmann, Dominic Lingenfelser, Matthias Otto, "Dynamic Localized SNV, Peak SNV, and Partial Peak SNV: Novel Standardization Methods for Preprocessing of Spectroscopic Data Used in Predictive Modeling", Journal of Spectroscopy, vol. 2018, Article ID 5037572, 14 pages, 2018, doi: https://doi.org/1 0,1155/2018/5037572
6. Dong, Y., Shan, Y., Li, P., Jiang, L., & Zhang, X, "Nondestructive Characterisation of Citrus Fruit by near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy (NIRDRS) with Principal Component Analysis (PCA) and Fisher Linear Discriminant Analysis (FLDA)". Foods, 11(4), 1-16. 2022, doi: https://doi.org/1 0,1080/00032719.2022.2063306
7. Bishop, Christopher M., "Linear Models for Regression" in Pattern Recognition and Machine Learning, New York: Springer, 2006, doi: https://doi.org/1 0,5555/1162264
8. Vinzi, V. E., Chin, W. W., Henseler, J., & Wang, H, "Handbook of Partial Least Squares: Concepts, Methods and Applications", Springer, 2010, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-3-540-32827-8
9. Bishop, Christopher M., "Support Vector Machines for Regression" in Pattern Recognition and Machine Learning, New York: Springer, 2006, doi: https://doi.org/1 0,5555/1162264
10. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, "Random Forests" in The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, New York : Springer, Second Edition, 2009, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-0-387-84858-7
11. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, "Boosting and Additive Trees" in The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, New York : Springer, Second Edition, 2009, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-0-387-84858-7
12. Refaeilzadeh, P., Tang, L., Liu, H., "Cross-Validation " In: LIU, L., ÖZSU, M.T. (eds) Encyclopedia of Database Systems. Springer, Boston, MA, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-0-387-39940-9_565
13. Feurer, M., Hutter, F, "Hyperparameter Optimization". In: Hutter, F., Kotthoff, L., Vanschoren, J. (eds) Automated Machine Learning. The Springer Series on Challenges in Machine Learning. Springer, Cham, 2019, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-3-030-05318-5_1

Shock-absorbing effect of air dampers to attenuate the pulsating effect of PWM nozzles in blast sprayers

V. Saiz-Rubio[1], C. Ortiz[1], A. Torregrosa[1], E. Orti[1], M. Pérez[1], A. Cuenca[1], F. Rovira-Más[1]

[1] Dpto. Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universitat Politècnica de València; e-mail: cortiz@dmta.upv.es

Abstract: The use of pesticides is still a decisive agricultural operation for specialty crops. In vineyards and orchards, air-assisted sprayers are typically used for crop protection. Precision agriculture techniques are being developed to deposit the minimum necessary amount of pesticide on the target. In this line, Pulse-Width-Modulated (PMW) solenoid valves were controlled to deliver a site-specific amount of product to match vineyard structures in variable rate spray applications. However, previous research with the system showed that severe pressure fluctuations resulted in unacceptable flowrate inaccuracies and irreversible damage to measuring sensors. The present study analyzes the damping effect of two accumulators mounted within the hydraulic circuit of an air-assisted vineyard sprayer equipped with 24 solenoid valves. Two accelerometer locations and four duty cycles were combined to quantize the pulsating effect of the variable rate sprayer developed. The results showed a significant damping effect of the air accumulators for lower duty cycles, and revealed the importance of considering the impacting effect of the pulses generated from the PWM nozzles at frequencies of 10 Hz.

Palabras clave: PWM nozzle, vibration, air-accumulator, duty cycle, shock absorber

1. Introduction

Plant protection and the use of pesticides is still necessary to maintain crop production at profitable rates of yield and quality (Vercruysse and Steurbaut, 2002; Keulemans et al., 2019). Air-assisted orchard sprayers are commonly used in vineyards and orchards as the primary method of pulverization (Ranta et al., 2021). Various studies focused on spray deposition have demonstrated that an important amount of the applied product is lost (Rathnayake et al., 2021; Schönenberger et al., 2022). However, precision viticulture technology could reduce the long-term impact of viticultural management practices (Tardáguila et al., 2021). In this line, PWM (Pulse-Width-Modulated) solenoid valves were developed to control the flow rate according to the sprayer position and independently of circuit pressure with the purpose of matching tree structures in variable rate spray applications (Liu et al. 2012). Previous authors have reported the effect of pressure fluctuations caused by PWM nozzles and resulting flowrate inaccuracies of air-assisted orchard sprayers (Silva et al., 2018; Fabula et al., 2020; Salcedo et al., 2020; Salcedo et al., 2021). Fabula et al. (2021), studying three different PWM nozzle control systems, confirmed that PWM systems could deliver incorrect flow rates caused by variations in the time cycle determined by peak time, stabilized application pressure time, and fall time.

Orti et al. (2022) studied opening and closing performances for different duty cycles and confirmed the accurate of the nozzle operation according to the duty cycle. However, significant pressure variations were found at nozzle level. They concluded that further research needed to

be addressed to confirm the suitability of PWM systems for regulating nozzle flow rates in blast sprayers without modifying the system pressure.

Several researchers have used accelerometers to study vibrations on agriculture machinery (Feijoo et al., 2021; Wang et al., 2021; Samuel et al., 2022), and particularly boom vibrations in spray bars to improve the performance of spraying operations (Herbst et al., 2018; Qiu et al., 2021; Kappaun et al., 2021). Air dampers have been used to reduce vibrations in different agricultural applications (Kennes et al., 1998; Herbst and Wolf, 2001; Tahmasebi et al., 2018a; Tahmasebi et al., 2018b).

The objective of this paper is to analyze the damping effect of two pneumatic accumulators inserted in the hydraulic circuit of an air-assisted vineyard sprayer with the goal of attenuating the pressure peaks resulting from the pulses exerted by the solenoids, measuring accelerations at two specific locations when applying four duty cycles.

2. Materials and methods

A custom-modified air-assisted vineyard sprayer equipped with 24 solenoid shutoff valves (115880 e-ChemSaver, TeeJet Technologies, Glendale Heights, IL, USA), using hollow disc-cone nozzles (ALBUZ® ATI 80°, Solcera, Évreux, France) was used for the study in static laboratory conditions, as shown in Figure 1.



Figure 1. Vineyard air-assisted sprayer used for the tests, with four nozzle-supporting arms.

The four arms of the sprayer, each holding six nozzles grouped in one sector, were unfolded during the static experiments. However, all four sectors comprising the 24 nozzles were kept open during the tests for the machine to mimic real conditions, even though measurements only took place in one sector. An analog pressure gauge, a digital pressure gauge P_r (digital manometers 1600B, Gems Sensors & Controls, Plainville, CT, USA) and an air-charged accumulator were included in the testing assembly for each side of the sprayer, where each side fed two sectors, in Figure 2. High speed camara recordings of the analog pressure gauge were registered.

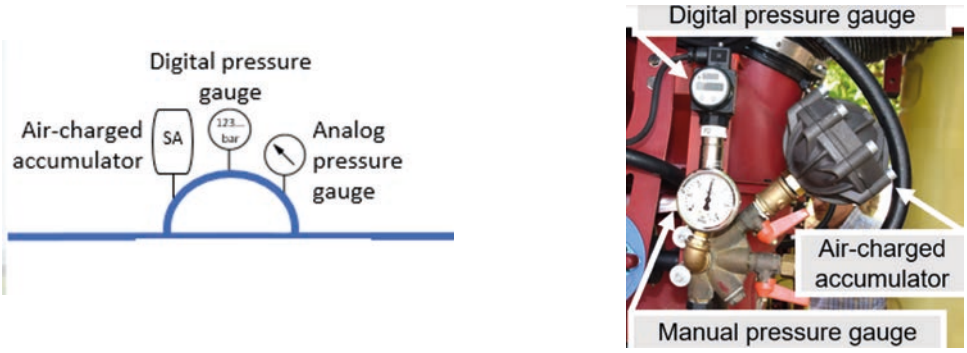


Figure 2. Analog pressure gauge, digital pressure gauge (pressure Pr) and air-charged accumulator mounted on each side of the sprayer.



Figure 3. Measuring points for the accelerometers: central pipe A_P (left) and close to the nozzle A_n (right).

Two accelerometer locations (central pipe A_P and close to the nozzle A_n), the actuation of the accumulator (off and on), and the applied duty cycles, DC, (20 %, 30 %, 50 %, and 70 %) were combined over the tests, three repetitions were carried out per combination of experimental factors. A 3-axis accelerometer (Kistler 8763A500, FABRICANTE, CIUDAD, PAIS) with a measuring range of ± 500 g, a sensitivity of 10 mV/g, a weight of 3.3 g, and a mini cube design 0.01 m in length were used to measure vibrations. In addition, the digital oscilloscope PicoScope® (Picotechnology, St. Neots, United Kingdom) was used to register the vibration signals, which were analyzed through the analysis of variance (ANOVA) calculated with statistics software Statgraphics Centurion 18 (Statgraphics Technologies, Inc. The Plains, VA, USA). Figure 3 shows the position of the two measuring points for the acceleration and their distance to the shock absorber.

3. Results and discussion

3.1. Pressure oscillation

From image analysis of the high speed camara recording of the analog pressure gauge, the oscillatory behavior of the pressure registered by the analog pressure gauge was confirmed when the accumulator was not used (off), as plotted in Figure 4. The pressure registered by the analog pressure gauge presented an oscillatory pattern, with an amplitude of 20 Pa centered in 660 Pa, and a frequency of 18 Hz. The oscillations indicated by the pressure gauge were affected by different factors, apart from those related to the pulses of the nozzles (10 Hz).

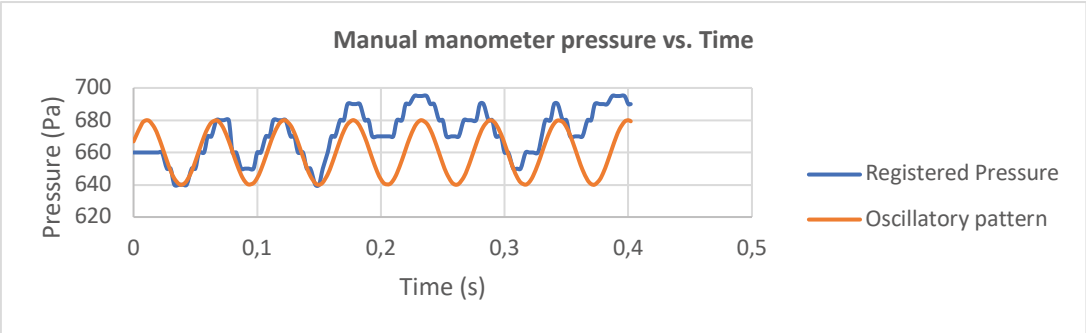


Figure 4. Registered pressure from the analog manometer (Pr) and resulting oscillatory pattern, obtained from the image analysis of the high-speed video recording.

The data recorded with the digital manometer confirmed the results obtained with the pressure gauge, yielding an oscillatory pattern when the accumulator was not active (Figure 5). This behavior, on the contrary, was significantly reduced when the accumulator was active (on).

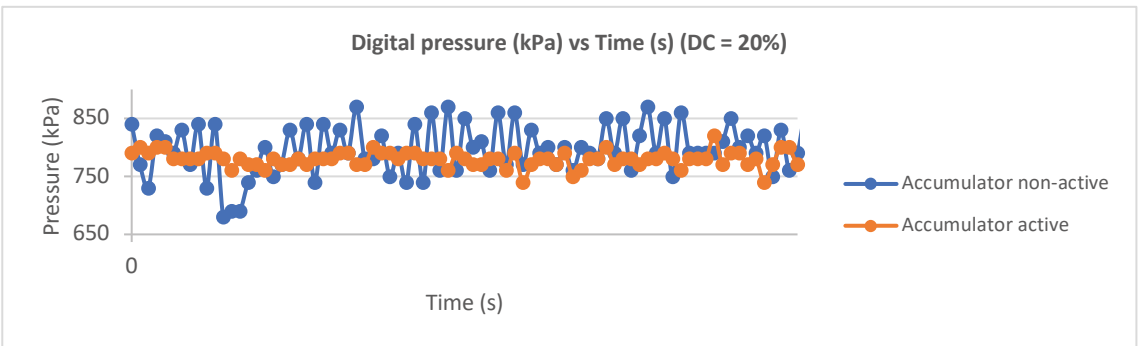


Figure 5. Pressure with time from the digital pressure sensor (KPa): when the accumulator was not active (off) and when the accumulator was active (on).

3.2. Vibration analysis

The first step in the analysis consisted in assessing the differences related to the two different locations of the accelerometers (Figure 3). When the accelerometer was located in the central pipe (A_P), the acceleration registered during the spraying period was not significantly different (Figure 6) than the acceleration registered during the non-spraying period (general vibration of the equipment due to the alternating pump and hydraulic effects not related to the spraying-nozzles operation). This result shows how the vibrations registered in the central metallic pipe were not greatly affected by the pulsating nozzles, and therefore could not be clearly distinguished from the general vibrations affecting the sprayer regardless of the spraying operation.

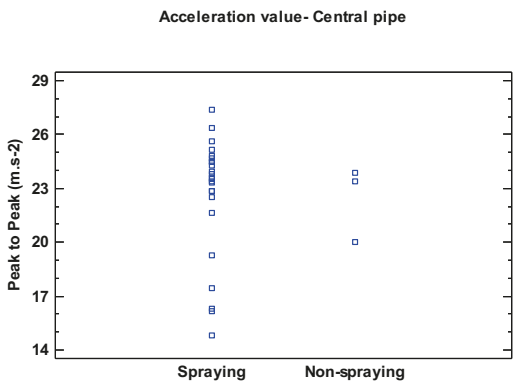


Figure 6. Peak to peak acceleration in OX axis in the accelerometer located in the central pipe when the equipment is spraying (working) and when the equipment is not spraying (non-spraying), al DC included.

However, when the accelerometer was located closer to the nozzles (position A_n in sector S1), significant differences were found between the acceleration in the OX axis (peak to peak) registered when spraying and when the equipment was not spraying, showing a significant increase in the vibration due to the pulsating spraying system, as shown in Figure 7.

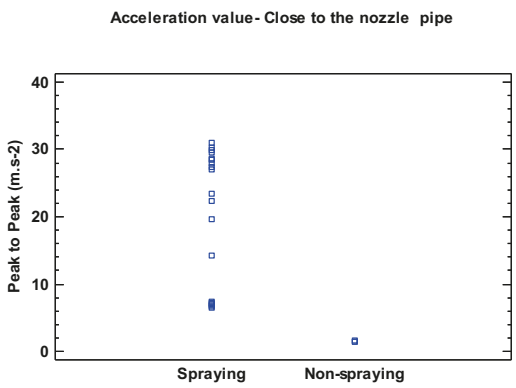


Figure 7. Peak to peak acceleration in OX axis registered in the accelerometer located close to the nozzle when the equipment is spraying (working) and when the equipment is not spraying (non-spraying), all DC included.

3.2. Coupling effect of the accumulator and DC on the vibration

When the accelerometer registered the vibrations close to the nozzle (A_n), significant effects of the factors damping action of the accumulator and the DC on the vibration magnitudes were found, p-value< 0.05, Table 1.

Table 1. Analysis of variance of the effect of the accumulator (activated and non-activated) and the duty cycles (20 %, 30 %, 50 % and 70 %) on the Peak to Peak (m.s-2) value of the registered acceleration in the OX axis of the accelerometer located close to the nozzle.

Source	Sum of square	df	Mean square	F-ratio	P-value
Main effect					
A: accumulator active/non-active	0.4619	1	0.4619	6.01	0.0291
B: DC	26.8474	2	13.4237	174.67	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.8211	2	0.4106	5.34	0.0203
RESIDUES	0.9991	13	0.0769		
TOTAL (CORRECTED)	28.7452	18			

The significant damping effect of the accumulator was confirmed, especially for low duty cycles (under 50 %), where frequent opening and closing of the valves occurred, as plotted in Figure 8. However, a significant diminution in the magnitude of acceleration (vibration parameter) was found for 70 %.

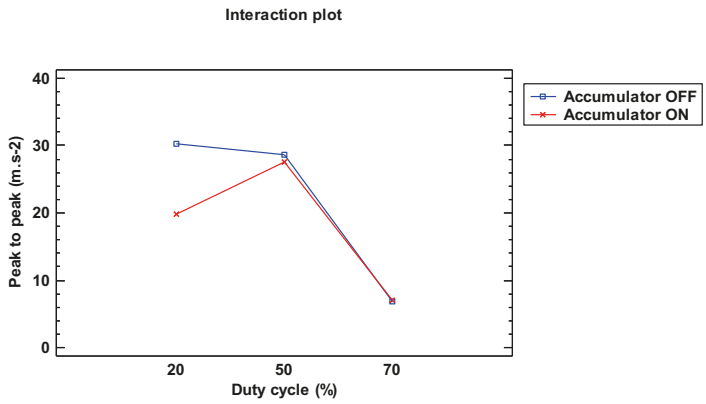


Figure 8. Peak to peak acceleration in OX axis (m.s-2) registered in the accelerometer located close to the nozzle when the accumulator is opened (OFF) and when the accumulator is closed (ON) for the different duty cycles (%).

4. Conclusions

The pulsating effect of PWM systems at nozzle level with solenoid valves was confirmed for a vineyard sprayer. The impact of the pulses was significantly higher when using lower duty cycles under 50 %. Such impact was shown to be reduced up to 50 % with the introduction of air accumulators in the hydraulic circuit, which actuated as active shock absorbers. Similarly, the damping effect of the air accumulators was more intense for lower duty cycles. For an effective spraying under the context of variable rating, it is crucial to consider the vibration effect of the

pulses exerted from the PWM nozzles. Further research should be addressed in order to attenuate the pulsating effect of PWM valves when working with low duty cycles to deliver low-volume treatments, as well as to further confirm the positive damping effect of strategically placing air accumulators within the complex hydraulic systems of conventional blast sprayers.

5. Acknoledments

This research was funded by the Government of Spain through the project "Smart spraying for a sustainable vineyard and olive trees" PIVOS (PID2019-104289RB).

References

60. Keulemans, W.; Bylemans, D.; de Coninck, B. 2019. Farming without Plant Protection Products. Can We Grow without Using Herbicides, Fungicides and Insecticides? Strasbourg (France) 978-92-846-3993-9, European Parliament, pp 44

61. Vercruysse and Steurbaut. 2002. POCER. the pesticide occupational and environmental riskindicator. Crop Protection 21. 307–315

62. Ranta, O.; Marian, O.; Muntean, M.V.; Molnar, A.; Ghețe, A.B.; Crișan, V.; Stănilă, S.; Rittner, T. 2021. Quality Analysis of Some Spray Parameters When Performing Treatments in Vineyards in Order to Reduce Environment Pollution. Sustainability, 13, 7780. https://doi.org/10.3390/su13147780

63. Schönenberger, U.T.; Simon, J.; Stamm, C. 2022. Are spray drift losses to agricultural roads more important for surface water contamination than direct drift to surface waters?. Science of The Total Environment,809, 151102 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151102.

64. Rathnayake, A.P.; Chandel, A.K.; Schrader, M.J.; Hoheisel, G.A.; Khot, L.R. 2021. Spray patterns and perceptive canopy interaction assessment of commercial airblast sprayers used in Pacific Northwest perennial specialty crop production. Computers and Electronics in Agriculture,184, 106097 https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106097.

65. Tardáguila, J.; Stoll, M.; Gutiérrez, S.; Proffitt, T.; Diago,M.P. 2021. Smart applications and digital technologies in viticulture: A review. Smart Agricultural Technology, 1, 100005 https://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100005.

66. Liu, H.; Zhu, H.; Chen, Y.; Shen, Y.; Ozkan, H.E. 2012. An Electronic Flow Control System for a Variable-rate Tree Sprayer. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Dallas, Texas, July 29 - August 1, 2012 121337321. https://doi:10.13031/2013.41766

67. Silva, E.J; Zhu, H.; Arantes Rodrigues da Cunha, J.P. 2018. Spray outputs from a variable-rate sprayer manipulated with PWM solenoid valves. Applied Engineering in Agriculture. 34(3): 527-534. https://doi: 10.13031/aea.12556

68. Fabula J.V; Sharda A; Flippo D; Ciampiti I; Kang Q. 2020. Boom pressure and droplet size uniformity of a pulse width modulation (PWM) spray technology. ASABE 2020 Annual International Meeting 2001041. Omaha. Nebraska July 12–15. 2020

69. Salcedo R; Zhu H; Zhang Z; Wei Z; Chen L; Ozkan E. 2020. Evaluation of PWM technologies for pesticide spray applications in a two-year old apple orchard. ASABE 2020 Annual International Meeting 2000079. Omaha. Nebraska July 12–15. 2020

70. Salcedo R; Zhu H; Jeon H; Wei Z; Ozkan E; Gil E. 2021. Characterization of volumetric droplet size distributions from PWM-controlled hollow-cone nozzles designed for variable-rate air-assisted sprayers. ASABE 2021 Annual International Meeting 2100038. Virtual July 12–16. 2021

71. Fabula J; Sharda A; Kang Q; Flippo D. 2021. Nozzle flow rate, pressure drop, and response time of pulse width modulation (PWM) nozzle control systems. Transactions of the ASABE 64(5). 1519-1532

72. Ortí, E.; Cuenca, A.; Pérez, M.; Torregrosa, A.; Ortiz, C.; Rovira-Más, F. 2022. Preliminary Evaluation of a Blast Sprayer Controlled by Pulse-Width-Modulated Nozzles. Sensors, 22(13), 4924. https://doi.org/10.3390/s22134924

73. Feijoo, F.; Gomez-Gil, F.J.; Gomez-Gil, J. 2020. Application of Composite Spectrum in Agricultural Machines. Sensors, 20, 5519.
https://doi.org/10.3390/s20195519

74. Wang, J.; Xu, C.; Xu, Y.; Wang, J.; Zhou, W.; Wang, Q.; Tang, H. 2021. Resonance Analysis and Vibration Reduction Optimization of Agricultural Machinery Frame—Taking Vegetable Precision Seeder as an Example. Processes 2021, 9, 1979.
https://doi.org/10.3390/pr9111979

75. Samuel, S.; Singh, H.; Singh, J.; Prakash, C.; Dhabi, Y.K. 2022. Whole body vibration exposure among the tractor operator during soil tillage operation: an evaluation using ISO 2631-5 Standard. Shock and Vibration, 6412120, 1-8.
https://doi.org/10.1155/2022/6412120

76. Herbst, A.; Osteroth, H.J.; Stendel, H. 2018. A novel method for testing automatic systems for controlling the spray boom height. Biosystems Engineering, 174(1),115-125. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.003

77. Qiu, W.; Yao, X.; Zhu, Y.; Sun, H.; Zhou, L.; Xiao, M. 2021. Analysis of Factors Influencing Vibration Suppression of Spray Boom-Air Suspension for Medium and Small-Scale High-Clearance Sprayers. Sensors , 21, 6753. https://doi.org/10.3390/s21206753

78. Kappau, R.; de Meira, A.D.; Walber, M. 2021. Parameters for modeling passive suspensions of spray bars. Engenharia Agrícola, 41 (3)
https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n3p368-378/2021

79. Kennes, P.; Anthonis, J.; Ramon, H. 1998. Modelling and Optimization of the Dynamic Behaviour of Sprayer Booms. IFAC Proceedings Volumes,31(2), 321-325.
https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)44217-0

80. Herbst, A.; Wolf, p. 2001. Spray deposit distribution from agricultural boom sprayers in dynamic conditions. ASAE Annual Meeting, 011054
https://doi.org/10.13031/2013.7335

81. Tahmasebi, M.; Mailah, M.; Gohari, M.; Abd Rahman, R. 2018 a. Vibration suppression of sprayer boom structure using active torque control and iterative learning. Part I: Modelling and control via simulation. Journal of Vibration and Control, 24(20), 4689-4699 https://doi.org/10.1177/107754631773316423

82. Tahmasebi, M.; Gohari, M.; Mailah, M.; Abd Rahman, R. 2018 b. Vibration suppression of sprayer boom structure using active torque control and iterative learning. Part II: Experimental implementation. Journal of Vibration and Control, 24(20),4740-4750 https://doi.org/10.1177/1077546317733907



Aplicaciones de la inteligencia artificial y análisis de imagen para previsión de cosecha en la uva embolsada de mesa del Vinalopó

A.M. Codes[1], C.Rocamora[1,2] , H.Puerto[1,2]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández; acodes@umh.es

[2] Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández

Abstract:

Yield prediction is key for planning harvest and manufacturing in table grape production because of its high labour requirement. This work presents the results of an Artificial Intelligence (AI) model applied to the yield prediction of a table grape plot of the Protected Designation of Origin "uva de mesa embolsada del Vinalopó" in Alicante. The objective of this work was to obtain an effective and fast methodology to count cluster bags and estimate grape production. One unmanned aerial vehicle flight was performed over a commercial plot, parallel to the trellis rows, at 10 m heighth with the camera pointed at a 35º angle. 55 images were used to label the cluster bags, with an average of 150 bags per image. 50 of these images were used for training and 5 images for model validation. The results obtained in the model training were a speed detection of 78.5 ms, a Precision of 80.38%, a Recall of 85.63%, a mean Average Precision of 86.40%, and a F1 rate of 83.13%. Applied to a different set of images, the AI model was able to count 20.520 cluster bags. The estimation of production with the proposed methodology underestimated the actual production of the plot by 6.2 % in comparison to an underestimation of 37.67 % by the farmer's guess. However, it is necessary to expand the sample to more plots or campaigns in order to improve the methodology.

Palabras clave: Yolo, Phyton, Agricultura, Predicción, Producción

1. Introducción

El uso de la inteligencia artificial (IA) en la agricultura está cada vez más extendido y tiene un gran potencial de aplicaciones prácticas. Existen estudios donde la IA se ha utilizado para predecir el rendimiento de cultivos [1], [2] ya sea a partir de un algoritmo entrenado con las propiedades del suelo [3] o mediante el conteo de flores [4].

Estimar la producción de una finca es un dato importante para la adecuada gestión de una explotación, pero conlleva un trabajo laborioso que requiere de tiempo y de mano de obra con

experiencia o formación específica, por ello muchos estudios se han centrado en la estimación de la producción mediante la detección de frutos en el árbol y existen ejemplos para manzana [5], cereza [6], uva (uva), aguacate [1], mango [7], fruta de la pasión [8], y varios tipos de fruta a la vez [9]. Este tipo de predicción de la producción de una finca se puede hacer con una detección de los árboles mediante imágenes aéreas tomadas desde un dron y el posterior conteo de estos árboles [10]–[12] o una detección de la fruta mediante imágenes tomadas desde el suelo [14].

En el caso particular de la vid, existen trabajos que identifican y detectan con éxito los racimos de uva [15], [16] entrenando un algoritmo con imágenes tomadas desde el suelo, esto presenta la inconveniente de que requiere un consumo de tiempo elevado para obtener las imágenes, pero presenta la ventaja de poder realizar la toma de imágenes en zonas con restricciones de vuelo.

En la provincia de Alicante existen cultivos emblemáticos y de alto valor económico, como es la uva de mesa embolsada del Vinalopó con Denominación de Origen Protegida (DOP). La uva de mesa embolsada es exclusiva de la provincia de Alicante y es única por su particular proceso de maduración: el embolsado la protege y le confiere unas características como el dulzor, la finura de la piel y la conservación natural hasta fechas de recolección más tardías. El valor económico de la producción de uva embolsada de mesa del Vinalopó ascendió la pasada campaña 2022 a 26 millones de euros.

El objetivo del presente trabajo es el de obtener una metodología efectiva y rápida para estimar la producción de uva en parcelas pertenecientes a la DOP Uva de Mesa Embolsada del Vinalopó. Para ellos se entrenó un algoritmo para la detección de objetos mediante imágenes en el espectro visible tomadas desde un dron y se comparó con la estimación hecha por el propietario de la parcela para tener una primera indicación de la bondad de la estimación automatizada.

2. Materiales y métodos

2.1 Descripción del sitio experimental

2.1.1 Descripción de la parcela

La parcela donde se realizaron las mediciones se encuentra en el municipio de Monforte del Cid y cuenta con una superficie de 11.230 m^2 La plantación, de la variedad Italia, se hizo en el año 2008 y está conducida en espaldera, con una anchura de calles de 2,70 m y separación entre cepas de 1,50 m dentro de la fila, la altura de la espaldera desde el suelo hasta el alambre superior era de 1,50 m. Todos los racimos de uva se encontraban embolsados en bolsos de papel blanco, según práctica habitual y cumpliendo las exigencias de la DOP de Uva de mesa del Vinalopó.

2.1.2 Descripción de la toma de imágenes

Las imágenes aéreas se tomaron el 5 de julio de 2022 con un dron modelo Autel EVO 2 pro (UUC Technology Co., Ltd., Hong Kong), equipado con una cámara visible con un sensor

CMOS 1" (Sony Group Corporation, Tokio), apertura ajustable F2.8-F11 capaz de obtener una resolución de 20 MP y grabación de vídeo en 4K/30 FPS. El vuelo se hizo a una altura de 10 m de forma automática. Se eligió esta altura, la altura mínima a la que puede volar el dron, para obtener mayor precisión en las imágenes. Durante el vuelo la cámara se inclinó en un ángulo de 35º ya que proporcionaba una buena visión de las bolsas y permitía captar el mayor número de bolsas por imagen y el vuelo del dron se mantuvo paralelo a las líneas de cultivo. El tiempo de vuelo del dron necesario para obtener imágenes de toda la parcela fue de 20 minutos, el solapamiento de estas imágenes fue del 10% y el total de imágenes de la parcela fueron 140 imágenes con unas dimensiones de 3840 x 2160.

2.2 Descripción del entrenamiento del modelo

Todo el proceso de entrenamiento del algoritmo y el etiquetado de imágenes se hizo con un ordenador ASUS con Intel CORE i5. El proceso de adquisición y procesado de las imágenes se muestra en la figura 1.

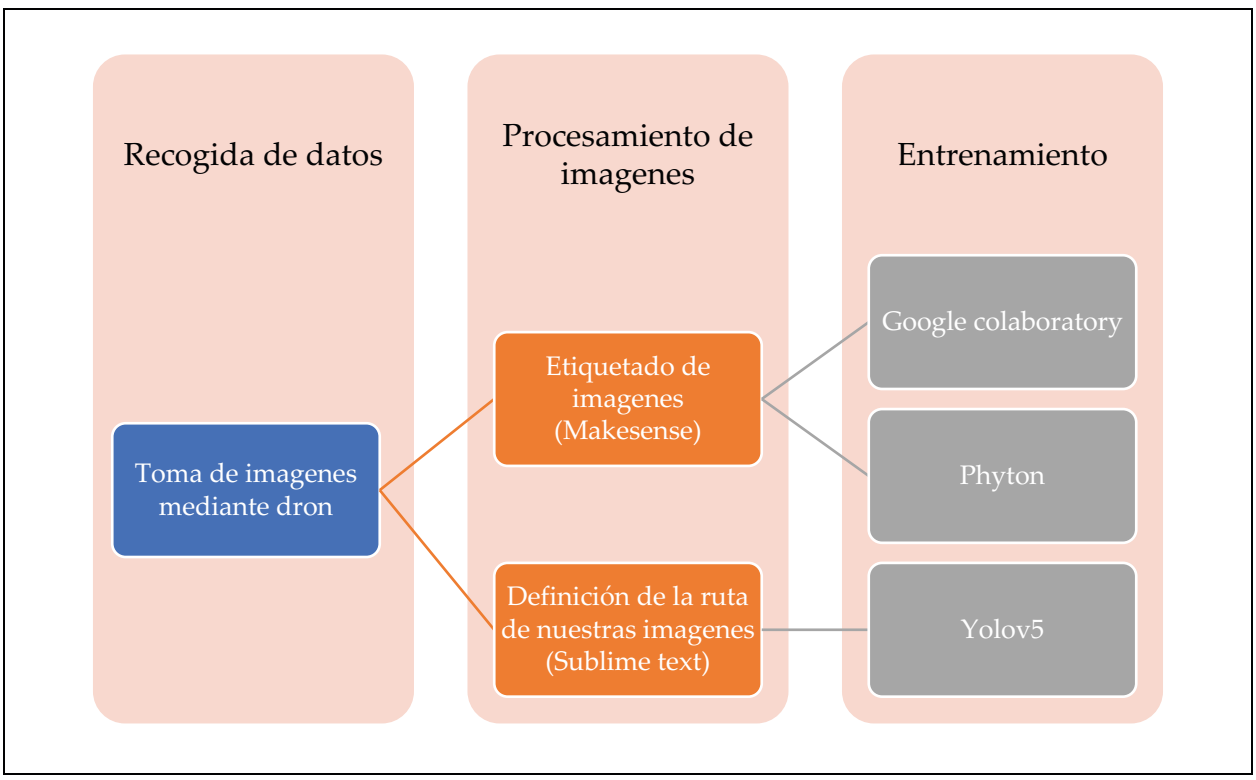


Figura 1: Esquema del procesamiento de datos.

A continuación, se describen las principales características de los programas utilizados en procesado de las imágenes y el entrenamiento del modelo.

Makesense es una herramienta gratuita en la nube para etiquetar fotos y no requiere de ninguna instalación. Aquí se añadieron algunas de las imágenes obtenidas de la uva embolsada que no se iban a emplear en el conteo final, y se procedió a etiquetar manualmente cada bolsa con el nombre "grape". Una vez finalizado el etiquetado, se procedió a la descarga de estas imágenes en formato YOLO que es el algoritmo que se utilizó después para hacer finalmente la detección de objetos. (https://www.makesense.ai/)

YOLO (*You Only Look Once*) es un algoritmo de detección de objetos que divide las imágenes en un sistema de cuadrícula. Cada celda de la cuadrícula es responsable de detectar objetos dentro de sí misma. A parte es uno de los algoritmos de detección de objetos más famosos debido a su velocidad y precisión [16]. Los algoritmos de la serie YOLO se han desarrollado rápidamente en los últimos años. En 2020, aparecieron sucesivamente dos versiones de YOLO, YOLO v4 y YOLO v5. En el momento de inicio de este trabajo, YOLO v5, lanzado en 2020 por Glenn Jocher [17], era el algoritmo de detección de objetos más avanzado, basado en los algoritmos YOLO v3 y YOLO v4, donde se perfeccionó el conjunto aritmético para mejorar la velocidad de detección [17].

El primer paso fue la obtención de las imágenes a partir del dron para poder crear una base de datos. Una vez obtenidas las imágenes se procedió a su etiquetado mediante la aplicación *Makesense* donde se etiquetó cada una de las bolsas donde se encontraba la uva por medio de rectangulos. Se etiquetaron 55 imágenes tomadas a una altura de 10 m de las cuales 50 imágenes fueron utilizadas para el entrenamiento y 5 imágenes para la validación del modelo. La extracción de estas imágenes se realizó en formato YOLO

Una vez creada la base de datos con nuestras imágenes etiquetadas se crearon dos carpetas una denominada "*train*" y otra "*val*", estas carpetas fueron copiadas en nuestra página de *Google Colaboratory* (este es un producto en la nube de *Google Research*. Permite a cualquier usuario escribir y ejecutar código arbitrario de Python en el navegador) donde se instaló YOLO v5. Con la aplicación *Sublime Text* se escribió la ruta donde se encontraba nuestra carpeta "val" y "train" del ordenador de sobremesa y la clase de objetos a detectar que en este caso fue el racimo embolsado.

Finalmente, en una nueva celda se mencionó el tamaño de nuestra imagen que fue de 1024 ya que en una primera prueba fueron redimensionadas a 608 pero no se obtuvieron tan bueno resultados como a 1024 y el número de épocas que se refiere a las veces que se entrena el algoritmo, en este trabajo se tomó un mínimo de 135 épocas ya que es el momento donde presenta mejores resultados y la celda deja de entrenar el algoritmo.

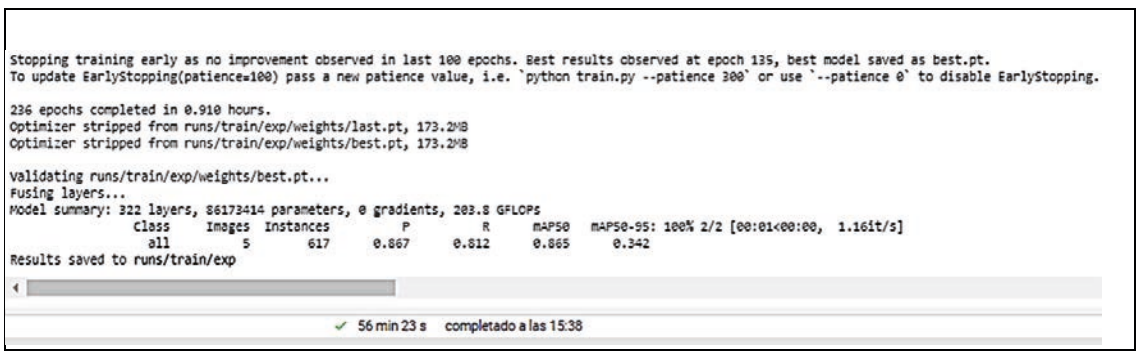


Figura 2. Resultado del entrenamiento

En las gráficas de precisión (Figura 3) se observa que para 135 épocas el entrenamiento ha llegado a su máximo.

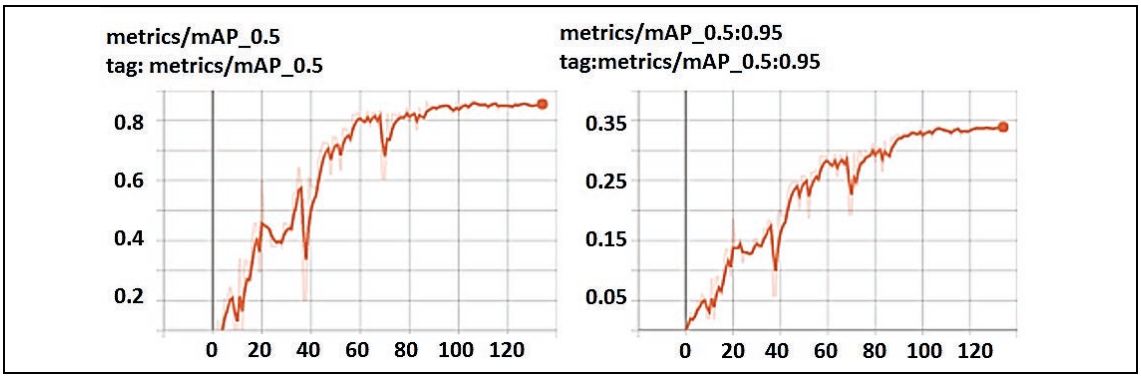


Figura 3. Gráficas de precisión

Una vez ejecutada esta celda, se obtuvo una serie de gráficos donde se representó el resultado del entrenamiento y por último también creó una carpeta con la validación y predicción de los resultados, dando lugar al algoritmo entrenado y listo para ser utilizado.

Este algoritmo se utilizó sobre las fotos de uva embolsada de la parcela comercial. El resultado de la ejecución del algoritmo fue la identificación y conteo automático de bolsas que aparecían en cada imagen.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados del entrenamiento del modelo

Para verificar la eficacia del modelo, se utilizaron para la evaluación en este estudio indicadores como precisión, recuperación, mAP (*mean Average Precision* o media de la Precisión Promedio), velocidad de detección y puntuación F1.

La precisión (1) es la proporción de muestras positivas verdaderas entre todas las muestras positivas predichas por el modelo. La recuperación (2) indica la proporción de muestras positivas verdaderas predichas por el modelo con respecto a todas las muestras positivas verdaderas. Por lo general, existe una correlación negativa entre la precisión y la recuperación, donde una aumenta y la otra disminuye. A partir de los valores de precisión y recuperación, se puede trazar un gráfico PR (Precisión- Recuperación) (Figura 4) para observar su distribución. Para equilibrar los efectos de la precisión y la recuperación y evaluar un modelo de manera más integral, se puede introducir AP (Precisión Promedio) como un índice de evaluación integral. El valor de AP (3) es el área bajo la curva PR, y un valor mayor significa un mejor rendimiento del modelo. La puntuación F1 (4) es la media reconciliada de precisión y recuperación, teniendo en cuenta tanto la precisión como la recuperación del modelo de clasificación[14].

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \qquad (1)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \qquad (2)$$

$$AP = \int_0^1 P(R)\,dR \qquad (3)$$

$$F1\text{ - }score = \frac{2 \times P \times R}{P + R} \qquad (4)$$

Donde TP, FP y FN son los números de casos verdaderos positivos, casos falsos positivos y casos falsos negativos, respectivamente.[14]

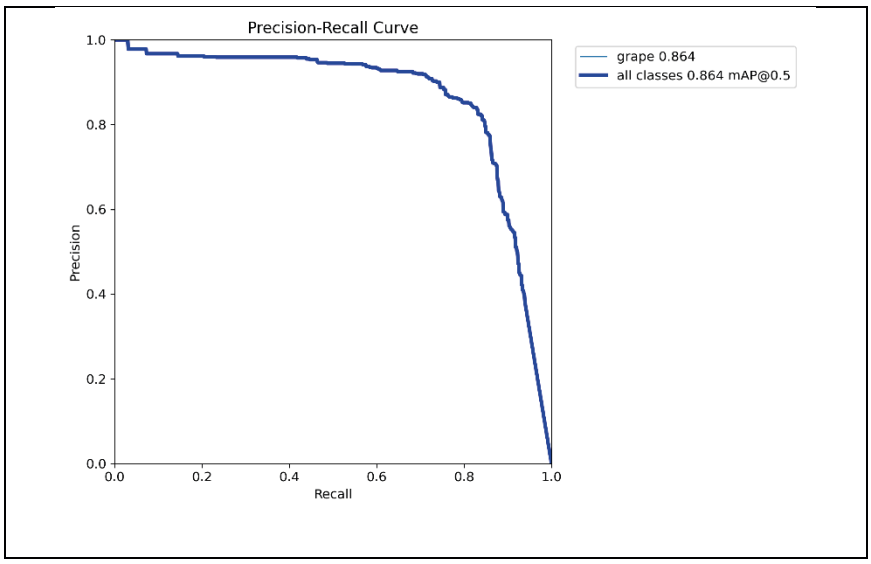


Figura 4. Curva PR

Tabla 1. Resultados del modelo

Velocidad de detección	Precisión	Recuperación	media Precisión Promedio	Puntuación F1
78,5 ms	80,38%	85,63%	86,40%	83,13%

El rendimiento del modelo se puede representar mediante precisión promedio, precisión, recuperación, tiempo de prueba y puntuación F1 [14]. En este experimento, se establece un umbral de confianza de 0,5, y sobre esta base se obtienen la precisión, la recuperación y la puntuación F1. El tiempo de prueba está representado por el valor medio del tiempo de prueba del modelo en las 55 imágenes analizadas.

El objetivo del presente trabajo es identificar de forma rápida y precisa las bolsas de uva, por lo que se utilizaron los valores de mAP (86,63%) y la velocidad de detección (78,5 ms) como principales métricas de evaluación donde, cuanto mayor sea el valor de mAP, mejor será el resultado de detección [10] Finalmente se puede observar en la tabla 1 como los valores de precisión (80,38%), recuperación (85,63%) y su F1 (83,13%) son valores altos lo que indica que el modelo trabaja de forma efectiva dando una alta proporción de muestras positivas verdaderas predichas por el modelo.

Se puede ver que el modelo logra muy buenos resultados de detección incluso cuando se superponen entre si las bolsas de uva (Figura 5).



Figura 5. Imagen tomada a 10 metros.



Figura 6. Zoom de la imagen tomada a 10 metros

3.2 Resultados del conteo de las bolsas en la parcela de ensayo.

Con anterioridad al conteo con el modelo, las imágenes se recortaron transversalmente, para evitar solapes, y longitudinalmente, de forma que cada fila de espaldera se viera en una sola de las imágenes analizadas. En la tabla 2 y la figura 6 se muestran los resultados del conteo automático. Para la estimación de la producción se multiplicó el número de bolsas obtenido por el peso medio por racimo, 1,1 kg/racimo, facilitado por la cooperativa de la DO de la uva embolsada del Vinalopó. El dato medido de producción real de la parcela fue proporcionado por la misma cooperativa.

Tabla 2. Resultados

Parcela	Conteo de bolsas	Predicción de cosecha	Estimación del agricultor	Producción real
1	20.520	22.572 kg	15.000 kg	24.064 kg

4. Conclusiones

El modelo de IA ha sido capaz de contar las bolsas de racimos en las imágenes tomadas de la parcela comercial en un tiempo moderado. La estimación de la producción con la metodología propuesta infraestimó en un 6,2 % la producción real de la parcela, esta estimación a la baja del modelo puede ser debido a la no detección de las bolsas existentes en las imágenes, pero fue mucho más precisa que la estimación del agricultor que infraestimó la cosecha en un 37,67 %. Sin embargo, para generalizar esta metodología, es necesario ampliar la muestra a más parcelas y más campañas de observación para poder tener una mejor estimación de la bondad del modelo.

Existen otros aspectos a tener en cuenta ya que, para obtener un método rápido y práctico en su conjunto, es necesario automatizar el recorte de las imágenes en el trabajo de gabinete también poder aumentar la altura del dron en la toma de imágenes para reducir así el tiempo de vuelo y aumentar el conjunto de imágenes para el entrenamiento del modelo con el objetivo de aumentar su precisión en la detección.

Referencias

[1] A. Robson, M. M. Rahman, and J. Muir, “Using worldview satellite imagery to map yield in avocado (Persea americana): A case study in Bundaberg, Australia,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 9, no. 12, 2017, doi: 10.3390/rs9121223.

[2] R. Sola-Guirado, F. Castillo-Ruiz, F. Jiménez-Jiménez, G. Blanco-Roldan, S. Castro-Garcia, and J. Gil-Ribes, "Olive Actual 'on Year' Yield Forecast Tool Based on the Tree Canopy Geometry Using UAS Imagery," *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1743, Jul. 2017, doi: 10.3390/s17081743.

[3] E. I. Papageorgiou, K. D. Aggelopoulou, T. A. Gemtos, and G. D. Nanos, "Yield prediction in apples using Fuzzy Cognitive Map learning approach," *Comput Electron Agric*, vol. 91, 2013, doi: 10.1016/j.compag.2012.11.008.

[4] D. Wu, S. Lv, M. Jiang, and H. Song, "Using channel pruning-based YOLO v4 deep learning algorithm for the real-time and accurate detection of apple flowers in natural environments," *Comput Electron Agric*, vol. 178, p. 105742, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105742.

[5] N. Häni, P. Roy, and V. Isler, "A comparative study of fruit detection and counting methods for yield mapping in apple orchards," *J Field Robot*, vol. 37, no. 2, 2020, doi: 10.1002/rob.21902.

[6] R. Gai, N. Chen, and H. Yuan, "A detection algorithm for cherry fruits based on the improved YOLO-v4 model," *Neural Comput Appl*, May 2021, doi: 10.1007/s00521-021-06029-z.

[7] R. Shi, T. Li, and Y. Yamaguchi, "An attribution-based pruning method for real-time mango detection with YOLO network," Comput Electron Agric, vol. 169, 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105214.

[8] S. Tu *et al.*, "Passion fruit detection and counting based on multiple scale faster R-CNN using RGB-D images," *Precis Agric*, vol. 21, no. 5, 2020, doi: 10.1007/s11119-020-09709-3.

[9] S. Wan and S. Goudos, "Faster R-CNN for multi-class fruit detection using a robotic vision system," *Computer Networks*, vol. 168, p. 107036, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2019.107036.

[10] L. P. Osco *et al.*, "A CNN approach to simultaneously count plants and detect plantation-rows from UAV imagery," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 174, pp. 1–17, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2021.01.024.

[11] K. L. Wiggers, C. D. Pohlod, R. Orlovski, R. Ferreira, and T. A. Santos, "Detection and counting of plants via deep learning using images collected by RPA," *Revista Brasileirade Ciencias Agrarias*, vol. 17, no. 2, 2022, doi: 10.5039/AGRARIA.V17I2A1353.

[12] T. Jintasuttisak, E. Edirisinghe, and A. Elbattay, "Deep neural network based date palm tree detection in drone imagery," *Comput Electron Agric*, vol. 192, p. 106560, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.COMPAG.2021.106560.

[13] W. Yijing, Y. Yi, W. Xue-Fen, C. Jian, and L. Xinyun, "Fig fruit recognition method based on YOLO v4 deep learning," in *ECTI-CON 2021 - 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology: Smart Electrical System and Technology, Proceedings*, 2021, pp. 303–306. doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454904.

[14] J. Wang, Z. Zhang, L. Luo, W. Zhu, J. Chen, and W. Wang, "SwinGD: A Robust Grape Bunch Detection Model Based on Swin Transformer in Complex Vineyard Environment," *Horticulturae*, vol. 7, no. 11, p. 492, Nov. 2021, doi: 10.3390/horticulturae7110492.

[15] M. Sozzi, S. Cantalamessa, A. Cogato, A. Kayad, and F. Marinello, "Automatic Bunch Detection in White Grape Varieties Using YOLOv3, YOLOv4, and YOLOv5 Deep Learning Algorithms," *Agronomy*, vol. 12, no. 2, p. 319, Jan. 2022, doi: 10.3390/agronomy12020319.

[16] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.

[17] Y. Zhang, Z. Guo, J. Wu, Y. Tian, H. Tang, and X. Guo, "Real-Time Vehicle Detection Based on Improved YOLO v5," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, 2022, doi: 10.3390/su141912274.

Detección de objetos mediante IA para la caracterización de flotantes en el río Segura

A.M. Codes[1], H. Puerto[1], C. Rocamora[1]

[1] Departamento de Ingeniería y Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO). Universidad Miguel Hernández; acodes@umh.es

Abstract:

Plastic waste in the marine ecosystem today is a great concern due to its large amount in rivers and oceans and its persistence in them. This study focuses on the river and the traditional irrigation system of Vega Baja del Segura, which is located in the southeast of Spain, where a large amount of floating waste accumulates at certain points, causing problems in the distribution of irrigation water, in ditches and *azarbes*. The aim of this work is to train an algorithm to automatically detect the different residues for their classification and quantification through image analysis from overhead photographs taken by a drone at several points of the river and canals.. The algorithm that was used for the training was YOLOv5 and to evaluate the training the mAP was taken as a reference, which for a mAP of 0.5 gave 97% accuracy and for a mAP of 0.5 to 0.95, 79% accuracy. This method will be useful to eliminate the degree of subjectivity when counting is carried out and to know the origin of these residues quickly and safely in the river.

Palabras claves: YOLO, Phyton, Plasctic, Waste, Rivers

1. Introducción

La Vega Baja del Segura se caracteriza por su sistema de regadío tradicional, que es uno de los seis espacios de huerta mediterránea que quedan en Europa [1]. La infraestructura de riego de este ecosistema de huerta centenaria está formada por una extensa red de acequias caracterizadas por escasas pendientes y un sistema de acueductos de drenaje o azarbes que recogen las aguas sobrantes o "aguas muertas". Estas a su vez se reutilizan para el riego de las zonas de menor cota antes de ser devueltas al río [2].

Tanto en el río como en los canales de riego y drenaje, se observan con frecuencia grandes acumulaciones de flotantes que dificultan el flujo del agua y su manejo por parte de los regantes. Estos flotantes son de variada procedencia, predominando los residuos vegetales del propio río, como las cañas, así como residuos procedentes de la actividad doméstica, agrícola e industrial, entre los que sobresalen los residuos plásticos [3]. Los plásticos terrestres son una fuente principal de contaminación plástica marina, ya que los ríos los transportan al océano [4-5]. Estos residuos llegan al mar y terminan generando microplásticos que se incorporan a la cadena trófica y afectan a la calidad de la pesca [6-7]. Los elementos flotantes de cierto tamaño en el río provocan problemas en las infraestructuras de riego como la obstrucción de las tomas de los canales de riego. Si estas acumulaciones de escombros flotantes logran atravesar los canales de riego, dificultan la gestión del agua por parte de los agricultores e impiden las operaciones ordinarias de riego [3]. Para paliar este problema se hace necesario caracterizar los flotantes al objeto de conocer su procedencia y así poder actuar en origen.

Existen varios estudios donde han desarrollado diferente metodología para cuantificar los residuos flotantes que se acumulan en masas de agua mediante inteligencia artificial [8-9] y para detectar residuos y clasificarlos [10]. Estos estudios utilizan diferente metodología para la detección de residuos, como es la utilización de un algoritmo de aprendizaje automático basado en redes neuronales convolucionales (CNN) (9-10) o el uso de un algoritmo de detección llamado YOLO v5.

Este estudio se ha basado en la utilización de YOLO v5 ya que era el más novedoso y presentaba mejores resultados de detección. YOLO (You Only Look Once) es un algoritmo de detección de objetos que divide las imágenes en un sistema de cuadrícula. Cada celda de la cuadrícula es responsable de detectar objetos dentro de sí misma. Es uno de los algoritmos de detección de objetos más famosos debido a su velocidad y precisión [11]. Los algoritmos de la serie YOLO se han desarrollado rápidamente en los últimos años. En 2020, Glenn Jocher lanzó YOLO v5 [12], una red de detección avanzada del algoritmo de detección de objetos YOLO basado en los algoritmos YOLO v3 y YOLO v4, donde se llevó a cabo la innovación del conjunto aritmético para mejorar la velocidad de detección.

El objetivo de este trabajo es entrenar un algoritmo para poder hacer una detección automática de los diferentes residuos, así como su clasificación y cuantificación en el rio Segura mediante análisis de imagen a partir de fotografías cenitales tomadas en varios puntos del río y de los canales. La determinación del origen de los flotantes puede facilitar actuaciones que tenga como consecuencia la reducción de estos.

2. Materiales y métodos

2.1. Infraestructura de riego de la Vega Baja del Segura

El sistema de regadío tradicional de la Vega Baja del Segura cuenta con un singular conjunto de obras hidráulicas. El agua de riego se desvía del río Segura mediante presas o azudes. Esta es distribuida por las tierras de cultivo a través de un conjunto de canales de riego o acequias, que configuran la denominada "red de aguas vivas". A su vez, la "red de aguas muertas", constituida por acueductos de drenaje o azarbes, recoge el agua procedente de las sobrantes, drenaje o avenamiento de los riegos [3] y la distribuye para utilizarla como agua de riego antes de devolverla al río.

2.2. Puntos de muestreo

Se ha realizado un seguimiento de la presencia de flotantes en una serie de puntos, situados en el cauce del río y en algunos de los canales, identificados en un trabajo previo [3].

Punto 1 (ID1): Azud de las Norias
Punto 2 (ID2): Cadena en el Molino de la Ciudad
Punto 3 (ID3): Cadena en Almoradí
Punto 4 (ID4): Azud de Alfeitamí
Punto 5 (ID5): Esclusas en la ensenada de la comunidad de regantes de Riegos de Levante
Punto 6 (ID6): Acequia de Callosa
Punto 7 (ID7): Azarbe de Cebadas
Punto 8 (ID8): Pantalla flotante Guardamar.

En este estudio se añaden nuevos puntos debido a que en 2022 se añadieron barreras de retención en las colas de cinco azarbes que desembocan en las inmediaciones del punto ID8, que corresponden a los puntos ID8.a, ID8.b, ID8.c, ID8.d, ID8.e, y una cadena de retención en la entrada

de la ciudad de Orihuela, identificada ahora como Punto 2.a (ID2.a) para mantener el orden en el sentido de la corriente.

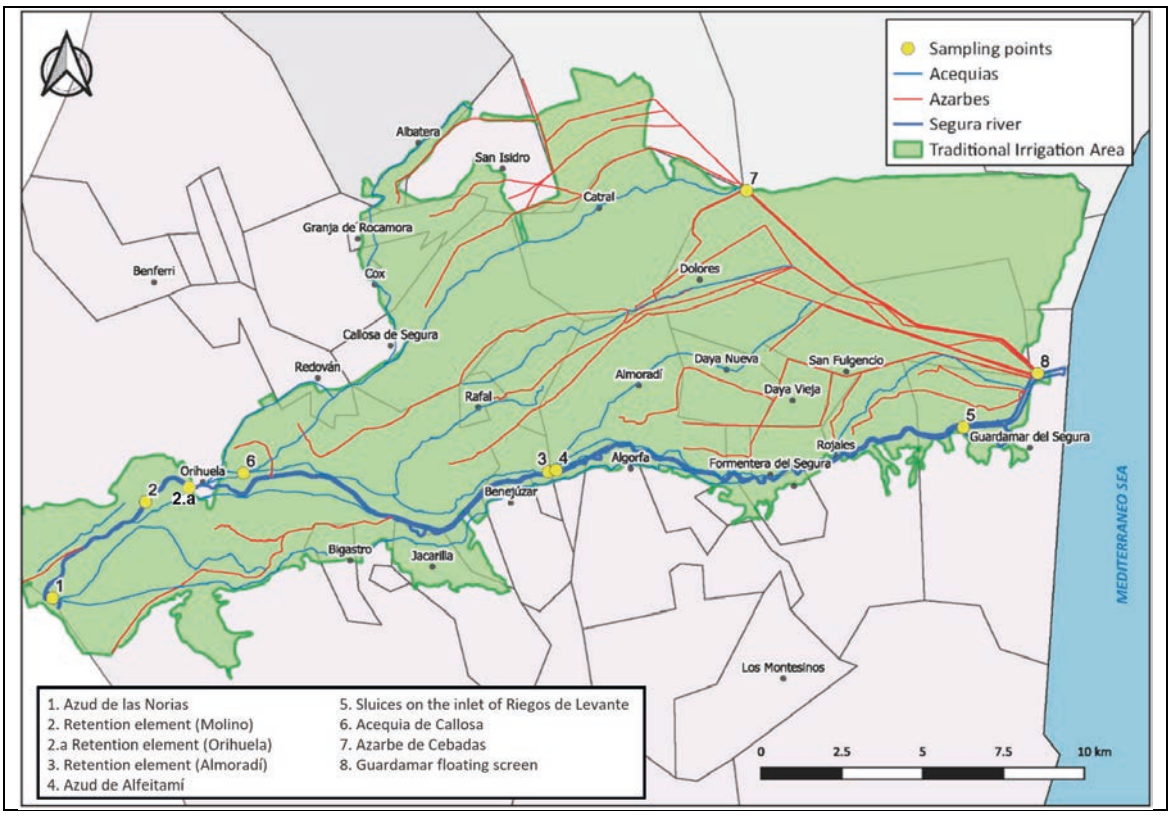


Figura 1. Ubicación de los puntos (basado en [3])

2.3. Adquisición de imágenes

Las imágenes fueron obtenidas con un dron cuadrirrotor, modelo Autel EVO 2. Las especificaciones del dron son las siguientes; color: naranja y negro, peso: 1127 gramos, distancia entre ejes: 397 mm, baterías extraíbles de 7100 mAh y 11.55 V, tiempo máximo de vuelo: 40 minutos, velocidad máxima de vuelo horizontal: 20 m/s, distancia máxima de vuelo: 25 kilómetros. Especificaciones de la cámara: píxeles efectivos: 48MP, campo de visión: 79º y dimensiones de la lente: 25,6 mm.

Se realizaron tres vuelos en cada uno de los puntos de muestreo a lo largo del año 2022. El solape en la toma de imágenes era del 10% y las dimensiones de estas imágenes eran de 3840 x 2160. Los vuelos se realizaron a diferentes alturas a 5 metros, 10 metros y 20 metros para buscar la altura optima en la toma de imágenes. Finalmente se analizaron solo las imágenes realizadas a una altura de 5 metros ya que eran las que mejor resultados daba debido a la resolución de las imágenes. El ángulo de la cámara del dron era de 90º y el número de fotos que realizaba el dron en cada punto dependía de la cantidad de residuos que se encontraban en el río.

Se realizó una selección de las imágenes para el seguimiento, estas fueron 1 imagen de cada punto y de cada vuelo. Debido a la gran acumulación de residuos en algunos puntos fue necesario seleccionar más de una imagen. Se analizaron un total de 61 imágenes:

Tabla 5. Número de imágenes analizadas

Puntos	28-07-2022	08-09-2022	31-10-2022
ID1	1 imagen	3 imágenes	4 imágenes
ID2	1 imagen	1 imagen	1 imagen
ID2.a	1 imagen	1 imagen	1 imagen
ID3	2 imágenes	2 imágenes	3 imágenes
ID4	1 imagen	1 imagen	1 imagen
ID5	1 imagen	1 imagen	1 imagen
ID6	1 imagen	1 imagen	1 imagen
ID7	1 imagen	1 imagen	1 imagen
ID8	3 imágenes	9 imágenes	3 imágenes
ID8.a	0 imágenes	1 imagen	3 imágenes
ID8.b	0 imágenes	1 imagen	0 imágenes
ID8.c	0 imágenes	1 imagen	0 imágenes
ID8.d	0 imágenes	1 imagen	2 imágenes
ID8.e	0 imágenes	2 imágenes	2 imágenes


ID2.a 8/09/22

Figura 2. Ejemplo de la toma de imágenes en los puntos de muestreo.

2.4. Entrenamiento del algoritmo y detección de objetos

Se entrenó un algoritmo para identificar los residuos más habituales encontrados en la zona en un estudio previo [3].

Se etiquetaron 477 imágenes con el software Makesense por medio de rectángulos. 430 fueron utilizadas para el entrenamiento y 47 para la validación del modelo. Se usaron las siguientes etiquetas: Botellas de plástico, Botellas de lejía, Botellas de detergente, Balones y Botes químicos de uso agrícola. Este dataset presentaba imágenes del estudio de 2019 [3], imágenes de los objetos que se querían identificar y también imágenes realizadas en el año 2022. Una vez finalizado el etiquetado se procedió a la extracción de estas imágenes en formato YOLO. El algoritmo utilizado para el entrenamiento fue YOLOv5.

El tamaño de la imagen fue redimensionado a 1024 pixels, ya que daba mejores resultados que en pruebas realizadas a 608 pixels. El número de épocas utilizado fue 126 y el "batch size" utilizado

fue de 2 debido a que ya presentaba una buena matriz de confusión y un "batch size" alto conllevaba más tiempo.

Una vez validado el entrenamiento del algoritmo se procedió a analizar las 61 imágenes tomadas en los cauces en 2022 para detectar los objetos de las cinco clases definidas.

Parar comparar la fiabilidad del entrenamiento con un conteo manual se utilizó la aplicación ImageJ.

3. Resultados y discusión

En el entrenamiento del modelo se utilizaron 477 imágenes de las cuales 47 se utilizaron para la validación del modelo. El entrenamiento duró 3 horas y 7 minutos.

El total de imágenes cenitales tomadas en 2022 y analizadas para detectar flotantes fue de 61. Estas 61 imágenes fueron las empleadas como test. En algunos puntos la acumulación de flotantes ocupaba una gran superficie y era necesario tomar más de una foto para abarcar la totalidad. El tiempo necesario para analizar las 61 imágenes fue de 42 segundos.

El tiempo necesario para el conteo manual con la aplicación de Image J fue de 7 horas y 34 minutos.

Tabla 2. *Comparación del conteo de objetos detectados con el algoritmo con el conteo manual*

		Conteo con algoritmo					Conteo manual ImageJ				
ID	**Fecha**	**B.A.**	**Agr.**	**Det.**	**Lej.**	**Bal.**	**B.A.**	**Agr.**	**Det.**	**Lej.**	**Bal.**
2	28/07/22	69		2		4	88				
3	28/07/22	3					4				
4	28/07/22	17					20				
5	28/07/22	0					6				
6	28/07/22	4					4				
7	28/07/22	40	5	4	3		58	2	2	1	
8	28/07/22	2		1	1		2				
1	08/09/22	21					29		3		
2	08/09/22	121		1	1		128	1	1	1	
2.a*	08/09/22	233	1	2	2	1	243	2	10	6	2
3	08/09/22	154	2	5	2	1	173	3	5	6	2
4	08/09/22	10		1	1		19			2	
5	08/09/22	0					9				
6	08/09/22	59				1	63		2		1
7	08/09/22	37	2	5	2		49	4	2		
8	08/09/22	90	1	3			96		2		
8.a	08/09/22	236	1		2	1	329			5	3
8.b	08/09/22	55					74		1		
8.c	08/09/22	130		3			130	1	9		
8.d	08/09/22	141	1	4	2		141	0	5	2	
8.e	08/09/22	37					46	1	4		
1	31/10/22	62	1	2	1		81	1		1	
2	31/10/22	5	1	1	1	2	20				
2.a*	31/10/22	118	1			14	166	1			
3	31/10/22	209		1	2	2	236		1	2	2
5	31/10/22	199	6	8	4	1	218	4	9	4	1
6	31/10/22	167	2	5	1		170	1	6	1	
8	31/10/22	185		2	3		204		2	3	
8.a	31/10/22	400	1	1	6		524	1	1	6	

8.e	31/10/22	153	2	8	174	2	8
8.d	31/10/22	58		1	72		1

B.A.: Botella de agua. Agr.: bote de productos químicos de uso agrícola. Det.: Bote de detergente. Lej.: botella de lejía. Bal.: balón de juego

La tabla 2 muestra los objetos de distintas clases detectados por el algoritmo en cada uno de los puntos de muestreo en las tres fechas de toma de imágenes.

Los flotantes más habituales son las botellas de plástico con una representación del 91,05% del total. Estos resultados están en la línea de los obtenidos en el estudio llevado a cabo en la misma zona en 2019 [3].



Figura 3. Detección automática de flotantes en el punto (ID3)



Figura 4. Zoom de la detección automática de flotantes en el punto (ID3)

Entre los objetos etiquetados en este trabajo, las botellas de agua son las más difíciles de caracterizar ya que se encuentran en grandes cantidades y se pueden ver apiladas, lo que hace

que la botella se vea de diferentes formas. Por el contrario, las botellas de lejía y los bidones son más fáciles de identificar ya que presentan una forma y color característico y estas no se encuentran en grandes cantidades.

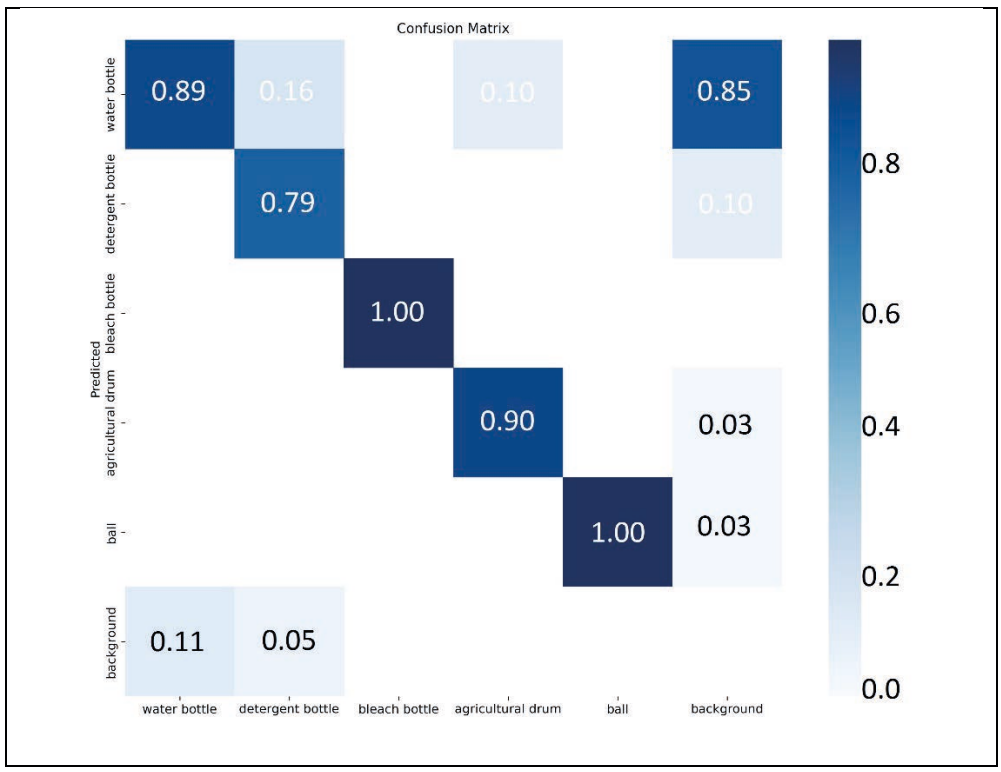


Figura 5. Matriz de confusión

Para comprobar la precisión de este algoritmo se utilizó la matriz de confusión (Figura 6) y la mAP (mean Average Precision) (Figura 5). En el campo de la inteligencia artificial una matriz de confusión es una herramienta que permite visualizar el desempeño de un algoritmo de aprendizaje supervisado [13]. Cada columna de la matriz representa el número de predicciones de cada clase, mientras que cada fila representa la clase real de cada objeto, es decir, permite ver qué tipos de aciertos y errores está teniendo el modelo a la hora de pasar por el proceso de aprendizaje con los datos. En este caso la probabilidad de que los objetos detectados sean realmente esos objetos es alta, pero existe un dato curioso con el fondo, el cual representa que el 85 % del fondo es confundido por botellas de agua. Este dato no es del todo erróneo ya que en el fondo de estos residuos siempre había botellas de plástico de agua, por eso en la comparación del conteo automático y manual de las botellas de plástico este dato no presenta gran diferencia (Tabla 1).

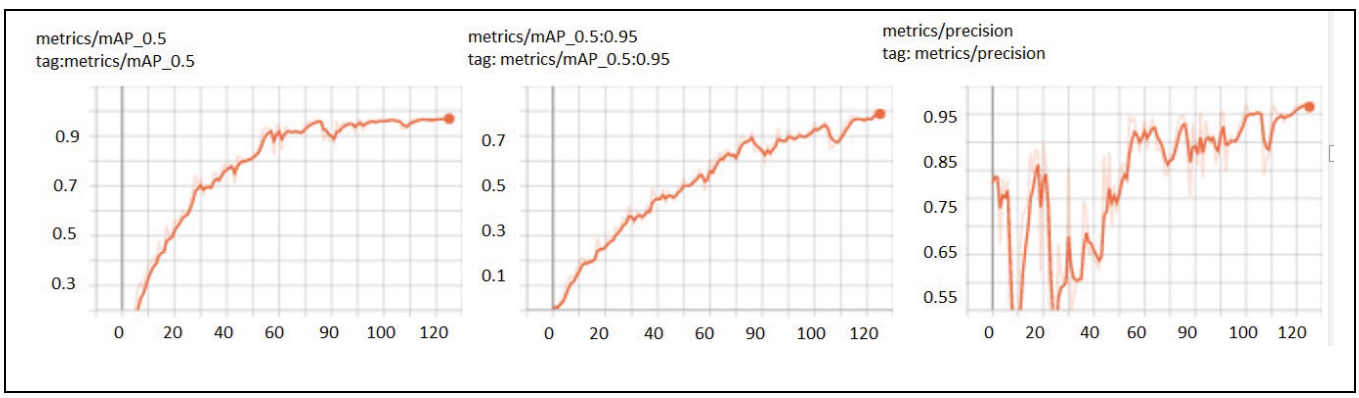


Figura 6. Gráficas mAP

Estas graficas de precisión (Figura 6) muestran la mAP (mean Average Precision) que es la métrica utilizada para medir la precisión de detectores de objetos. En este caso para una mAP del 0,5 se obtiene un 97% de precisión y para una mAP del 0,5 a 0,95 se obtiene un 79% de precisión. También se ha verificado la eficiencia del modelo a partir de los indicadores de precisión, recuperación, velocidad de detección y puntuación F1.

La precisión (1) es la proporción de muestras positivas verdaderas entre todas las muestras positivas predichas por el modelo. La recuperación (2) indica la proporción de muestras positivas verdaderas predichas por el modelo con respecto a todas las muestras positivas verdaderas. Por lo general, existe una correlación negativa entre la precisión y la recuperación, donde una aumenta y la otra disminuye. A partir de los valores de precisión y recuperación, se puede trazar un gráfico PR (Precisión- Recuperación) (Figura 8) para observar su distribución. Para equilibrar los efectos de la precisión y la recuperación y evaluar un modelo de manera más integral, se puede introducir AP (Precisión Promedio) como un índice de evaluación integral. El valor de AP (3) es el área bajo la curva PR, y un valor mayor significa un mejor rendimiento del modelo. La puntuación F1 (4) es la media reconciliada de precisión y recuperación, teniendo en cuenta tanto la precisión como la recuperación del modelo de clasificación [15]

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$AP = \int_0^1 P(R)dR \quad (3)$$

$$F1 - score = \frac{2 \cdot P \cdot R}{P + R} \quad (4)$$

Donde TP, FP y FN son los números de casos verdaderos positivos, casos falsos positivos y casos falsos negativos, respectivamente.

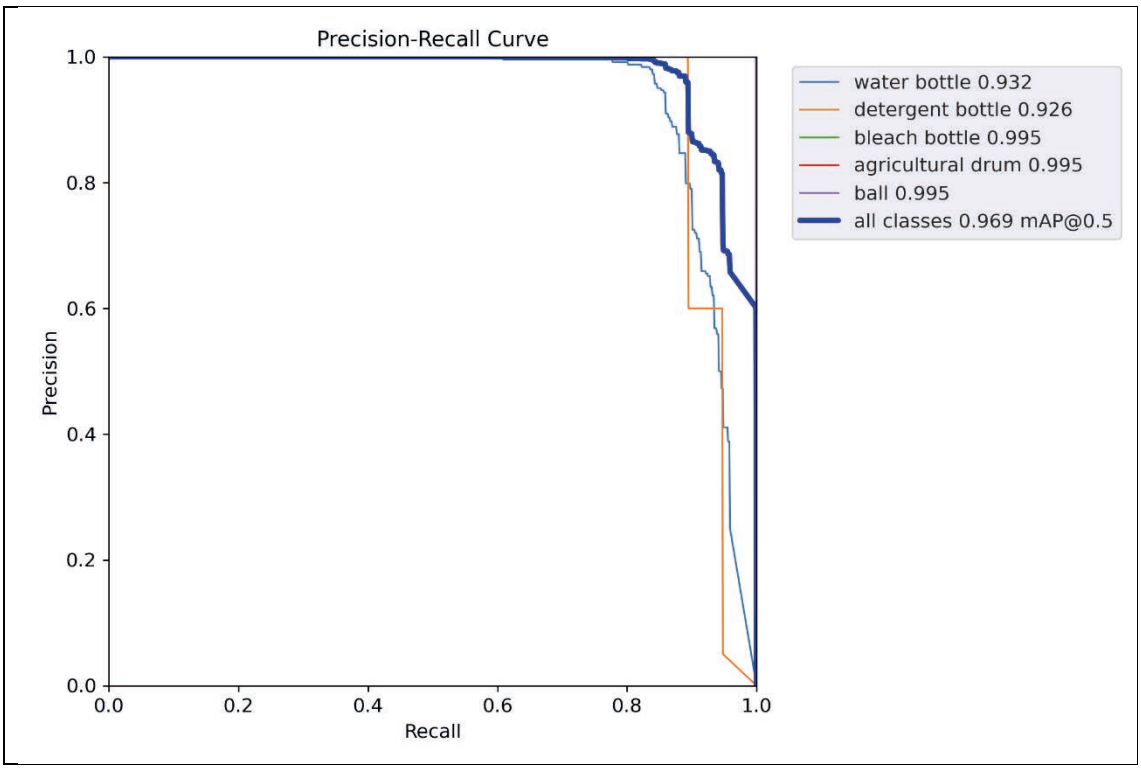


Figura 8. Curva PR

Tabla 3. *Resultados del proceso*

Tiempo de entrenamiento	Precisión	Recuperación	Media Precisión Promedio	Puntuación F1
3 hours and 7 minutes	92,04%	97,07%	96,90%	94,48%

En este experimento, se establece un umbral de confianza de 0,5, y sobre esta base se derivan la precisión, la recuperación y la puntuación F1.

El objetivo de este trabajo es identificar los diferentes residuos de forma rápida y precisa, para lo cual se utilizaron como principales métricas de evaluación los valores de mAP (96,90%) y la velocidad de detección, 81,7 ms para detectar una imagen, donde a mayor valor de mAP, mejor será el resultado de la detección [14]. Finalmente se puede observar en la tabla 2 como los valores de precisión (92,04%), recuperación (97,07%) y F1 (94,48%) son valores altos, por encima del 90%, lo que indica que el modelo trabaja de forma efectiva dando una alta proporción de muestras positivas verdaderas predichas por el modelo.

4. Conclusiones

El entrenamiento del algoritmo para la detección de residuos ha presentado buenos resultados de precisión.

El método empleado permite hacer una caracterización de los flotantes en un tiempo muy breve, una vez entrenado el modelo, y puede ser útil para eliminar el grado de subjetividad cuando se realiza un conteo manual. Además, permitiría una mayor eficacia y precisión en la detección de objetos que mediante el conteo manual.

La metodología aplicada puede servir para hacer un seguimiento de los flotantes acumulados en distintos puntos de los cauces. La caracterización mediante este procedimiento permitirá tomar medidas dirigidas a diferentes sectores de la población en función del posible origen de los distintos tipos de residuos con el fin último de reducir la presencia de residuos en los cauces y los problemas que estos representan.

Referencias

1. European Environment Agency. Europe's Environment—The Dobris Assessment; European Environment Agency: Copenhague, Denmark, 1995.
2. Trapote Jaume, A., Roca Roca, J. F., & Melgarejo Moreno, J. 15). Azudes y acueductos del sistema de riego tradicional de la Vega Baja del Segura (Alicante, España). Investigaciones Geográficas. 2015, 63, 143-160. https://doi.org/10.14198/ingeo2015.63.10
3. Rocamora C, Puerto H, Abadía R, Brugarolas M, Martínez-Carrasco L, Cordero J. Floating Debris in the Low Segura River Basin (Spain): Avoiding Litter through the Irrigation Network. Water. 2021; 13(8):1074. https://doi.org/10.3390/w13081074
4. Jambeck, JR , Geyer, R. , Wilcox, C. , Siegler, TR , Perryman, M. , Andrady, A. , Narayan, R. y Law, KL (2015). Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. Science , 347 (6223), 768 – 771
5. Lebreton, L. , Van der Zwet, J. , Damsteeg, J.-W. , Slat, B. , Andrady, A. y Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans Nature communication , 8 , 15611
6. Cole, M. , Lindeque, P. , Fileman, E. , Halsband, C. , Goodhead, R. , Moger, J. y Galloway, TS (2013). Microplastic ingestion by zooplankton. Environmental science and technology, 47 (12), 6646 – 6655
7. Thompson, RC , Olsen, Y. , Mitchell, RP , Davis, A. , Rowland, SJ , John, AWG , McGonigle, D. y Russell, AE (2004). Lost at sea: where is all the plastic? Science , 304 (5672), 838 – 838 .
8. de Vries, R.; Egger, M.; Mani, T.; Lebreton, L. Quantifying Floating Plastic Debris at Sea Using Vessel-Based Optical Data and Artificial Intelligence. Remote Sens. 2021, 13, 3401. https://doi.org/ 10.3390/rs13173401
9. Mattis Wolf et al. Machine learning for aquatic plastic litter detection, classification and quantification. Environ. Res. 2020 Lett.15 114042.
10. Van Lieshout, C., van Oeveren, K.,van Emmerik, T. y Postma, E. (2020). Automated River Plastic Monitoring Using Deep Learning and Cameras. Earth and Space Science. 2020, 7, e2019EA000960. https://doi.org/10.1029/2019EA000960
11. J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You only look once: Unified, real-time object detection," in Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016. doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
12. Y. Zhang, Z. Guo, J. Wu, Y. Tian, H. Tang, and X. Guo, "Real-Time Vehicle Detection Based on Improved YOLO v5," Sustainability (Switzerland), vol. 14, no. 19, 2022, doi: 10.3390/su141912274
13. Barrios Arce, J.I. (2019) https://www.juanbarrios.com/la-matriz-de-confusion-y-sus-metricas/ Accessed November 2022.
14. S. Wan and S. Goudos, "Faster R-CNN for multi-class fruit detection using a robotic vision system," Computer Networks, vol. 168, p. 107036, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.comnet.2019.107036.
15. W. Yijing, Y. Yi, W. Xue-Fen, C. Jian, and L. Xinyun, "Fig fruit recognition method based on YOLO v4 deep learning," in ECTI-CON 2021 - 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology: Smart Electrical System and Technology, Proceedings, 2021, pp. 303–306. doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454904.

Evaluación comparativa de modelos de inteligencia artificial aplicados a la detección y clasificación de tomates

Diego José Gallardo-Romero[1], Orly Enrique Apolo-Apolo[2], Manuel Pérez-Ruiz[1]

[1] Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos "Área Agroforestal" de la Universidad de Sevilla, Spain; dgallardo@us.es
[2] Department of Environment, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent University, Coupure Links 653, Blok B, 1st Floor, 9000 Gent, Belgium

Abstract: Climate change, rising resource prices, and competition in production are making technologies like artificial intelligence (AI), data analysis, and deep learning (DL) increasingly essential and playing a fundamental role in modern agriculture. Among DL models, it seems that YOLO (You Only Look Once) is becoming a popular choice due to its precision and speed of detection, real-time detection capability, ability to detect small-sized objects, and generalization and adaptability. This research establishes a comparison between YOLOv5, YOLOv7, and YOLOv8 for detecting and classifying tomato fruits, where average precision values of 0.756, 0.722, and 0.814 were obtained, respectively. The results are relevant in the agricultural industry as they provide valuable data on the accurate detection and classification of fruits in greenhouses. This detection process is crucial for planning to harvest, optimizing resources, and as a starting point for further yield estimation in the harvest.

Palabras clave: Inteligencia artificial (IA); aprendizaje profundo (DL); YOLO; agricultura; precisión.

1. Introducción

El cultivo bajo plástico supone tan sólo un 0.27 % de las 23.9 millones de hectáreas de superficie agraria con las que cuenta España. A pesar de esto, se sitúa como la práctica agronómica más desarrollada, experimentando un aumento de 19.000 hectáreas desde 2010, lo que supone un incremento del 42%. Según datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Pesca, en 2021 España produjo 16.4 millones de toneladas de hortalizas, de las que 4.8 millones, es decir, el 29% son de tomate [1]. Estos datos abalan la importancia de un cultivo cada vez más demandado y en constante desarrollo. Sin embargo, este tipo de cultivos bajo plástico, con disposiciones en espaldera y basados en técnicas de agricultura moderna enfrenta desafíos constantes en términos de eficiencia y calidad de la productividad. En particular, este tipo de cultivos requieren de un seguimiento preciso y continuo de la producción, siendo la detección y conteo de frutos de vital importancia, pero al mismo tiempo un complejo desafío. En este contexto, los subcampos de la IA [2] como el ML [3] están emergiendo con gran fuerza proporcionando soluciones prometedoras. Particularmente, en los últimos años el aprendizaje profundo o DL [4], debido a sus excelentes resultados en tareas de visión por computadora, ha sido objeto de un gran número de investigaciones aplicadas en distintas áreas [5–10] y concretamente en el ámbito agrícola [11–18]. Uno de los enfoques o modelos más populares es

sin duda alguna YOLO (You Only Look Once) [19], que es un modelo pre-entrenado basado en redes neuronales convoluciones para la detección y clasificación de objetos. Este destaca por su capacidad de detección en tiempo real. Por tanto, el empleo de este tipo de técnicas en el sector agrícola no sólo permite mejorar la productividad de los cultivos y reducir los costes de mano de obra, sino que también presentan implicaciones de gran relevancia en la economía de los agricultores, y de la industria agrícola en general.

El objetivo de este trabajo se ha centrado en establecer una comparativa exhaustiva entre las versiones YOLOv5 [20,21], YOLOv7 [22,23] y YOLOv8 [24–26] para la detección y clasificación de frutos de tomate bajo plástico. Con el fin de poder aplicar estos modelos en un posterior proceso de estimación de cosecha, se analizarán métricas de evaluación que informen del rendimiento de los modelos y de su aplicabilidad en el sector agrícola.

2. Materiales y métodos

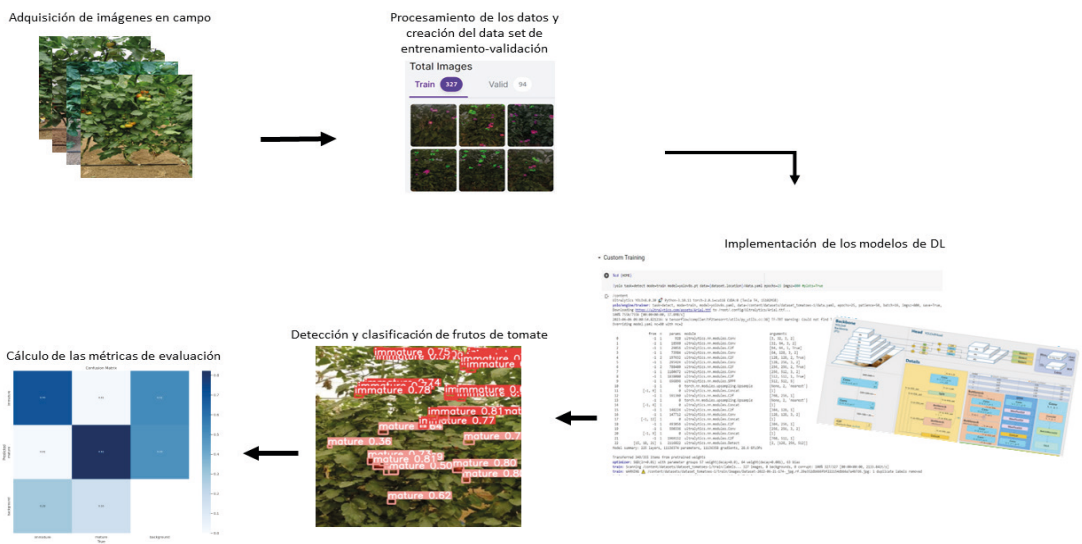


Figura 1. Diagrama de flujo de trabajo del estudio sobre la detección y clasificación de frutos de tomate empleando modelos de DL

Esta investigación hace uso de un conjunto de imágenes en formato RGB tomadas en campo y de varios modelos de aprendizaje profundo para detectar y clasificar frutos de tomate. Para su desarrollo se proponen una serie de pasos: I) adquisición de las imágenes en campo; II) procesamiento de los datos y creación del conjunto de datos de entrenamiento-validación; III) implementación de los modelos de DL; IV) cálculo de las métricas de evaluación. Véase en la Figura 1 el diagrama del flujo de trabajo de la investigación.

2.1. Lugar de estudio y adquisición de los datos

Este estudio se llevó a cabo en la nave 1 de la Estación Experimental de Cajamar "Las Palmerillas", ubicada en el municipio de El Ejido, provincia de Almería, España. En esta, se sembraron el 09 de marzo de 2022, 560 m² de tomate dispuestos en 35 líneas, siendo la variedad Rychka con un marco de plantación de 0.50x2.00 metros. Se adquirió un conjunto de imágenes en RGB de 1908x4032 utilizando un dispositivo móvil (modelo Samsung Galaxy S10 Plus), el cual posee tres cámaras traseras. La cámara trasera principal cuenta con sensor 1/2.55 pulgadas, un objetivo 26 mm equivalente, estabilizador óptico, y una resolución de 12 Megapíxeles (Mpx). La segunda cámara o cámara trasera telephoto, posee un sensor de 1/3.6 pulgadas, con un objetivo

52 mm equivalente, estabilizador óptico y una resolución de 12 Mpx. Por último, cuenta con una tercera cámara trasera gran angular que presenta un sensor 1/3.1 pulgadas, un objetivo 12 mm equivalente, un estabilizador de imagen digital y una resolución de 16 Mpx. Estas características hacen del Samsung Galaxy S10 Plus un teléfono muy completo para la toma de fotografía y video.

La primera imagen fue tomada el 14 de junio de 2022. A partir de ahí, se tomaron fotografías cada dos días, de manera que se obtuvieron imágenes los días 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 de junio, y los días 2, 4, 6 de julio de 2022. Teniendo en cuenta la ubicación del invernadero, y el periodo estival, se decidió realizar la toma de fotografías durante las primeras horas de la mañana, alrededor de las 08-09:00. La toma de fotografías en la mañana hace que las condiciones de luminosidad sean más estables y con menos probabilidad de tener problemas de sobreexposición. Cada día se tomaron 37 imágenes, lo que hicieron un total de 444 fotografías.

2.2. Procesamiento de los datos

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto se hizo uso de un portátil hp Intel Core (TM) i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz 2.81 GHz, con una memoria RAM de 8 GB y un sistema operativo de 64 bits. A través de la plataforma de Roboflow se llevó a cabo el etiquetado de las imágenes de manera manual mediante la creación de cuadros delimitadores, estableciendo dos tipos de etiquetas: "mature" e "inmature". Posteriormente, el conjunto de imágenes etiquetadas se dividió en un set de entrenamiento (77%) y validación (23%). También, se tuvieron en cuenta los requisitos de dimensionalidad de las imágenes de entrada para los modelos de DL, de manera que se redimensionaron a 640x640. Como conjunto de datos de prueba se emplearon 23 imágenes tomadas en campo de distintas plantas, de las que se contaron el número de frutos de tomates maduros e inmaduros.

Para la implementación de los modelos se optó por emplear Google Colab, un entorno de desarrollo de código en la nube que permite ejecutar código arbitrario de Python en el navegador y que proporciona acceso a recursos computacionales como CPU, GPU y TPU, lo que lo hace especialmente adecuado para tareas de aprendizaje automático (ML) y DL [27].

2.3. Métricas de evaluación

La aplicación de métricas de evaluación a los modelos de DL es de vital importancia, ya que permiten medir el rendimiento y la efectividad de estos en una tarea específica, proporcionando una medida cuantitativa del éxito o fracaso del modelo en la tarea asignada [28].

Para evaluar el rendimiento de los modelos de detección y clasificación empleados en esta investigación se utilizaron cuatro métricas de evaluación del rendimiento: precisión (P), sensibilidad o recall (R), precisión media (mAP) y matriz de confusión. A continuación, se exponen las ecuaciones de estas métricas.

La P se define como el porcentaje de verdaderos positivos respecto al total de predicciones positivas [29], como muestra la ecuación (1).

$$P = \frac{Verdaderos\ positivos}{Verdaderos\ positivos + Falsos\ positivos} \quad (1)$$

La R mide la proporción de verdaderos positivos sobre el total de casos positivos reales [30]. La ecuación (2) muestra su fórmula matemática.

$$R = \frac{Verdaderos\ positivos}{Verdaderos\ positivos + Falsos\ negativos} \quad (2)$$

La mAP mide el rendimiento general del modelo de detección en múltiples clases. Se calcula promediando las puntuaciones de precisión promedio para cada clase del conjunto de datos.

Tiene en cuenta la P, la R y los falsos positivos y falsos negativos [31]. Su cálculo se representa mediante la ecuación (3).

$$mAP = \frac{1}{n} + \sum_{k=1}^{n} \text{APk} \quad (3)$$

Donde n es el número de clases y AP_k es la precisión media de la clase k.

La matriz de confusión representa de manera tabular, el número de predicciones correctas e incorrectas para cada clase. Se construye comparando las etiquetas reales y las predicciones para cada muestra del conjunto de pruebas [32].

3. Resultados y discusión

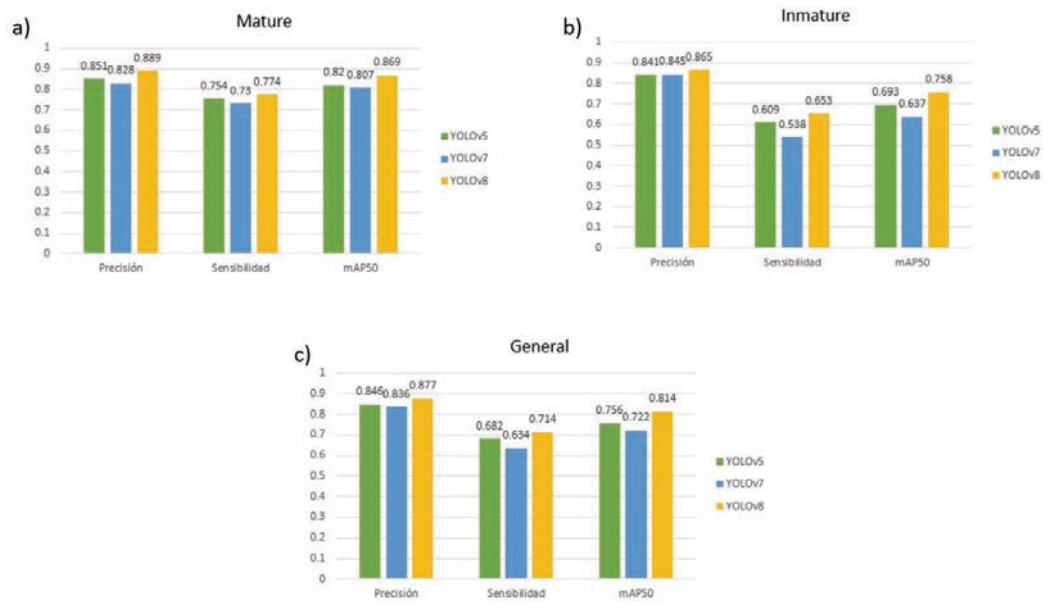


Figura 2. Resultados de las métricas de evaluación empleadas para evaluar el rendimiento de los modelos de DL

En referencia a la precisión, si se comparan los resultados de YOLOv5, YOLOv7 y YOLOv8 de la Figura 2, se observa que YOLOv8 obtuvo valores de 0.889, 0.865 y 0.877 para "*mature*", "*inmature*" y general respectivamente, mientras que YOLOv7 obtuvo valores de 0.828, 0.845 y 0.836 respectivamente. Esto muestra como en términos de precisión, YOLOv8 obtuvo valores superiores a los obtenidos por YOLOv7. En cuanto a la precisión de YOLOv5, se obtuvieron valores de 0.851 para "*mature*", 0.841 para "*inmature*" y 0.846 para general, lo que muestra que los valores han sido ligeramente superiores a los de YOLOv5, y de igual manera, ligeramente inferiores a los de YOLOv8.

En cuanto a los resultados de sensibilidad de la Figura 2, se puede observar que nuevamente YOLOv8 obtuvo unos resultados por encima de los obtenidos con YOLOv5 y YOLOv7. Mientras YOLOv8 obtuvo 0.774 para "*mature*", 0.653 para inmature y 0.714 para general, los modelos YOLOv7 y YOLOv5 obtuvieron 0.73, 0.538 y 0.634, y 0.754, 0.609 y 0.682 respectivamente.

Los resultados de la Figura 2 presentan un patrón similar para la mAP_{50}, pues de nuevo YOLOv8 obtuvo resultados ligeramente superiores al resto de modelos. Siendo el resultado de YOLOv8 de 0.869 para "*mature*", 0.758 para "*inmature*" y 0.814 para general. La obtención de valores de mAP superiores en YOLOv8 es entendible, ya que esta combina la precisión y la

sensibilidad utilizando la curva de precisión-sensibilidad para cada clase y luego calcula el promedio de estas curvas para obtener un valor agregado.

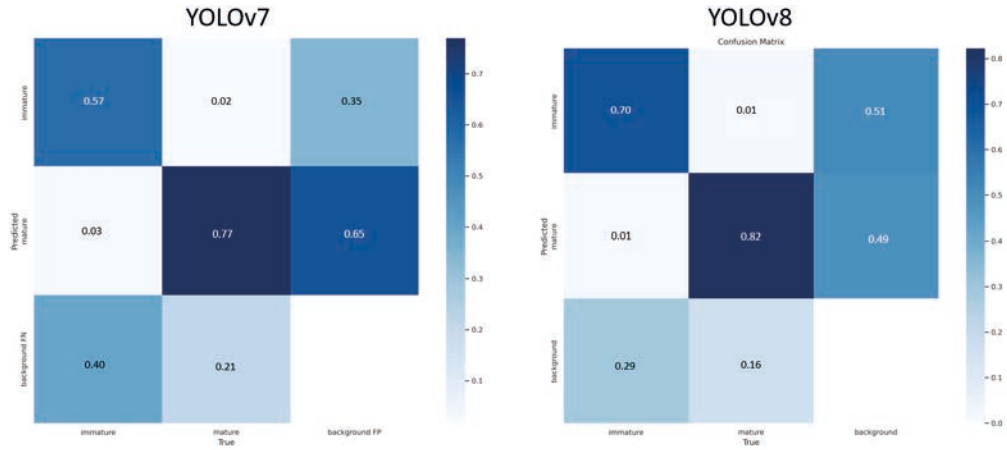


Figura 3. Matriz de confusión de los modelos YOLOv7 y YOLOv8

La Figura 3 muestra la matriz de confusión del modelo YOLOv7 y del modelo YOLOv8. Estas resumen el rendimiento de los modelos entrenados para la tarea de clasificación basada en las dos clases. Analizando ambas matrices, se observa que tanto YOLOv7 como YOLOv8 son capaces de detectar y clasificar frutos maduros (mature) con una buena precisión, concretamente de 0.77 en YOLOv7 y de 0.82 en YOLOv8. En cambio, las puntuaciones para detectar frutos inmaduros (inmature) es de 0.57 y 0.70 respectivamente.

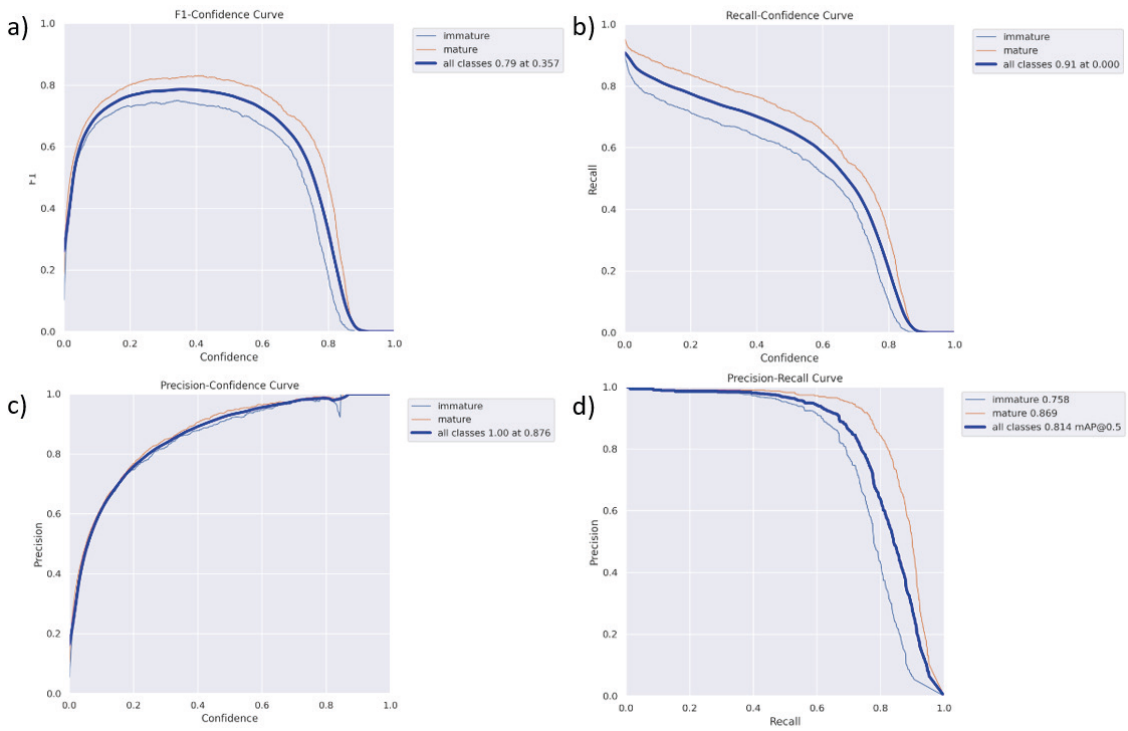


Figura 4. Métricas de evaluación del rendimiento del modelo YOLOv8

En la gráfica a) de la Figura 4 se puede observar que cuando el modelo alcanza un nivel de confianza del 0.357, este logra un valor de F1-score de 0.79 para todas las clases, es decir, indica un rendimiento razonablemente bueno en términos de equilibrio entre la precisión y la

sensibilidad. Esto sugiere que el modelo YOLOv8 tiene una capacidad aceptable para identificar y clasificar la mayoría de las muestras positivas, descartando las predicciones con menor confianza que puedan suponer un impacto negativo en la precisión y en la sensibilidad.

De esta misma figura, se observa en la gráfica c) precision-confianza que a medida que se aumenta en el umbral de confianza, es decir, se requiere una mayor certeza para considerar una predicción como válida, la precisión tiende a aumentar. Esto indica que se descartan las predicciones con menor confianza ya que serían más propensas a ser incorrectas. Por otro lado, se muestra la gráfica b) recall-confianza, que permite visualizar y comprender el equilibrio producido entre la detección de casos positivos y la precisión de las predicciones en distintos niveles de confianza. Por último, esta figura muestra la gráfica d) precision-recall, donde cada punto de la curva representa un umbral distinto que afecta el equilibrio entre ambos. A medida que disminuye el umbral, se aceptan más positivos, lo que hace aumentar el recall y lo que puede disminuir la precisión.

Estas mismas gráficas se obtuvieron para los modelos YOLOv7 y YOLOv8, presentando un mismo patrón en todas y mostrando únicamente diferencias en los valores puntuales representados en la leyenda de cada gráfica. En YOLOv7 para un nivel de confianza del 0.362, se obtuvo un valor de F1-score de 0.72 para todas las clases, mientras que en YOLOv5 para un nivel de confianza de 0.423 se obtuvo un F1-score de 0.75. Estableciendo una compartiva basada en los valores de F1-score de los distintos modelos, se puede concluir que YOLOv8 logra un mejor equilibrio entre precisión y recall que los modelos YOLOv5 y YOLOv7.

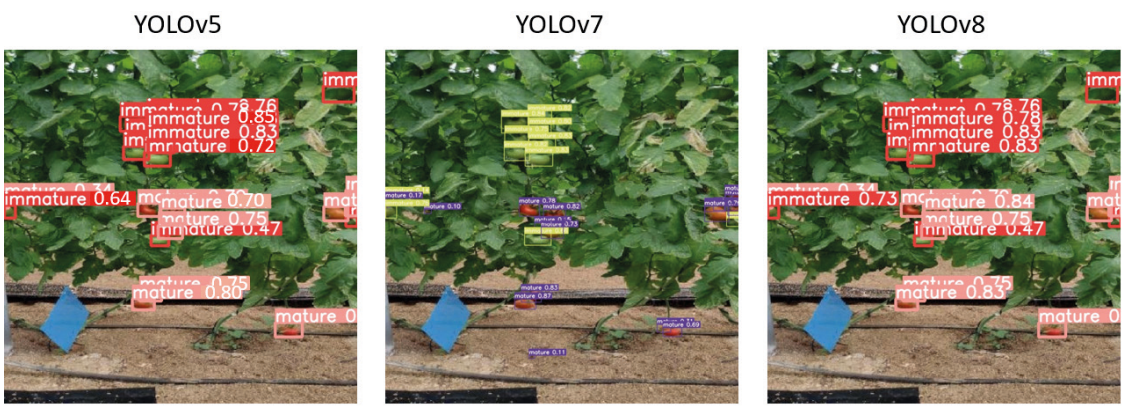


Figura 5. Resultados de la detección y clasificación de frutos obtenidos con los modelos YOLOv5, YOLOv7 y YOLOv8 sobre una imagen de prueba.

La Figura 5 pone de manifiesto la similitud entre los resultados obtenidos, pues YOLOv5 detecta 11 frutos inmaduros y 13 maduros, YOLOv7 detecta 11 frutos inmaduros y 14 maduros y YOLOv8 detecta 11 frutos inmaduros y 11 inmaduros. Luego, teniendo en cuenta que el número real de frutos contados en campo fue de 11 frutos inmaduros y 10 maduros, se muestra el buen rendimiento de las tres arquitecturas de YOLO empleadas en la detección y clasificación de frutos.

4. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se ha realizado un estudio comparativo entre YOLOv5, YOLOv7 y YOLOv8 para detectar y clasificar frutos de tomate. Los resultados obtenidos mostraron una gran similitud entre ellos en términos de rendimiento, pues obtuvieron una mAP de 0.756, 0.722 y 0.814, respectivamente. Aunque hay margen de mejora en cuanto a disponer de un mejor dataset, se puede concluir que el modelo YOLOV8 fue el que mejor resultado mostró.

Como trabajo futuro se propone la creación de un nuevo conjunto de datos de imágenes que incluya pesos de frutos tomados en campo. Esto permitiría implementar modelos para estimar

rendimientos en cosechas, ayudando en la toma de decisiones de técnicos y agricultores, optimizando recursos y mejorando la planificación de producción y logística de cosecha.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud al grupo de investigación "AGR-278; Smart Biosystems Lab" por su apoyo incondicional a lo largo de este estudio, y a la Estación Experimental de Cajamar "Las Palmerillas" por su generosa contribución de las imágenes.

Referencias

1. Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación. Hortícolas de invernadero y al aire libre. Balance campaña 2020/2021 y prevision 2021/2022. **2021.**
2. Mccarthy, J. *What is artificial intelligence?;* **2007**.
3. Janiesch, C.; Zschech, P.; Heinrich, K. Machine Learning and Deep Learning. Electronic Markets, **2021,** 31(3),685-695, doi:10.1007/s12525-021-00475-2/Published.
4. Lecun, Y.; Bengio, Y.; Hinton, G. Deep Learning. *Nature* **2015**, *521*, 436–444.
5. Li, B.; Wu, Y.; Song, J.; Lu, R.; Li, T.; Zhao, L. DeepFed: Federated Deep Learning for Intrusion Detection in Industrial Cyber-Physical Systems. *IEEE Trans Industr Inform* **2021**, *17*, 5615–5624, doi:10.1109/TII.2020.3023430.
6. Heaton, J.B.; Polson, N.G.; Witte, J.H. Deep Learning for Finance: Deep Portfolios. *Appl Stoch Models Bus Ind* **2017**, *33*, 3–12.
7. Warburton, K. Deep Learning and Education for Sustainability. *International Journal of Sustainability in Higher Education* **2003**, *4*, 44–56, doi:10.1108/14676370310455332.
8. Villalba-Diez, J.; Schmidt, D.; Gevers, R.; Ordieres-Meré, J.; Buchwitz, M.; Wellbrock, W. Deep Learning for Industrial Computer Vision Quality Control in the Printing Industry 4.0. *Sensors (Switzerland)* **2019**, *19*, doi:10.3390/s19183987.
9. Esteva, A.; Robicquet, A.; Ramsundar, B.; Kuleshov, V.; DePristo, M.; Chou, K.; Cui, C.; Corrado, G.; Thrun, S.; Dean, J. A Guide to Deep Learning in Healthcare. *Nat Med* **2019**, *25*, 24–29.
10. Li, Y.; Huang, C.; Ding, L.; Li, Z.; Pan, Y.; Gao, X. Deep Learning in Bioinformatics: Introduction, Application, and Perspective in the Big Data Era. *Methods* **2019**, *166*, 4–21, doi:10.1016/j.ymeth.2019.04.008.
11. Corceiro, A.; Alibabaei, K.; Assunção, E.; Gaspar, P.D.; Pereira, N. Methods for Detecting and Classifying Weeds, Diseases and Fruits Using AI to Improve the Sustainability of Agricultural Crops: A Review. *Processes* **2023**, *11*.
12. *Image and Vision Computing*; Yan, W.Q., Nguyen, M., Stommel, M., Eds.; Lecture Notes in Computer Science; Springer Nature Switzerland: Cham, **2023**; Vol. 13836; ISBN 978-3-031-25824-4.
13. Zhu, N.; Liu, X.; Liu, Z.; Hu, K.; Wang, Y.; Tan, J.; Huang, M.; Zhu, Q.; Ji, X.; Jiang, Y.; et al. Deep Learning for Smart Agriculture: Concepts, Tools, Applications, and Opportunities. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* **2018**, *11*, 21–28, doi:10.25165/j.ijabe.20181104.4475.
14. Khalid, S.; Oqaibi, H.M.; Aqib, M.; Hafeez, Y. Small Pests Detection in Field Crops Using Deep Learning Object Detection. *Sustainability (Switzerland)* **2023**, *15*, doi:10.3390/su15086815.
15. Chen, Z.; Wu, R.; Lin, Y.; Li, C.; Chen, S.; Yuan, Z.; Chen, S.; Zou, X. Plant Disease Recognition Model Based on Improved YOLOv5. *Agronomy* **2022**, *12*, doi:10.3390/agronomy12020365.
16. Kamilaris, A.; Prenafeta-Boldú, F.X. Deep Learning in Agriculture: A Survey. *Comput Electron Agric* **2018**, *147*, 70–90.

17. Jin, X.B.; Yu, X.H.; Wang, X.Y.; Bai, Y.T.; Su, T.L.; Kong, J.L. Deep Learning Predictor for Sustainable Precision Agriculture Based on Internet of Things System. *Sustainability (Switzerland)* **2020**, *12*, doi:10.3390/su12041433.
18. Afonso, M.; Fonteijn, H.; Fiorentin, F.S.; Lensink, D.; Mooij, M.; Faber, N.; Polder, G.; Wehrens, R. Tomato Fruit Detection and Counting in Greenhouses Using Deep Learning. *Front Plant Sci* **2020**, *11*, doi:10.3389/fpls.2020.571299.
19. Jiang, P.; Ergu, D.; Liu, F.; Cai, Y.; Ma, B. A Review of Yolo Algorithm Developments. In Proceedings of the Procedia Computer Science; Elsevier B.V., **2021**; Vol. 199, pp. 1066–1073.
20. Wang, Q.; Cheng, M.; Huang, S.; Cai, Z.; Zhang, J.; Yuan, H. A Deep Learning Approach Incorporating YOLO v5 and Attention Mechanisms for Field Real-Time Detection of the Invasive Weed Solanum Rostratum Dunal Seedlings. *Comput Electron Agric* **2022**, *199*, doi:10.1016/j.compag.2022.107194.
21. Nepal, U.; Eslamiat, H. Comparing YOLOv3, YOLOv4 and YOLOv5 for Autonomous Landing Spot Detection in Faulty UAVs. *Sensors* **2022**, *22*, doi:10.3390/s22020464.
22. Terven, J.; Cordova-Esparza, D. A Comprehensive Review of YOLO: From YOLOv1 and Beyond. **2023**.
23. Olorunshola, O.E.; Irhebhude, M.E.; Evwiekpaefe, A.E. *A Comparative Study of YOLOv5 and YOLOv7 Object Detection Algorithms 1**; **2023**; Vol. 2.
24. Ahmed, D.; Sapkota, R.; Churuvija, M.; Karkee, M. *Machine Vision-Based Crop-Load Estimation Using YOLOv8*; **2023**.
25. Li, Y.; Fan, Q.; Huang, H.; Han, Z.; Gu, Q. A Modified YOLOv8 Detection Network for UAV Aerial Image Recognition. *Drones* **2023**, *7*, doi:10.3390/drones7050304.
26. Ang, G.J.N.; Goil, A.K.; Chan, H.; Lee, X.C.; Mustaffa, R.B.A.; Jason, T.; Woon, Z.T.; Shen, B. A Novel Application for Real-Time Arrhythmia Detection Using YOLOv8. **2023**.
27. Bisong, E. *Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform*; Apress, **2019**.
28. Liu, Y.; Chen, X.; Wang, Z.; Wang, Z.J.; Ward, R.K.; Wang, X. Deep Learning for Pixel-Level Image Fusion: Recent Advances and Future Prospects. *Information Fusion* **2018**, *42*, 158–173, doi:10.1016/j.inffus.2017.10.007.
29. Tharwat, A. Classification Assessment Methods. *Applied Computing and Informatics* **2018**, *17*, 168–192, doi:10.1016/j.aci.2018.08.003.
30. Grandini, M.; Bagli, E.; Visani, G. Metrics for Multi-Class Classification: An Overview. **2020**.
31. Revaud, J.; Almazán, J.; Rezende César, R.S.; De Souza, R. *Learning with Average Precision: Training Image Retrieval with a Listwise Loss*; **2019**.
32. Kautz, T.; Eskofier, B.M.; Pasluosta, C.F. Generic Performance Measure for Multiclass-Classifiers. *Pattern Recognit* **2017**, *68*, 111–125, doi:10.1016/j.patcog.2017.03.008.

Design and Validation of a Phenotyping Platform for Industrial Tomato Cultivation

L. Sánchez-Fernández[1], D. Calbet[1], M. Pérez-Ruiz[1]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad de Sevilla. Ctra. Utrera km. 1, 41013, Sevilla; lsanchez1@us.es, daninc12@gmail.com, manuelperez@us.es

Abstract: Agriculture faces an unprecedented challenge. During the next decade, the growing population, global warming, and the increasing need for food fiber and fuel of a growing economy will require a considerable increase in agricultural yield. Sustainable intensification of agricultural systems is mandatory to guarantee future global food safety. The obtention and identification of new cultivars better adapted to the heterogeneity of the agricultural landscape are key factors that will contribute to solve this challenge. One of the main bottlenecks that breeders face is the obtention and analysis of data that correlates with the performance of the crop. This process is usually done manually, which limits the number of cultivars to test. Autonomous phenotyping platforms have emerged as powerful tools to acquire large amounts of data, revolutionizing crop monitoring, yield prediction, and disease identification. These platforms leverage advanced technologies such as remote sensing, robotics, and artificial intelligence to enable rapid and accurate characterization of plant traits, providing invaluable insights for farmers and breeders. Our work aimed to develop a modular platform designed to obtain crop data by integrating several sensors such as LiDAR, Hyperspectral camera, RGB camera, GNSS, and more user-friendly sensors such as spectral reflectance sensors (SRS). The platform was validated and tested in industrial tomato crops under greenhouse conditions.

Keywords: Phenotyping platform, LiDAR, crop monitorization

1. Introduction

Over the last 50 years, agriculture production has increased by a factor of 2.5 – 3 to satisfy the demands of a growing population. During this time, the surface used by agriculture has only increased by a 12%, mainly at the expense of tropical forests on poor soils [1]. This increase in production comes particularly from agricultural intensification. The United Nations expects a population growth of two billion over the next 30 years [2], for which agriculture must provide food, fiber, and fuel. The estimated increase in calorie consumption, which comes with the economic growth of developing countries, will require an expansion of around 70% in agriculture production [3]. Therefore, the agricultural sector must increase its yield accordingly. This yield increment must come together with a reduction in inputs to guarantee the sustainability of agricultural systems. The research and development of new technological applications are pivotal to optimizing the use of inputs in agriculture.

Increasing agricultural yield is not an easy task, especially in the context of climate change, where a significant reduction in precipitations over the Mediterranean region, one of the leading agricultural areas in the world, is expected [4]. Given that increasing the agricultural area at the expense of natural ecosystems is not sustainable, this yield increase must come from a sustainable intensification.

Some technologies with the potential to contribute to solving this challenge have already been developed. However, their application in the field was limited by the high prices of sensors and the limited processing capacity and automation in the field [5]. Precision agriculture relies on sophisticated technologies, sensors for assessing site and crop variability, and algorithms to

gather and process data to provide farmers and technicians with information to help the decision-making process [6]. Since the beginning of this century, the application in the field of precision agriculture has been possible thanks to the generalization of technologies such as global navigation satellite systems, geographical information systems, continuous monitoring systems, remote sensing, and data transmission technology [7]. The application of these new tools has allowed farmers and orchardists to perform variable rate applications in their farms, optimizing their costs of operations, and reducing their use of inputs, thus increasing the sustainability of the agricultural systems by getting closer to the goal of applying the optimum doses of inputs to each plant at the right moment.

Obtaining new cultivars is one of the leading research lines that promise to increase global crop production. Presently the yield of the four key global crops that produce nearly two-thirds of global agricultural calories (maize, rice, wheat, and soybean) is increasing at around 1% per year. To cope with the foreseen demands, this increase in yield must double [8]. One of the main bottlenecks when obtaining new cultivars is the number of varieties that can be characterized. Usually, data gathering by breeders is a time-tasking, manual process that requires highly trained personnel. The characterization of these cultivars is typically done by measuring yield, vigor, pests and disease incidence, crop cycle duration ,and variables related to harvest index and efficiency, such as plant height. In some cases, the technology to evaluate some of these parameters in an automated way has already been developed, however, some of these technologies are difficult to apply in a user-friendly manner under field conditions.

Using phenotyping platforms that integrate different sensors onboard can be an invaluable tool for breeders. These platforms allow the gathering of massive amounts of data and have the potential to operate autonomously, covering a vast extension of plots. These platforms usually equip many different sensors onboard, and data integration is not an easy task. Depending on the crop, the characteristics and sensors of the platform might differ, so they should be devised as modular and scalable as possible. Another aspect that might delay the adoption of this technology by the sector is the price of the sensors required; LiDAR and hyperspectral devices are still out of reach for many breeders.

A key aspect of making these platforms affordable and ease their adoption by the sector is the use of cheaper sensors. Regarding this, there is still much work to be done. Generally, using a LiDAR or hyperspectral sensor is unaffordable outside of a research environment. However, LiDAR sensors are getting cheaper and have started to generalize in many sectors and utility devices. Hyperspectral sensors generate a massive amount of data per lineal meter that can be troublesome to manage and analyze. A considerable effort is being made by the scientific community worldwide to identify which bands of the specter are of interest for plant phenotyping. Many research groups are working on the identification of key bands to identify specific diseases and toxicity, or to assess water stress. Once specific bands of interest are identified, creating new, cheaper, specifically designed sensors will pave the way to generalizing this technology in the field.

Another challenge these platforms face is the optimization of data gathering. To optimize the process is essential to gather only valuable data. A considerable amount of the generated data is of little value for farmers or breeders. The value of terrestrial phenotyping platforms is not only in the data they can gather in an automated and efficient way but in the decisions that the result of a complex analysis process throws. To simplify and optimize the process, we must identify the data that can be of value for every stakeholder and store and process only those with real value for them.

This work aimed to develop a terrestrial phenotyping platform that integrates LiDAR sensors, SRS sensors, hyperspectral camera, RGB camera, and a GNSS-RTK system. The phenotyping platform should also be able to gather weather data from a stationary weather station. The main challenge of this work is not the assembly of the phenotyping platform by itself.

The integration of the sensors, which are different and require diverse communication protocols, and the compilation of valuable data in a user-intuitive manner was the key aspect of this work. The platform was validated in an industrial tomato experimental plot under greenhouse conditions.

2. Materials and Method

2.1. Development of the phenotyping platform

To be able to add movement and the spatial reference needed to operate the LiDAR and hyperspectral sensor, a terrestrial phenotyping platform was developed. The platform's design was modular to make it easy for the user to adapt the type, position, and number of sensors on board, depending on the crop and the parameters to analyze. The phenotyping platform (*Table 1*) was designed to move easily over industrial tomato crop lines.

Table 1. Technical characteristics of the phenotyping platform

Characteristics	Dimensions
Dimensions (length, height, width)	750 mm, adjustable, 1500 mm
Wheel track and wheelbase	1500 mm, 750 mm
Maximum speed	0.5 $m \cdot s^{-1}$
Minimum speed	0.1 $m \cdot s^{-1}$
Total mass of the platform	75 kg
Wheel diameter	200 mm

2.2. Platform validation

To validate the platform, we established an experimental plot of 7x5 m under a greenhouse where we cultivated three rows of industrial tomatoes. The separation between the rows was 1.5 m, and the space between plants was 0.22 m, following the standard practices of plant density and crop distribution in the region. The platform was validated by gathering data over these three rows. This study occurred in the experimental farm of the School of agricultural engineering at the University of Seville, under greenhouse conditions (37°21'7"N, 5°56'17"W). Platform scans were performed every week during the whole crop cycle.

2.3. Sensors and Software on-board

2.3.1. LiDAR Sensor

A LiDAR sensor (VLP-16, Velodyne Lidar, San José, CA, USA) was used to obtain 3D data and characterize the crop structure. This sensor gathers data points from 16 different planes. It was fixed to the middle section of the platform at 1 m high from the crop from the platform itself to point at the middle of the crop lines.

Table 2. Characteristics of the used VLP-16 LiDAR sensor

Scanning range	100 m
Field of View (vertical)	30°
Angular resolution (vertical)	2°
Field of View (horizontal/azimuth)	360°
Angular resolution (horizontal/azimuth)	0.1-0.4°

Rotation rate	5-20 Hz
Laser wavelength	Infrared (905 nm)
Dimensions	103mm diameters x 72mm height
Weight	830 g
Protection	IP67

To establish a relative coordinate system to the Lidar data, we used an odometer capable of obtaining the Z coordinate value based on the horizontal movement through the experimental plots. We attached a wheel to the rear of the platform equipped with a high-resolution encoder (63R256, Greyhill Inc., Chicago, IL, USA). The movement on the Z axis was obtained by analyzing the pulses received by the odometry system using a low-cost microcontroller Arduino NANO (Arduino Project, Ivrea, Italy). The sensor configuration, capture, and storage of the sensor scan data applying the Z coordinate correction was done using a Python script and an Ethernet cable for communication between the LiDAR sensor and the onboard computer.

2.3.2. Hyperspectral Sensor

A hyperspectral sensor (Nano-Hyperspec VNIR, Headwall Photonics Inc, Bolton, MA, USA) was used to obtain hyperspectral data of the crop. This sensor can receive hyperspectral data within the range of 400-1000 nm with a resolution of 3 nm. This sensor is meant to work onboard a drone, so the sensor's frame rate and the platform speed were adapted to obtain a consistent image. The normalization of the hyperspectral images was done using a white reference visible in all the hyperspectral images and a Python script. The crop segmentation and obtention of spectral signature and vegetation indexes was done using a Python script; the hyperspectral images were segmented, setting a threshold for the Excess Green Index (EGI). Data transmission to the onboard computer was done using an Ethernet cable.

2.3.3. SRS Sensors

The platform equipped two SRS sensors, an NDVI sensor and a PRI sensor (Decagon Devices, Inc., Pullman WA, USA), designed to take measurements of the incident and reflected radiation. Each sensor comprises two-band radiometers that measure either incident or reflected radiation in wavelengths appropriate for calculating NDVI and PRI. The NDVI sensor uses the 630 and 800 nm central wavelengths, while the PRI sensor uses the 531 and 571 nm central wavelengths. These sensors followed the SDI-12 standard and were connected to an Arduino UNO. The data obtained by these sensors were transferred to the onboard computer through the serial port.

2.3.4. RGB-D sensor

The RGB-D sensor was a stereo camera (ZED, Stereolabs Inc., San Francisco, CA, USA) connected to a Jetson Nano (Jetson Nano, Nvidia, Santa Clara, CA, USA) that processed the images in real-time and detected tomatoes using a trained deep learning model. The developed model identified two classes within the tomatoes detected: green or immature tomatoes and red or mature tomatoes.

2.3.5. Weather sensors

Weather data was obtained from two stationary weather stations (Raincrop, Sencrop, Lille, FR; Windcrop, Sencrop, Lille, FR) installed inside the experimental greenhouse. We obtained temperature, relative humidity, wind speed, wind direction, and precipitations of the whole crop cycle using an API that the weather station manufacturer provides. Weather data can be useful

to schedule irrigation, predict the incidence and the apparition of pests and diseases or predict harvest dates. However, weather data was only gathered in our work to validate our integration method and to associate the georeferenced sensor values collected using the phenotyping platform with weather values.

2.3.6. GNSS-RTK sensor

The platform equipped a GNSS-RTK sensor (BX982, Trimble Inc., Westminster, CO, USA) to make possible the georeferentiation of the gathered data. Position data were transmitted to the onboard computer using the serial port and stored in a .csv file with weather and SRS data. SRS, RGB, and weather data were gathered using the GNSS-RTK position as a trigger.

3. Results and discussion

3.1. Development of the phenotyping platform

The successful development of the phenotyping platform allowed the data collection of the main parameters of the industrial tomato crop. During the first field tests, we validated the use of the phenotyping platform (Figure 1) as a flexible and robust modular tool that allows repeatability in the measurements. This repeatability is essential in validating any method through the years and different crop cycles.



Figure 1. General view of the developed platform with the onboard computer, the odometry system attached to the rear of the platform, and the LiDAR sensor attached to the front part of the platform to generate the 3D point cloud of the crop.

3.2. Crop volume characterization

Regular platform scans allowed the obtention of the 3D point clouds corresponding to each row of the experimental plot (Figure 2). These 3D point clouds permitted the obtention of parameters such as crop volume or crop height.

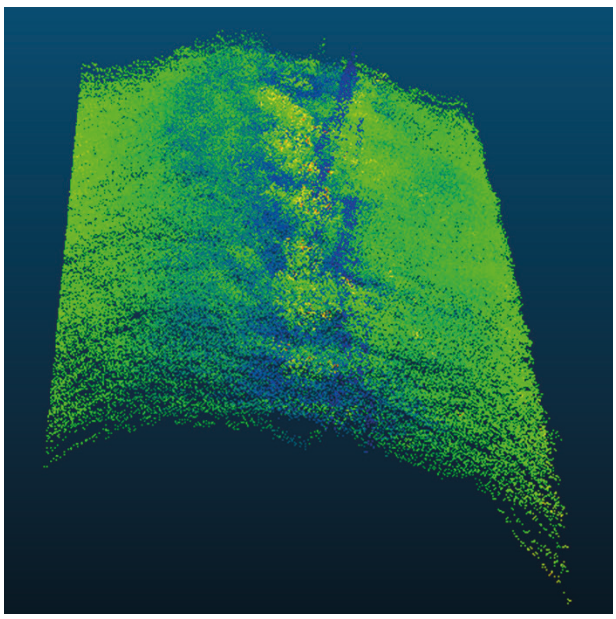


Figure 2. 3D point cloud of a tomato crop row generated by the phenotyping platform.

3.3. SRS position and weather sensors integration

We could integrate on a single .csv file the SRS and weather data collected, associating NDVI and PRI values to the weather conditions of the plot and a specific point in the experimental plot. This georeferenced information will allow the generation of accurate NDVI and PRI maps, which are essential for farm management and crop yield response. The generated data points have the potential to be used as inputs for GIS tools that will allow the generation of prescription maps in real-time, considering all the variables gathered by the phenotyping platform.



Figure 3. Generated shape file with the coordinates and the values of weather variables and vegetative indexes associated with each point.

3.4. Fruit detection

Using the RGB camera and a trained deep-learning model, we could count and classify the fruits into mature and immature tomatoes in real-time. This tool can potentially predict yield and the proportion of ripe tomatoes. The prediction of ripe tomatoes is an essential parameter for the farmers of this type of crop since the harvest occurs once 85-90% of the tomatoes are ripe. Further

development of this tool has the potential to be used to predict yield based on the fruit number and fruit size (Figure 4).



Figure 4. Detection and classification performed by the phenotyping platform in real-time.

4. Conclusions

In this work, we showed the development of a terrestrial phenotyping platform and the first results of its use as a tool to obtain and estimate valuable variables for farmers and breeders, such as environmental variables, crop volume, vegetative indexes, and yield. The sensors used to estimate crop volume (LiDAR), vegetative indexes (NDVI and PRI SRS sensors), weather variables (fixed weather station), and yield (RGB camera) have proven effective. Our results suggest that using this type of platform provides a robust, fast, and simple characterization of the main crop parameters. The ability to gather and analyze these parameters in an automated way will impact the development of yield prediction algorithms, the creation of prescription and yield maps essential for precision agriculture, and the improvement of breeders' capacity to evaluate new cultivars in a cost-effective automated way.

References

1. Foley, A., Ramankutty N., Brauma K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockstro, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. & Zaks, D.P.M. Solutions for a cultivated planet. Nature. 2011. 478, 337-342. https://doi.org/10.1038/nature10452
2. Population Division of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. 2019. World Population Prospects 2019: Press Release. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_PressRelease_EN.pdf
3. Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., 2019. World resources Report: Creating a Sustainable Food Future. World Resources Institute Report. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18999.88482
4. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Hans-Otto, P., Skea, J., Roberts, D., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufama-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Robin, J.B., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., Waterfield, T., 2019. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
5. Jones, H.G., Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. Journal of Experimental Botany. 2007. 58, 119-130. https://doi.org/10.1093/jxb/erl118

6. Duncan, E., Glaros, A., Ross, D.Z., Nost, E., New but for whom? Discourses of innovation in precision agriculture. Agriculture and Human Values. 2021. 38, 1181-1199. https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8
7. Pathak, H.S., Brown, P., Best, T., A systematic literature review of the factor affecting the precision agriculture adoption process. Precision Agriculture. 2019. 20, 1292-1316. https://doi.org/10.1007/s11119-019-09653-x
8. Ray, D., Mueller, D., West, P., Foley, J., Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. Public Library of Science. 2013. 8, 1-8. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428



Construcciones e Infraestructuras Rurales / Construção e Infra-Estruturas Rurais



Medición de presiones y tasa de descarga en un silo experimental con paredes de chapa ondulada

J.M. Fuentes[1], A. Pinilla[1], J.L. Alejandre[1], M. Madrid[2], F. Ayuga[1]., E. Gallego[1]

[1] Grupo de investigación EIPIRMA. Universidad Politécnica de Madrid (España); francisco.ayuga@upm.es
[2] IFLYSIB—CONICET. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata (Argentina).

Abstract: Corrugated sheet silos are commonly used in agricultural facilities. Previous research suggests that the geometry of the corrugation affects the circumferential distribution of pressures exerted by the stored material against the silo wall. However, very few experimental tests in silos with corrugated walls are reported in literature. A silo model with corrugated steel walls, a square cross section and with different bottom configurations (flat bottom, centered discharging hopper and eccentric hopper) has been manufactured at the UPM. The vertical section of the silo model consisted of two independent modules, each one with 0.75 m height and 0.45 m width and length. The front and back walls of the silo are made of clear PMMA, while the lateral walls are made of corrugated steel sheet with a respective wavelength and depth of 75 mm and 13 mm. A series of experimental tests were performed using maize as the bulk material to evaluate pressures exerted by the stored material against the walls and the mass flow index (MFI) during the discharge. It was found that the presence of a hopper affects the distribution of wall pressures and slightly tend to increase the flow rate during discharge.

Palabras clave: ensayos experimentales; maqueta; presiones; tasa de descarga.

1. Introducción

Los silos de chapa metálica son una solución de almacenamiento ampliamente extendida en instalaciones agropecuarias para almacenar productos granulares tales como maíz, trigo, piensos o fertilizantes, entre otros. Los silos con paredes de chapa ondulada y tolva son una de las alternativas de diseño más empleadas, al garantizar esta solución un comportamiento estructural más eficiente y facilitar la descarga del material almacenado [1,2].

La fricción entre el material granular y las paredes del silo provoca que un valor significativo del peso almacenado se transfiera a las paredes, fenómeno conocido como "efecto silo". Las fuerzas de rozamiento transferidas a las paredes del silo dependen, entre otros aspectos, de la geometría de la chapa, dimensiones del silo y del material almacenado. En los últimos años se ha realizado un considerable número de trabajos de medición de presiones en silos experimentales [3-5]; si bien, la mayoría de estos trabajos se llevaron a cabo en silos de paredes lisas. Wójcik et al. [6] realizaron ensayos experimentales en un silo con paredes de chapa ondulada de acero, pero empleando un fondo plano.

En la presente investigación se ha diseñado y puesto en marcha un silo experimental con paredes de chapa ondulada convenientemente instrumentado con células de carga para medir las fuerzas normales y de rozamiento en diferentes posiciones de las paredes, así como la cantidad de fricción producida en el silo considerando diferentes configuraciones del fondo (fondo plano o tolva con salida centrada). El objetivo de este trabajo es comprobar la posible influencia de la configuración del fondo sobre la distribución de fuerzas en las paredes del silo y sobre las tasas de descarga utilizando maíz como material almacenado.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción de la maqueta

El silo empleado en esta investigación presenta una sección transversal cuadrada de 0,45 x 0,45 m y una altura total (H) de 1,5 m (Figura 1). Está formado por dos módulos independientes de 0,75 m de altura cada uno, soportados por 4 sensores de carga situados respectivamente en los niveles 1 y 2, mientras que la tolva o el fondo del silo está soportado a su vez por otros 4 sensores situados en el nivel 3.

Las paredes laterales de la maqueta están formadas por sendas láminas de chapa ondulada de acero galvanizado con una longitud de onda de 75 mm y una profundidad de 13 mm, fijadas a un tablero de madera DM para garantizar la rigidez y evitar la aparición de deformaciones. Las paredes frontal y trasera del silo se fabricaron en polimetilmetacrilato (PMMA) transparente para poder observar el flujo de material durante la descarga. En las paredes onduladas del silo se han colocado 4 paneles para la medición de fuerzas normales y tangenciales de 0,15 x 0,15 m de sección, cuyo centro está situado respectivamente a alturas de 0,25 m (0,2·H) y 1,25 m (0,8·H) respecto al fondo del silo o al plano de contacto del cuerpo inferior con la tolva. Los paneles de medición presentan una holgura de 1 mm en todas sus caras respecto al resto de la chapa que forma la pared del silo para evitar la transmisión de fuerzas durante los ensayos.

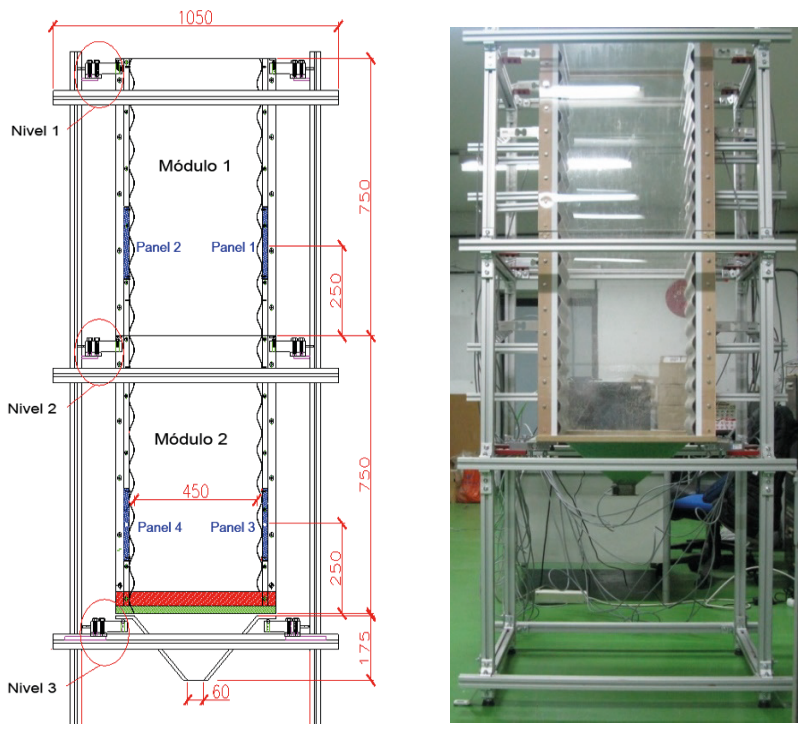


Figura 1. Maqueta de silo utilizada en la investigación.

Para la descarga del silo se han utilizado dos configuraciones diferentes: fondo plano y tolva de salida centrada, construidos en ambos casos con un espesor de chapa de 1 mm para garantizar que no se produjeran deformaciones significativas durante los ensayos. La boca de salida en ambos casos fue de sección cuadrada con unas dimensiones de 60 x 60 mm.

Las distintas células de carga utilizadas fueron suministradas por la empresa *HBK* (modelos *SP4MC3MR* y *HLCB1C3*) y su capacidad máxima de carga es función de su posición en la maqueta, según las fuerzas a las que previsiblemente iban a ser sometidos. La recogida de datos se efectuó mediante dos módulos de adquisición tipo *QuantumX MX1615* del mismo proveedor

que los sensores, con una frecuencia de adquisición de 100 Hz para posibilitar el registro del pico de presiones que habitualmente se produce al inicio de la descarga.

Se efectuaron siete repeticiones de cada uno de los ensayos, con el fin de garantizar la repetibilidad de las pruebas experimentales y poder llevar a cabo un análisis estadístico de los resultados.

El llenado del silo se efectuó mediante un tornillo elevador sinfín (*sistema Growket*) de 75mm de diámetro con una capacidad de carga constante (900 kg/h). Dicho tornillo se alimenta desde una tolva de recepción auxiliar y descarga el material sobre el silo de forma centrada mediante un tubo de caída vertical. Una vez completada la fase de llenado del silo, el material se dejó en reposo durante 5 minutos antes de proceder a la apertura de la boca de salida para vaciar completamente el silo.

2.2. Propiedades mecánicas del material almacenado

El material utilizado en los ensayos fue maíz en grano suministrado por la empresa *Secadero del Jarama S.A.* La determinación de las propiedades mecánicas del material se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Madrid y de la Universidad de Extremadura, instituciones participantes en este proyecto de investigación, mediante diferentes procedimientos de ensayo definidos en la norma EN 1991-4 [7], tales como ensayos de corte directo, ensayos triaxiales y ensayos edométricos, entre otros [8]. La densidad aparente se determinó en laboratorio y se obtuvo también durante los ensayos experimentales a partir de la masa de maíz necesaria para completar el volumen del silo (0,2954 m^3). Las propiedades físicas del maíz utilizado en los ensayos se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas del maíz utilizado en los ensayos

Parámetro	Unidades	Valor
Peso específico (laboratorio)	kN/m^3	7,52
Peso específico (ensayos)	kN/m^3	8,32
Ángulo de reposo	°	32,2
Ángulo de rozamiento interno	°	29
Coeficiente de rozamiento maíz-acero		0,34
Humedad	%	12,8
Módulo de elasticidad	MPa	34,8
Coeficiente de Poisson		0,18
Dimensiones medias del grano	mm	Largo: 11,65±0,98 Ancho: 8,7±0,74 / 7,19±0,67 Grueso: 4,57±0,67
Diámetro partícula esférica equivalente	mm	9,29±0,59

3. Resultados y discusión

3.1. Parámetros obtenidos en los ensayos

Las presiones normales ($p_{Ni,t}$) y tangenciales ($p_{Ti,t}$) ejercidas por el material almacenado sobre cada uno de los 4 paneles de medición en cada instante se obtuvieron a partir de las fuerzas ejercidas por el grano sobre la superficie efectiva del panel.

$$p_{Ni,t} = \frac{F_{Xi,t}}{A_p}; \quad p_{Ti,t} = \frac{F_{Yi,t}}{A_p}$$

donde:

$F_{Xi,t}$ = Fuerza de empuje normal registrada en el panel i (1 a 4) en el instante t [medida en N].

$F_{Yi,t}$ = Fuerza de rozamiento registrada en el panel i (1 a 4) en el instante t [medida en N].
A_P = Área efectiva del panel de medición (0.0196 m²).

La tasa de descarga o índice de flujo másico (MFI) del silo en un instante concreto de la descarga puede obtenerse a partir de la variación de la masa del material contenido en el silo, que a su vez puede obtenerse a partir de la suma de las fuerzas verticales medidas por los sensores sobre los que se apoya el silo en los niveles 1, 2 y 3:

$$MFI_t = \frac{\Delta M_t}{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1,3}^{j=1,4} F_{Yij,t}}{9{,}81 \cdot \Delta t}$$

donde:

$F_{Yij,t}$ = Fuerza vertical registrada por el sensor situado en el nivel i (1 a 3) y posición j (1 a 4) en el instante t [medida en N]
Δt = intervalo de tiempo considerado (1 s)

3.2. Presiones normales y de rozamiento sobre las paredes del silo

La figura 2 muestra la evolución de las presiones registradas en los paneles situados en la parte inferior del silo (paneles 3 y 4) correspondientes a sendas repeticiones de los ensayos realizados respectivamente con fondo plano y tolva de salida centrada. Como puede observarse, en todos los casos las presiones aumentan a medida que se va llenando el silo, se mantienen constantes durante el período de reposo del material almacenado (300s); posteriormente, al iniciarse el vaciado tiene lugar un pico de presiones y la posterior reducción de éstas hasta que se completa la descarga.

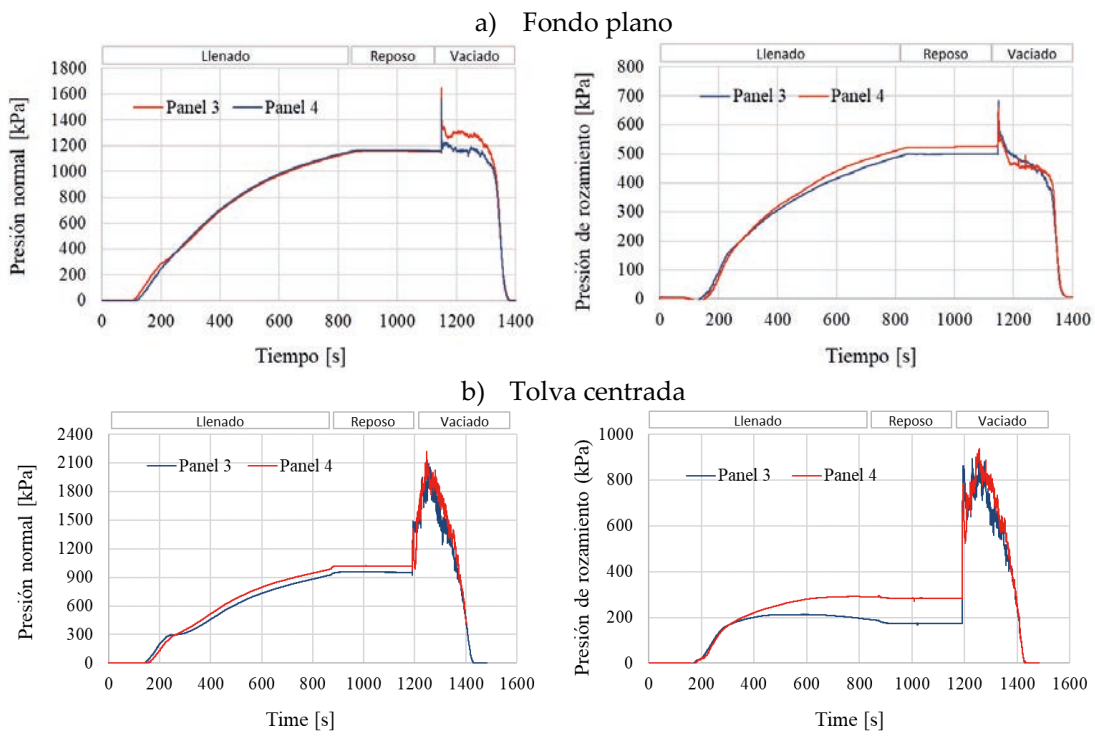
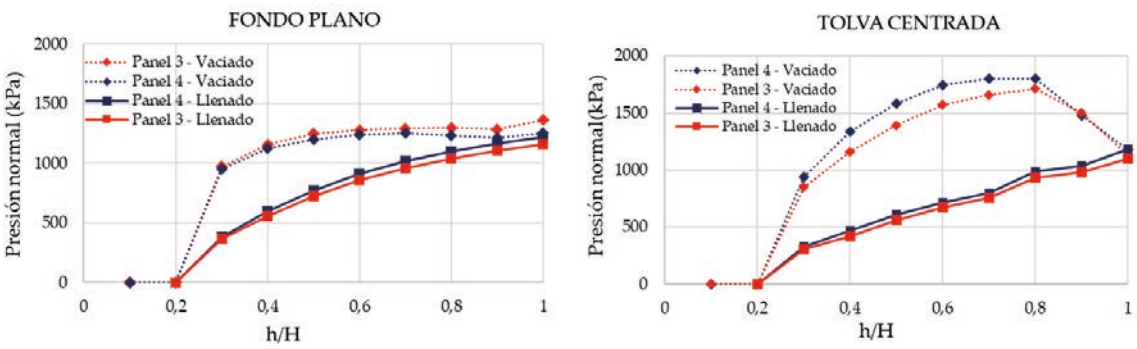


Figura 2. Evolución de las presiones registradas en los paneles situados en la parte inferior del silo durante sendas repeticiones correspondientes a fondo plano y tolva de salida centrada.

La figura 3 muestra los valores medios de las presiones normales registradas respectivamente en los paneles situados en el módulo superior e inferior del silo en las 7

repeticiones de cada uno de los ensayos, donde h/H se refiere a la altura que alcanza el grano almacenado sobre el fondo del silo o la transición con la tolva respecto a la altura total del silo. Como puede apreciarse en los gráficos, a igual altura de material almacenado las presiones normales registradas son mayores en el vaciado. Por otro lado, las presiones máximas registradas durante el vaciado alcanzan valores superiores en el caso de que el silo presente una tolva de descarga frente al caso en que la descarga se efectúe desde un fondo plano (1803 kPa vs 1365 kPa en los sensores situados en el módulo inferior y 1796 kPa vs 1559 kPa en los sensores situados en el módulo superior del silo).

a) Paneles situados en el módulo inferior del silo (3 y 4).



b) Paneles situados en el módulo superior del silo (1 y 2).

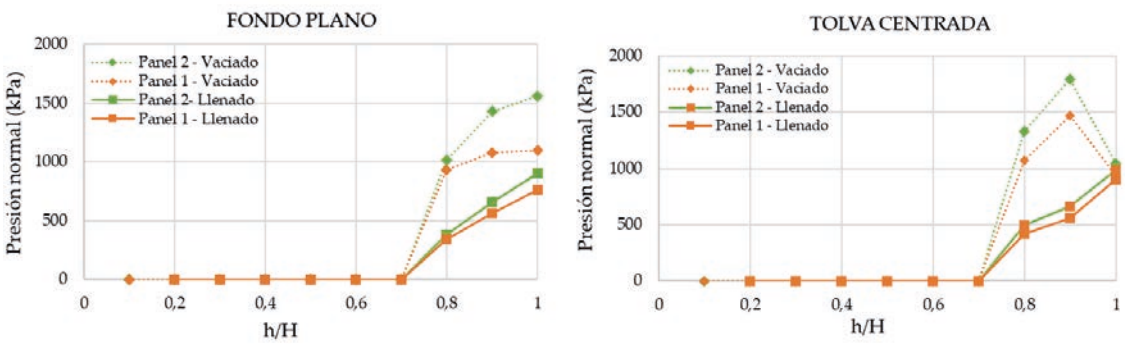


Figura 3. Presiones normales sobre las paredes registradas en los ensayos.

En la Figura 4 se comparan las presiones normales registradas durante el llenado por los sensores situados en el módulo inferior de la maqueta (3 y 4), comparadas con los valores obtenidos con la norma EN 1991-4. Como puede observarse, existe gran similitud entre los resultados experimentales y los calculados. En el caso del silo con tolva los valores que predice la norma ofrecen cierto margen de seguridad respecto a las presiones medidas (entre 1,08 y 1,33 según la altura que alcance el grano sobre la tolva), mientras que en silo de fondo plano los valores de presiones medidos y los indicados por la norma son prácticamente coincidentes.

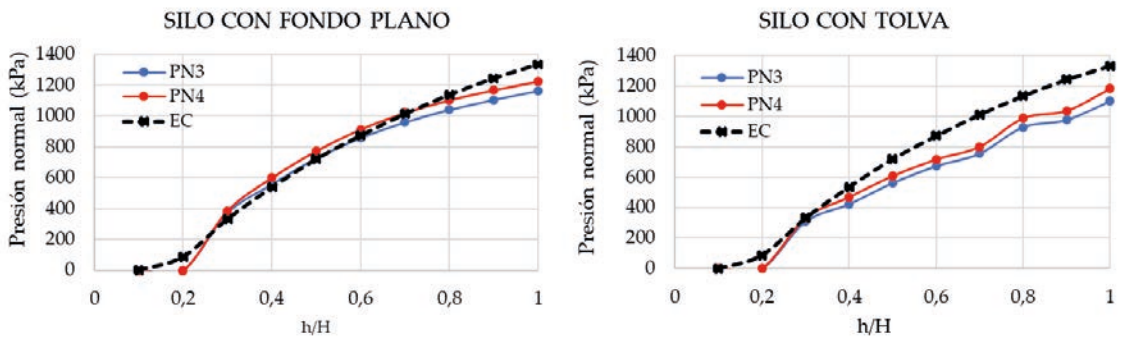
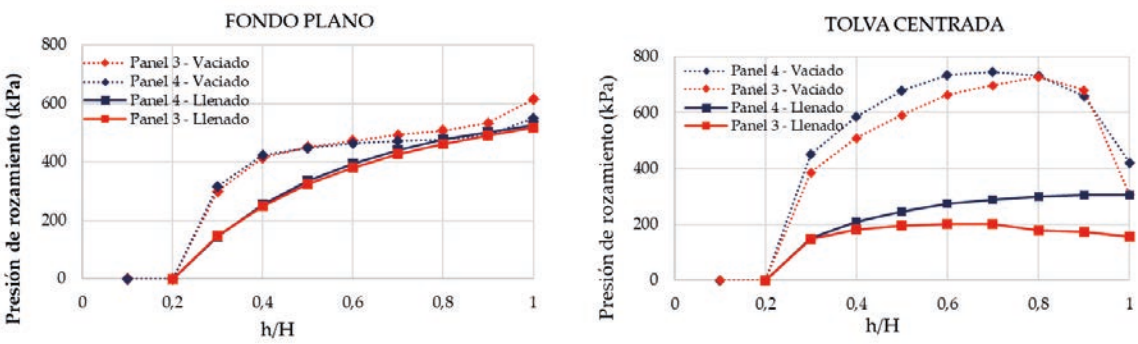


Figura 4. Comparación de las presiones normales en el módulo inferior del silo registradas en el ensayo y obtenidas con la norma EN1991-4.

Asimismo, las presiones de rozamiento registradas, que se muestran en la Figura 5, presentan un comportamiento similar al de las presiones normales, con valores mayores durante el vaciado y valores pico superiores en el caso que la descarga se efectúe desde una tolva frente a un fondo plano (745,5 kPa vs 614,9 kPa en los sensores situados en el módulo inferior y 560,5 kPa vs 536,1 kPa en los sensores situados en el módulo superior).

Los resultados obtenidos en las diferentes repeticiones de cada uno de los ensayos son sólidos y coherentes, con coeficientes de variación (CV) oscilando entre el 1,5% y el 10% para la medida de las presiones normales en todos los paneles, alturas de llenado y etapas (llenado o descarga) y entre el 5 y el 30% en el caso de las presiones tangenciales de rozamiento.

a) Paneles situados en el módulo inferior (3 y 4)



b) Paneles situados en el módulo superior (1 y 2)

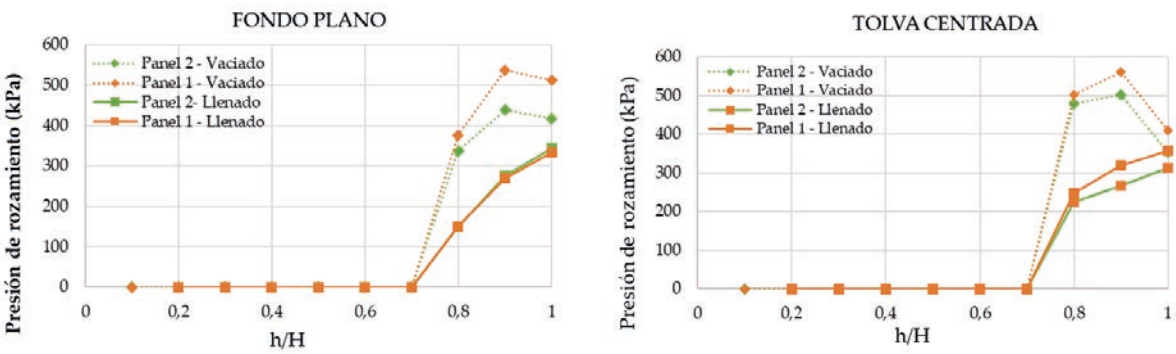


Figura 5. Presiones de rozamiento registradas en las paredes del silo en los ensayos.

3.3. Tasa de descarga

La Figura 6 muestra la evolución de la tasa de descarga o índice de flujo másico (MIF) del silo para las dos configuraciones de fondo estudiadas. Como puede verse, el valor de la tasa de descarga es bastante estable durante todo el proceso de descarga y toma valores ligeramente mayores en el caso en que el silo presente una tolva de descarga frente a un fondo plano (0,92 vs. 0,89 kg/s). El proceso de descarga finaliza bruscamente en ambos casos tras una ligera reducción de las tasas de descarga en la última fase del vaciado. La repetibilidad de los ensayos con relación a este parámetro es buena, con valores del coeficiente de variación (CV) por debajo del 1,5%.

Como era de esperar, los tiempos medios de descarga fueron inferiores en el caso correspondiente a la configuración con fondo plano frente a la descarga con tolva (252 vs 282 s), dada la menor masa de material almacenada en el silo en ese caso. Por otro lado, mientras en el caso del silo con tolva se produce el vaciado completo de todo el maíz almacenado en el silo, en el caso que la descarga del silo se produzca a través de un fondo plano cierta cantidad de grano permanece acumulada sobre el fondo al finalizar la descarga. En los presentes ensayos dicha cantidad pudo cifrarse en torno a un 5,4% de la masa total almacenada en el silo (13,8 ± 2 kg).

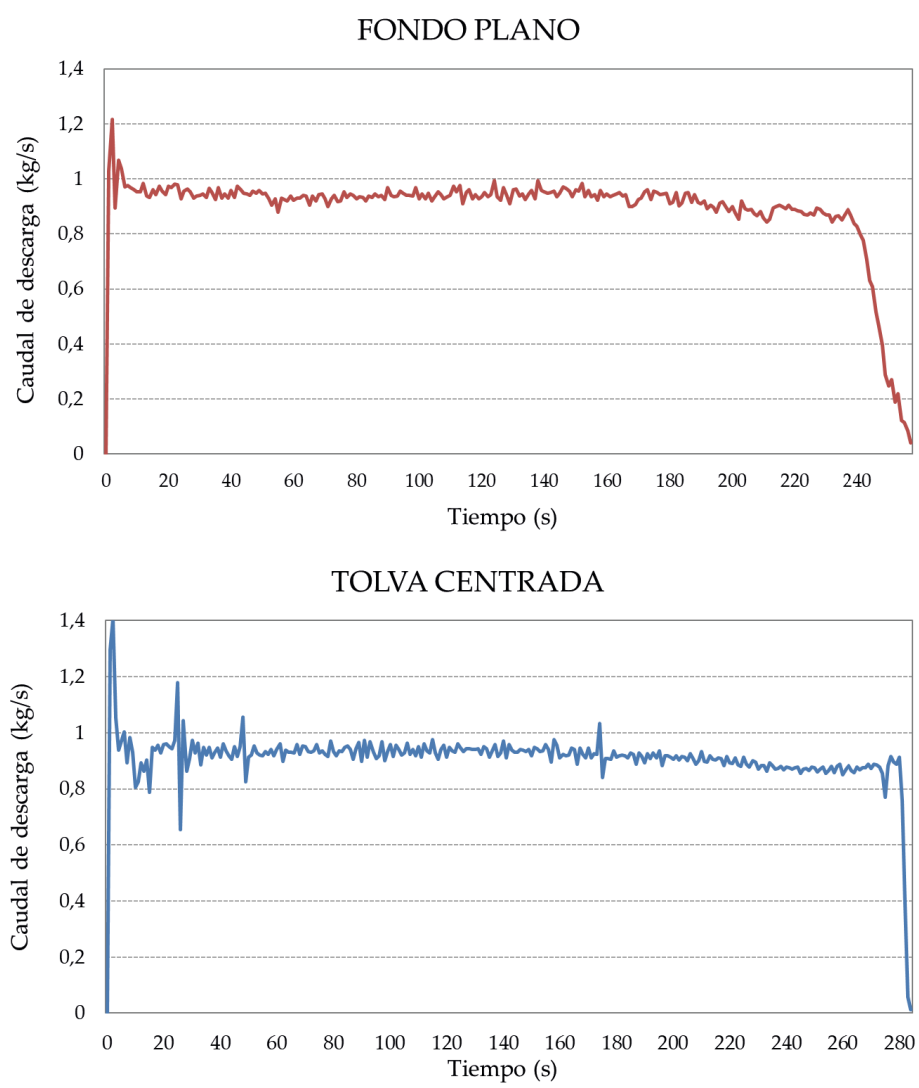


Figura 6. Valores medios de las tasas de descarga registradas en los ensayos.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha construido e instrumentado una maqueta de silo con paredes de chapa ondulada y varias configuraciones posibles de fondo para poder medir las presiones normales y de rozamiento en sus paredes y las tasas de flujo de material durante la descarga. A partir de ensayos experimentales se ha comprobado el efecto del tipo de salida, utilizando maíz en grano como material almacenado. Las principales conclusiones derivadas de los ensayos experimentales realizados son las siguientes:

- La maqueta se ha diseñado y construido correctamente, ya que se ha obtenido una buena repetibilidad de los resultados, que, por otro lado, están en consonancia con los obtenidos por otros investigadores. Asimismo, las presiones registradas en los ensayos experimentales guardan similitud con los predichos por la norma EN 1991-4.
- La presencia de una tolva de salida afecta a las presiones normales registradas durante la descarga, traduciéndose en un incremento de estas (entre un 15 y un 30%) frente al caso en que la descarga se efectúe a través de un fondo plano.
- La presencia de una tolva afecta ligeramente a la velocidad de flujo del material en la descarga, produciendo una ligera aceleración de esta. Por otro lado, mientras en ese caso se produce la salida completa de todo el maíz almacenado en el silo, en el caso de que la descarga se efectúe a través de un fondo plano con una boca de salida de las mismas dimensiones, una cierta cantidad de grano permanece acumulada sobre el fondo del silo al concluir la descarga, que en los presentes ensayos pudo cifrarse en torno a un 5,4% de la masa de maíz almacenada en el silo.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la "Agencia Estatal de Investigación" a través del proyecto de investigación "Estudio del comportamiento estructural de silos de pared ondulada mediante Modelos de Elementos Discretos (SILODEM)", número de subvención PID2019-107051GB-I00/AEI/10.13039/501100011033".

Referencias

9. Wiącek J., Gallego E., Parafiniuk P., Kobyłka R., Bańda M., Horabik J., Molenda M. Experimental analysis of wheat-wall friction and grain flow in a steel silo with corrugated walls. Biosystems Engineering. 2017, 209, 216-231.
10. Ayuga, F. Some unresolved problems in the design of steel cylindrical silos. En: Structures and Granular Solids. CRC Press. 2008. pp. 135-146.
11. Ramírez A., Nielsen J., Ayuga F. Pressure measurements in steel silos with eccentric hoppers. Powder Technology. 2010, 201, 7-20.
12. Couto A., Ruiz A., Aguado P.J. Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions – part I: Description. Computers and Electronics in Agriculture. 2012, 85, 164-173.
13. Gandia R.M., Gomes F.C., Paula W.C.D., Aguado P.J. Evaluation of pressures in slender silos varying hopper angle and silo slenderness. Powder Technology. 2021, 394, 478-495.
14. Wójcik M., Sondej M., Rejowski K., Tejchman J. (2017). Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. Powder Technology, 311, 537-555.
15. Comité Europeo de Normalización. EN 1991-4. Eurocódigo 1 – Acciones en estructuras - parte 4: Silos y depósitos. 2006. Bruselas (Bélgica): CEN.
16. Moya M., Sánchez D., Villar-García J.R. Values for the mechanical properties of wheat, maize and wood pellets for use in silo load calculations involving numerical methods. Agronomy. 2022, 12(6).

Optimización de la geometría de cartelas de rigidez en bases de pilares mediante modelos de elementos finitos

C. Neumeister[1], P. Galletero[2]

[1] Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, ETSIAMB, Universidad de Castilla – La Mancha, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete; carlos.neumeister@uclm.es
[2] Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, ETSIAMB, Universidad de Castilla – La Mancha, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete; pablo.galletero@uclm.es

Abstract: In this paper, a method for the optimization of stiffness gussets in steel base plates is developed. From eight unstiffened base plate tests, about 1100 simulations of anchor plates have been composed with three-dimensional finite element models (FEM), varying the characteristic dimensions of these gussets for each test such as the plate edge (h) and the joint with the column (H), all of them related to the plate flight (a) and applying axial loads and shear loads in a monotonic way to each of them. The moment distributions obtained in relation to the joint rotations are correlated to obtain an analytical method for calculating the gusset typology in which the moment of the plate and the applied axial load (eccentricity) are integrated. The results show how the variation of the dimension at the edge of the plate (h) does not lead to an increase of the ultimate strength or moment ($M_{j,Rd}$) in the plate, while the zone connected to the column (H) helps to optimize the connection.

Palabras clave: chapa, elementos finitos, giros, momentos últimos, tipología

1. Introducción

Las placas de base son uno de los elementos estructurales menos estudiados en la ingeniería [1], aun siendo uno de los componentes más importantes para la conexión entre la base de los pilares de las estructuras metálicas y su cimentación [2]. Son piezas estructurales esenciales que contribuyen a la estabilidad y seguridad en edificios y otras estructuras.

La función primordial de las placas de anclaje es distribuir, de forma lo más uniforme posible, los esfuerzos que provienen de la base de los pórticos hacia la cimentación de hormigón que se encuentra inmediatamente por debajo de estas placas [3], evitando así que las columnas se deformen o vuelquen. Cuando estas cargas o solicitaciones son muy grandes y revierten en la aparición de grandes momentos en la base de los pilares, es necesario incluir otro elemento como es el rigidizador para así mantener el grosor de las placas bajo un mínimo aceptable junto con una eficacia de funcionamiento óptima. Esta solución es clave para diversas construcciones en la industria [4].

Debido a la escasez de estudios donde las cartelas toman protagonismo, se deben hacer estudios, experimentales o analíticos, para ver cómo interactúan estas chapas con el resto de las partes de la unión a la cimentación. Una de las formas más económicas de realizar estos estudios es a partir de modelos de elementos finitos (MEF).

Desde que se iniciaron los estudios con MEF [5] con modelos 3D o piezas tipo ladrillo (*brick*), diversos autores [6, 7, 8] han utilizado estas herramientas para el estudio de las bases de pilares hasta llegar a la actualidad [9], donde también se utilizan para la validación de ensayos en multitud de disciplinas.

En este estudio, a partir de modelos experimentales [10] que se utilizarán como validación, se realizaran diversas simulaciones con MEF en las que se han incluido unas cartelas de rigidez variando su geometría en las dos dimensiones más características que pueden representar a una cartela de rigidez, como son la altura en el borde de la placa de base y la dimensión que puede llegar a alcanzar esta cartela en la unión con el soporte. Tras la comparación de los momentos últimos que se alcanzan respecto a situaciones "sin cartela", se realizaran diversas correlaciones hasta alcanzar una solución que optimiza la morfología de la cartela y, con ello, maximiza la resistencia de la unión frente a las fuerzas de tipo axial y de momentos flectores.

2. Materiales y métodos

Stamatopoulos y Ermopoulos [10] realizaron ocho ensayos experimentales y una investigación analítica de las bases de columnas. Posteriormente simularon estos modelos MEF correspondientes a estos ensayos y, junto a los datos obtenidos en laboratorio, consiguieron una correlación de un modelo matemático que relaciona el momento y la rotación (M-φ) de la base de la columna.

En el presente estudio se tomarán como base estos estudios experimentales para la simulación de los modelos en MEF y, posteriormente, se modelarán las mismas placas de base añadiendo a cada caso cartelas de rigidización con distinta topología, variando las distintas alturas características de una placa de base, como son las alturas en borde de placa y las alturas en la zona del pilar, todas estas referidas al vuelo de la placa desde el pilar a borde de placa base.

Se realizarán ajustes estadísticos para la posterior selección de las dimensiones de los rigidizadores que puedan ser más idóneos a la hora de su colocación en una placa de base.

2.1. Ensayo experimental

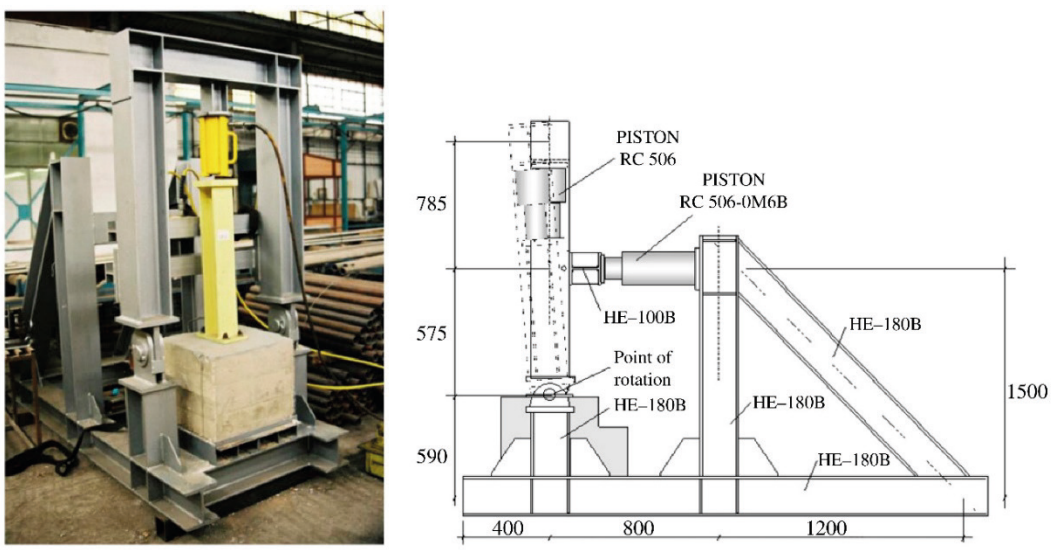
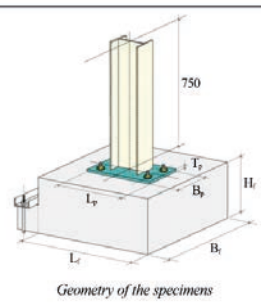


Figura 8. Configuración del pórtico para la realización de los ensayos [10]

Los modelos experimentales [10] se analizaron mediante una prensa, según la *Figura 8*, con un pistón para provocar fuerza en el eje axial al soporte y otro pistón para simular fuerza en cortante, pudiendo de esa forma generar un momento flector en la base de la unión. La magnitud de fuerza en axial se concreta en cuatro axiales N_{Ed} (0 kN, 99,26 kN, 198,52 kN y 297,78 kN).

Variando los materiales a utilizar y las dimensiones de espesor de placa y diámetro de perno de acuerdo con la *Tabla 6*, se realizaron ocho ensayos sin cartelas de rigidez. La geometría de estos ensayos y la resistencia máxima de cada elemento se refleja en la *Figura 9*. La resistencia media de los hormigones utilizados en la parte de cimentación fue de 30 N/mm².

Tabla 6. Dimensiones y materiales de los ensayos en laboratorio [10]

No	Column	Base plate		Anchor rods			Concrete	
		$L_p \times B_p \times T_p$ (mm)	f_{yp} (kN/cm^2)	Type	f_{ub} (kN/cm^2)	A_s (mm^2)	$L_f \times B_f \times H_f$ (mm)	
SP1	HEB-120	240 × 140 × 16	41.60	M12	53.65	84.3	500 × 500 × 400	
P2	≫	240 × 140 × 12	32.00	M16	84.65	157	≫	
P3	≫	240 × 140 × 16	27.67	M12	53.65	84.3	≫	
P4	≫	240 × 140 × 12	42.95	M16	84.65	157	≫	
P5	≫	240 × 140 × 16	27.67	M16	84.65	157	≫	
P6	≫	240 × 140 × 16	41.60	M16	84.65	157	≫	
P7	≫	240 × 140 × 12	32.00	M12	53.65	84.3	≫	
P8	≫	240 × 140 × 12	42.95	M12	53.65	84.3	≫	

Los autores de los ensayos [10] simularon las uniones con MEF y validaron su propuesta de acuerdo con los datos obtenidos a través de las lecturas de galgas situadas en tracción y en compresión, obteniendo a su vez unos momentos últimos de la unión ($M_{j,Rd}$) mediante el método de los componentes [11].

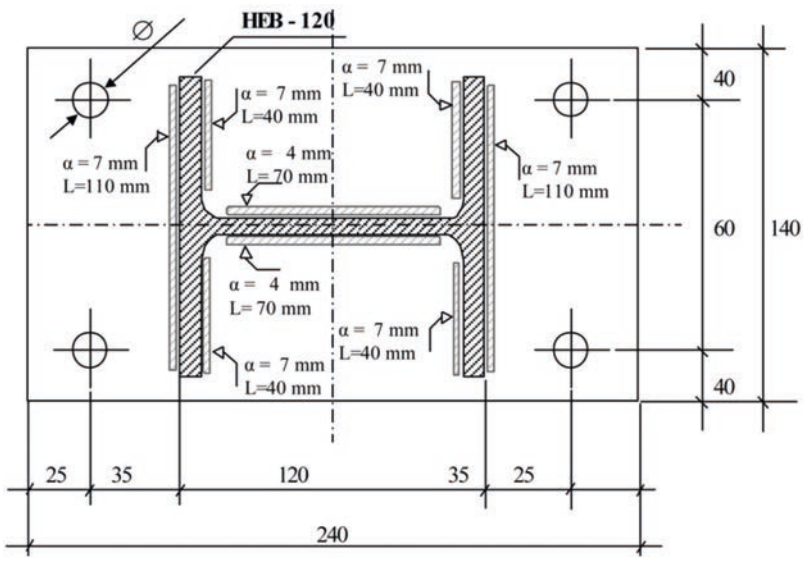


Figura 9. Geometría de las placas de base estudiadas, con dimensiones en mm [10]

2.2. Modelo de elementos finitos

Los modelos de uniones sin cartelas se han modelizado mediante la aplicación Ansys Mechanical (*Figura 10*). La unión en su conjunto se dividirá por su eje de simetría para aligerar el coste computacional y de tiempo. Se han adoptado elementos tipo hexaedro con 8 nodos para todos los elementos que conforman la unión. El tipo de material utilizado es *Solid185* por su versatilidad en la utilización de plasticidad, rigidización por tensión y deformaciones, y con la posibilidad de lecturas de los 8 nodos en sus tres grados de libertad. Los contactos se calcularon con la formulación Aumentada de Lagrange y con el tipo de contacto soldado (placa-soporte y placa-soporte-rigidizador) y contacto con fricción (placa-zapata, pernos-zapata y pernos-placa).

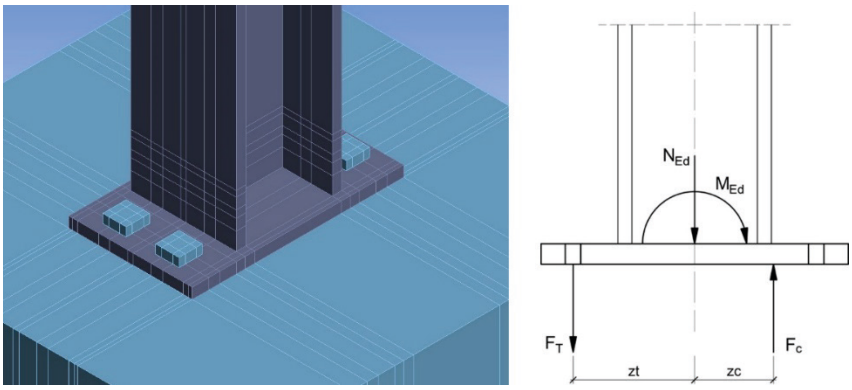


Figura 10. Modelado de la unión en Ansys (izqda.) y esquema de fuerzas más importantes (dcha.)

En cada modelo, se aplicaron cuatro presiones superficiales en la cabeza del soporte para la simulación de la carga que produce el pistón con valores de 0 MPa, 30,28 MPa, 60,56 MPa y 90,84 MPa de forma monotónica, aplicando en primer lugar el axial y posteriormente se aplica, a 575 mm de altura del soporte, una carga lateral. Esta carga estará dividida en 3 pasos de carga, con un máximo de 100 subpasos en cada paso. Para evitar cualquier problema de estabilidad se limita el movimiento en la base de la unión y se limitará los movimientos laterales para evitar la aparición de momentos en direcciones que no son objeto del estudio. El análisis de las simulaciones se ha realizado mediante modelos no lineales según el Método de Newton-Raphson para poder emular de forma lo más realista posible el comportamiento de los distintos materiales que se han utilizado en las partes de la unión a través de resolución de iteraciones.

Los datos obtenidos de las distintas simulaciones fueron las reacciones debidas al axial (N_{Ed}) y momento (M_{Ed}) en la unión de soporte con placa de base para la validación de las cargas aplicadas en el mismo; las reacciones de compresión (F_C) debidas a las fricciones ocurridas en el contacto entre la placa y el hormigón, a la vez que el área de ese contacto (A_C) para comprobar las tensiones que se producen en la placa debidas a la resistencia del hormigón de la cimentación, como también se obtuvo el momento (M_C) respecto a centro de placa de base debido a esa fuerza de compresión y así localizar el punto de aplicación del bloque de compresiones; las reacciones de tracción en pernos de anclaje (F_T); los giros que se producen en la placa (φ) en radianes, en el centro de la placa, para la obtención de las rotaciones a lo largo de toda la simulación. Al realizar un equilibrio de fuerzas, en el paso de carga donde alguno de los elementos supera la resistencia máxima permitida, se obtendrá el momento último ($M_{j,Rd}$) de la unión.

2.3. Validación del modelo de elementos finitos

Las condiciones de contorno y parámetros que se aplican en Ansys pueden hacer que la solución sea diferente. Se modificó las variables más comunes en los modelos de elementos finitos hasta que se ajustó la curva momento-rotación (*Figura 11-izqda*), de la forma más cercana posible a los valores que los autores [10] obtuvieron en el ensayo de laboratorio mediante las galgas de deformación. Posteriormente se correlacionan los momentos obtenidos por los autores con las soluciones de las simulaciones en ANSYS (*Figura 11-dcha*), dando como resultado un ajuste con una R 0,9983, lo que denota la gran exactitud de los modelos MEF simulados respecto a ensayos en laboratorio. Respecto a la relación momento-giro, la deformación producida en MEF también muestra una gran similitud a los valores dados por las galgas de deformación.

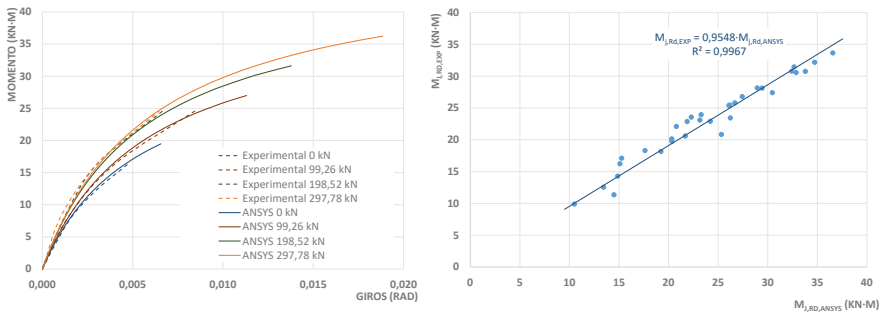


Figura 11. Ejemplo de ajuste de uno de los ensayos (Ensayo 5), según el momento-rotación experimental de los autores [10] y ANSYS (izqda.); ajuste de los momentos últimos, $M_{j,Rd}$, de todas las placas de base sin cartelas (dcha.)

2.4. Cartelas de rigidez

Tras la validación de los modelos de placas sin cartelas, se sigue el mismo procedimiento, pero añadiendo a esos modelos unos rigidizadores con una configuración distinta. Esta variación de geometría vendrá dada por tres dimensiones fundamentales (*Figura 12-dcha*): la altura de la cartela en el borde la placa, (*h*), en la que se han utilizado relaciones h/a desde 0,25 hasta una relación cercana a la dimensión *H*; la altura de la cartela en la zona del pilar (*H*), utilizando medidas donde la relación *H/a* varía desde 0,75 hasta 9,5 que es una dimensión totalmente inusual y utilizada exclusivamente para poder realizar ajustes con los datos obtenidos; el espesor de estas cartelas (t_r), contando con dos espesores concretos como son 3 mm y 6 mm. La resistencia máxima del acero impuesta en las cartelas es la misma que tienen las placas de base.

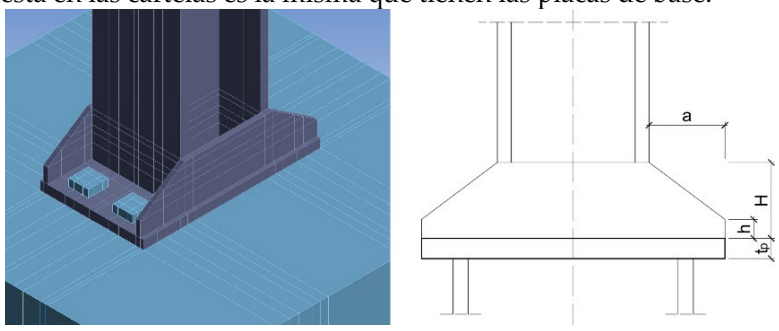


Figura 12. Modelo 3D (izqda.) y medidas características utilizadas en los modelos de placas con cartelas (dcha)

Se han procedido a realizar cerca de 672 simulaciones utilizando combinaciones de *H/a* y *h/a* (Tabla 7), con un incremento porcentual en la dimensión de cada una de las relaciones, para obtener todos los momentos últimos ($M_{j,Rd}$) y poder observar su variación en las uniones. Una vez optimizada la variable *h/a*, se procederá a optimizar la relación *H/a*, analizando cómo afecta la colocación de esa dimensión de cartela en cada momento último.

Tabla 7. Combinación de dimensiones de las cartelas utilizadas en las simulaciones de ANSYS

H/a	h/a	H/a	h/a
0,75	0,25-0,50-0,75	3,00	0,25-0,50-0,75-1,00-1,25-1,50-1,75-2,00-2,50-3,00
1,00	0,25-0,50-0,75-1,00	5,00	0,25-0,50-0,75-1,00-1,25-1,50-1,75-2,00-2,50-3,00-4,00-5,00
1,50	0,25-0,50-0,75-1,00-1,25-1,50	9,50	0,25-0,50-0,75-1,00-1,25-1,50-1,75-2,00-2,50-3,00-4,00-5,00-9,50
2,00	0,25-0,50-0,75-1,00-1,25-1,50-1,75-2,00		

Para proceder a un estudio lo más detallado posible, se obtuvieron las gráficas momento-rotación (M-φ) de todas y cada una de las simulaciones y, en cada tipo de unión según tipo de carga axial (N_{Ed}) se acotaron todas las distribuciones a un ángulo de rotación mínimo en ese conjunto de ensayos (*Figura 13-izqda.*) para así, tener una referencia comparable en todos los modelos acerca del incremento de momento (M_j) en una rotación concreta (*Figura 13-dcha.*).

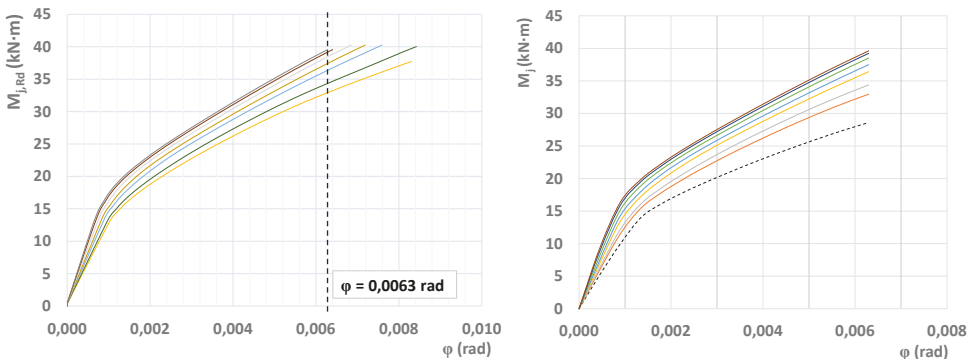


Figura 13. Momento - ángulo de rotación para el ensayo 5 con todas las variaciones de H/a (izqda.) para 297,78 kN; "normalización" de ángulos para el mismo ensayo (dcha.)

Siguiendo el método propuesto por [12], y mediante ecuaciones de ajuste, se procederá a la selección de una H/a – para cada una de las simulaciones – que provoque un aumento considerable en el incremento de momento último respecto a una unión que carezca de cartelas. A partir de distribuciones no lineales y posterior análisis estadístico, se expondrá una solución viable para la elección de la morfología de la cartela.

3. Resultados y discusión

Los resultados en la variación de la relación *h/a* en las cartelas son diferentes en cuanto a comportamiento respecto a la relación *H/a*. Según varíen los distintos resultados en las simulaciones se podrán discriminar unas dimensiones u otras hasta llegar a la optimización correcta de las cartelas y conseguir el máximo aprovechamiento de la resistencia de la unión. Este aprovechamiento de resistencia se observa en el incremento progresivo que se da en el momento último ($M_{j,Rd}$) a medida que las cartelas varían sus dimensiones respecto a una situación donde la placa carece de rigidizadores.

3.1. Variación según la dimensión h

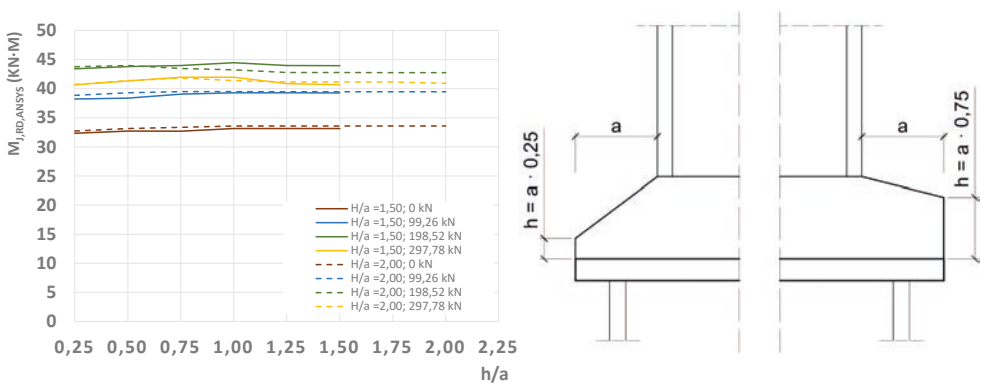


Figura 14. Variación de momento $M_{j,Rd}$ según relación h/a en el ensayo 5, para dos relaciones de H/a en las cartelas (izqda.) y esquema gráfico de variación de h (dcha.)

Las simulaciones realizadas variando la dimensión *h* en relación al vuelo de la cartela *a* muestran un valor casi constante en los resultados de los momentos últimos ($M_{j,Rd}$) según se aumenta la relación *h/a* (*Figura 14*) lo que implica que el aumento de esta dimensión no provoca un aumento de momento último significativo respecto a una cartela con dimensiones h/a mínimas y, por lo tanto, un aumento de resistencia de la placa. La gran variación producida en los momentos últimos al poner una mínima dimensión de h (h/a=0,25), sobre todo por motivos constructivos, es más que suficiente dado el mínimo incremento del momento último en situaciones de placas con h/a superiores respecto a una situación con una h/a inferior.

3.2. Variación según la dimensión H

Una vez realizadas las simulaciones variando la relación H/a, y con h/a=0,25, se calculan los incrementos de momento último ($M_{j,Rd}$) respecto a la placa sin cartela para cada modelo. Representando los porcentajes de incremento de momento "con cartela - sin cartela" frente a la variable H/a (*Figura 15*), se observa dos claras tendencias en la curva. Siguiendo el método propuesto por [12] mediante ajuste de los puntos obtenidos, se proponen dos rectas de ajuste (una por cada tendencia de la curva) que confluyen en un punto {H/a , ΔM}, a partir del cual el incremento de momento último resistente puede considerarse despreciable.

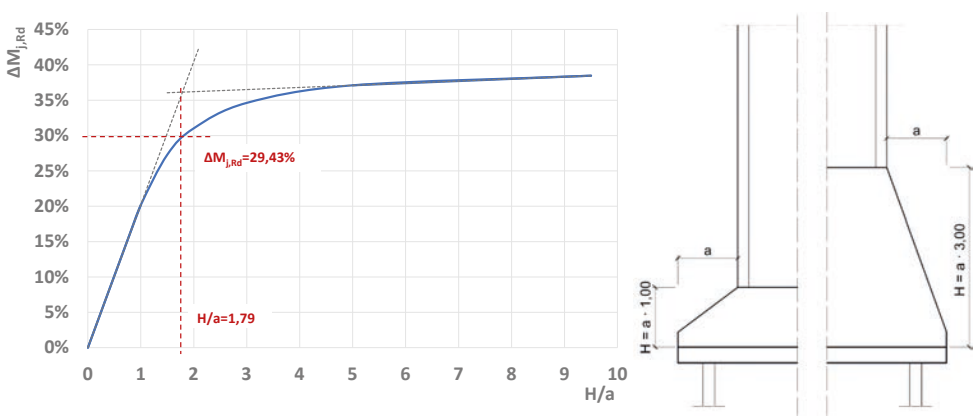


Figura 15. Ajuste de la relación H/a para el ensayo 5, con cara axial de 297,78 kN, y su incremento de momento respecto al ensayo sin cartelas (izqda.) y esquema gráfico de variación de H (dcha.)

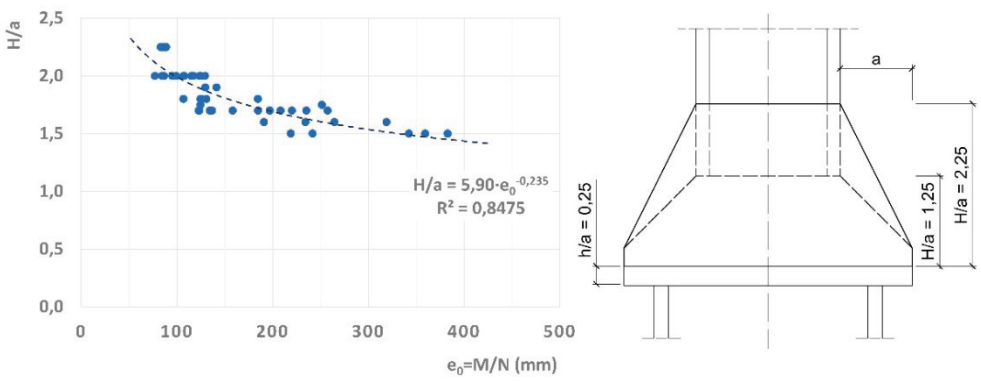


Figura 16. Ajuste de la relación H/a de las cartelas según la excentricidad de las reacciones que se producen en la placa de base (izqda.) y su resultado final (dcha.)

Las variaciones de la relación H/a obtenidas mediante este método, en todos los modelos, se correlacionan bastante bien cuando se enfrentan a las excentricidades de las reacciones

producidas en la base de los pilares (*Figura 16*). A medida que la excentricidad (e_0) de la carga producida por la relación $M_{j,Rd}/N_{Ed}$ aumenta, las tensiones en la zona de compresión se van desplazando cada vez más al extremo de la placa y disminuye la reacción de compresión bajo esta. Esto hace que las cartelas de "perfil bajo", con bajas relaciones H/a, consigan el efecto deseado de aumento del momento para las mismas cargas que se aplican a una unión sin rigidizar.

A partir de estos valores, se consigue una curva de ajuste con una R de 0,9206 donde los valores de la relación H/a están en un rango de 1,25 hasta 2,25, cuando las excentricidades se encuentran entra 400 mm y 75 mm respectivamente. Esta curva de ajuste puede expresarse de acuerdo con la ecuación siguiente, obteniendo de una forma sencilla una geometría de cartela que incrementará siempre los momentos últimos resistentes de la placa.

$$\frac{H}{a} = 5{,}90 \cdot e_0^{-0{,}235}$$

4. Conclusiones

Las placas de base son un elemento importante en el conjunto de la estructura metálica y por ello se debe realizar un dimensionamiento lo más minucioso posible. Para casos donde las placas necesiten aumentar su grosor por las altas solicitaciones, se requiere de la colocación de cartelas de rigidez que deberán tener una geometría óptima. El aumento en la dimensión en el borde la placa conlleva incrementos de momentos últimos, muy constantes, respecto a placas sin cartela, independientemente del valor de *h*/*a*, por lo que la dimensión *h* se limitaría exclusivamente a un mínimo constructivo como es *h*/*a* = 0,25. Las variaciones de la altura de cartela en la unión con el pilar ayudan a incrementar los momentos que resiste la placa, mostrando un incremento apreciable de los momentos hasta una relación H/a=2,25 y despreciable a partir de este valor.

Referencias

17. Wald F. Column Base Connections, A Comprehensive State of the Art in. 1993, Prague, p. 65
18. Razzaghi J., Khoshbakht A. Numerical evaluation of column base rigidity, International Journal of Steel Structures. Korean Society of Steel Construction. 2015, vol. 15 no 1, pp. 39–49.
19. O.S. Abejide. Effectiveness of Base Plate Thickness Design Criteria in Steel Columns, Research Journal of Applied Sciences. 2007, vol. 2 no 12, pp. 1207–1217.
20. MacGinley T. J., Ang T. C. Structural steelwork: design to limit state theory. 1992. Oxford (England) Boston.
21. Krishnamurthy N. Modelling and Prediction of Steel Bolted Connection Behavior. Pergamon Press Ltd. 1980.
22. Wald F., Obata M., Matsuura S., Goto Y. Flexible Baseplate Behaviour using FE Strip Analysis, in Acta Polytechnic CTU. 1993. Vol. 33, No.1. Prague, pp. 83–98.
23. Bursi O. S., Jaspart J. P. Benchmarks for Finite Element Modelling of Bolted Steel Connections.1997. J. Construct. Steel Res.
24. Thambiratnam D. P., Krishnamurthy N. Computer Analysis of Column Base Plates. Compurters & Structrures. 1989.
25. da Silva Seco L., Couchaux M., Hjiaj M., Costa Neves L. Column base plates under biaxial bending moment and axial force. Engineering Structures. Elsevier Ltd. 2021, vol. 249.
26. Stamatopoulos G. N., Ermopoulos J. C. Experimental and analytical investigation of steel column bases. Journal of Constructional Steel Research. 2011, vol. 67 no 9, pp. 1341–1357.
27. CEN. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.8: Design of joints, European Comitee for Standardization. 2013, edited by AENOR. Bruselas, Bélgica.
28. Ermopoulos J. Ch., Stamatopoulos G. N. Mathematical modelling of column base plate connections, Journal of Constructional Steel Research. Elsevier. 1996, vol. 36 no 2, pp. 79–100.

29. Estudio de la mejora de la durabilidad de hormigones con óxido de grafeno como revestimiento superficial
30. Andrea Antolín-Rodríguez[1], Daniel Merino-Maldonado[1], J. Miguel González-Domínguez[2], María Fernández-Raga[3], Andrés Juan-Valdés[1], Julia García-González[1].
31. [1]Escuela de Ingeniería Agraria y Forestal, Universidad de León; aantr@unileon.es; dmerm@unileon.es; andres.juan@unileon.es; julia.garcia@unileon.es.
32. [2]Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC), Grupo de Nanoestructuras y Nanotecnología del Carbono (G-CNN); jmgonzalez@icb.csic.es
33. [3] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de León; maria.raga@unileon.es
34.
35. **Abstract:** The use of nanocoatings is one of the most innovative ideas proposed to extend the useful life of construction and building materials, as the increasing and continuous use of natural resources leads to the search for new materials that increase the useful life of building materials and that are both efficient and sustainable. In this sense, this study focuses on the evaluation of the protective effect of repair agents, such as graphene oxide. Conventional concrete, which has been superficially coated with graphene oxide obtained from the exfoliation of graphitic oxide in water, has been tested. The results showed that the water absorption of the concrete was significantly reduced, thus improving its durability properties.
36.
37. **Palabras clave:** absorción de agua, nanorecubrimiento, óxido de grafeno (GO), nanoreparación
38.
39. 1. Introducción
40. Proteger las estructuras de hormigón de la intemperie producida por las agresiones climáticas es una preocupación, que requiere de soluciones para poder mantener su valor funcional. A pesar de la buena durabilidad que presenta el hormigón, es inevitable que se produzca la aparición de fisuras y grietas provocadas por factores tales como la fatiga, la sobrecarga, cambios de uso, etc. Nace así la necesidad de reparación y mantenimiento para preservar las estructuras de hormigón en buen estado y evitar la pérdida de durabilidad.
41. Actualmente el campo de investigación más importante en la tecnología de tratamiento de superficies para la conservación de materiales de construcción es el uso de nanomateriales. Diversos trabajos de investigación [1–8] estudian el efecto de estos materiales como tratamientos de reparación superficial en el hormigón. Se ha comprobado que algunos nanomateriales mejoran su durabilidad, evitando su deterioro y alargado su vida útil. Esta mejora se centra en conseguir en algunos casos disminuir la difusión de la humedad o la permeabilidad del agua, y en otros en conseguir un autosellado de las grietas. Las mejoras producidas son evaluadas en la mayoría de los casos mediante ensayos de absorción de agua, que arrojan resultados muy prometedores, como puede ser el caso de Franzoni et al. [9] quienes consiguieron una mejora de la resistencia a la absorción de agua que osciló entre el 17% y el 383% empleando una dispersión de nanosílice como nanorecubrimiento.
42. En este trabajo se indican los resultados iniciales de un estudio realizado con óxido de grafeno (GO), aplicado como tratamiento en la superficie del hormigón para mejorar su durabilidad. Se espera que una simple suspensión acuosa de GO se revele como una herramienta con alto potencial de protección para las superficies del hormigón, así como mejorar la durabilidad de este.
43. 2. Materiales y métodos

En este estudio el tipo de hormigón a ensayar es convencional (HC). Se realizan varias probetas las cuales son sometidas a un tratamiento superficial con el objetivo de evaluar el efecto del óxido de grafeno (GO) como revestimiento en la durabilidad del hormigón. El material de recubrimiento se obtuvo mediante la exfoliación del óxido grafítico en agua tras la aplicación de ultrasonidos suaves, capaces de revestir las posibles fisuras incipientes y asegurar la consolidación entre las partículas que constituyen las capas superficiales del hormigón. Se refiere a tratamientos "nanoreparadores", conocidos comúnmente en inglés como *nanocoatings*.

Toda la información experimental acerca de la obtención del óxido de grafeno, así como su caracterización completa se recoge en la publicación de González-Campelo et al. [10]. En la Figura 1 se puede observar un ejemplo de imagen de microscopía electrónica de transmisión de óxido de grafeno (TEM); en la que se demuestra la naturaleza delgada y bidimensional que presenta este material, así como su adaptabilidad física y flexibilidad, a través de sus arrugas y pliegues. Por lo tanto, el óxido de grafeno se puede reafirmar como material muy adecuado a nivel microscópico como recubrimiento protector de superficies.

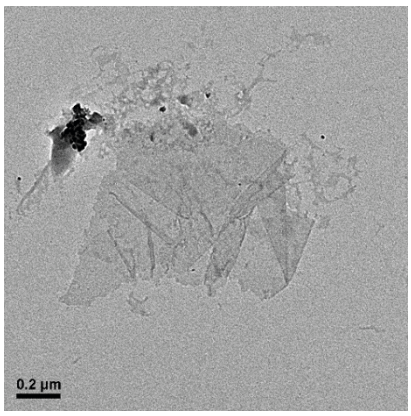


Figura 17. Imagen TEM de una escama de óxido de grafeno. Tomada con un microscopio JEOL-200FXII trabajando a 200 kV, con una resolución punto a punto de 0,28 nm.

En la elaboración de HC se emplearon los siguientes componentes: cemento de escoria de alto horno tipo CEM III/A 42,5 N/SR, agua del grifo y áridos rodados de naturaleza silícea; grava (4/12,5 mm) como árido grueso y arena (0/4 mm) como árido fino. Todos los materiales empleados en la elaboración del hormigón cumplen con las especificaciones establecidas en las normas españolas de referencia [11–14]. En la tabla 1 se indica la dosificación utilizada para la elaboración del hormigón, fijando como parámetros de partida la resistencia característica del hormigón en 25 MPa y la relación A/C en 0,51.

Tabla 8. Dosificación del hormigón

Componentes	Composición (Cantidad/m³)
Agua	198,0 L
Cemento	390,0 kg
Arena	650,5 kg
Grava	1030,7 kg

54. Inicialmente partiendo de probetas cúbicas de 100 mm x 100 mm x 100 mm, se producen mediante el corte con una sierra de diamante los ejemplares de ensayo, que pasan a tener una dimensión de 50 mm x 50 mm x 100 mm. El tratamiento se aplicó sobre la superficie enrasada que corresponde a la cara cuadrada de los ejemplares.
55. El tratamiento superficial consiste en una dispersión de GO que presenta una concentración de 0,5 mg/mL. Antes de la aplicación sobre la superficie del hormigón es necesario que la dispersión de GO se someta a un proceso de sonicación. Posteriormente, la dispersión es pulverizada mediante un aerógrafo sobre la superficie; siempre mediante movimientos horizontales y a una velocidad lenta y constante; controlando en todo momento la cantidad de dispersión depositada sobre la superficie del hormigón (0,052 mL dispersión de GO/cm^2 de superficie). Cada pasaje de tratamiento fue aplicado sobre tres ejemplares.
56. Se probaron seis grupos de ejemplares en función de la cantidad de pasajes de tratamiento sobre la superficie del hormigón; el grupo 1 corresponde a los ejemplares con un pasaje de tratamiento de GO (1-GOP), el grupo 2 corresponde a los ejemplares con dos pasajes de tratamiento de GO (2-GOP), el grupo 3 corresponde a los ejemplares con tres pasajes de tratamiento de GO (3-GOP), el grupo 4 corresponde a los ejemplares con cuatro pasajes de tratamiento de GO (4-GOP), el grupo 5 corresponde a cinco pasajes de tratamiento de GO (5-GOP) y el grupo 6 corresponde al grupo de referencia en el que la superficie de los ejemplares no presenta ningún tratamiento (Control). La tabla 2 muestra toda la información acerca de los tratamientos.
57.
58. **Tabla 9.** Referencia y descripción completa tratamientos

Referencia	Cantidad dispersion GO (mL/cm^2)	Cantidad GO (µg/cm^2)
1-GOP	0,052	26,0
2-GOP	0,104	52,0
3-GOP	0,156	78,0
4-GOP	0,208	104,0
5-GOP	0,260	130,0
Control	0,000	0,0

59.
60. Dos días después de la aplicación de los tratamientos se realizó el ensayo de absorción de una gota de agua para poder evaluar el efecto impermeable del GO sobre la superficie del hormigón. El ensayo consiste en la aplicación de una gota de agua sobre la superficie de hormigón que presenta el tratamiento y registrar el tiempo que tarda en absorber completamente dicha gota la superficie. En la Figura 2 se puede observar las diversas fases características de la prueba. El ensayo es grabado mediante una cámara de video para después poder determinar el tiempo exacto transcurrido desde la aplicación de la gota hasta la completa absorción de la gota por la superficie. Las condiciones ambientales durante el desarrollo del ensayo fueron de una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa de 45 ± 15 %. El incremento de tiempo alcanzado por los ejemplares tratados respecto a los ejemplares sin tratar posibilita cuantificar el efecto sellador que ejerce el óxido de grafeno sobre la superficie del hormigón.
61.
62.
63.
64.
65.
66.

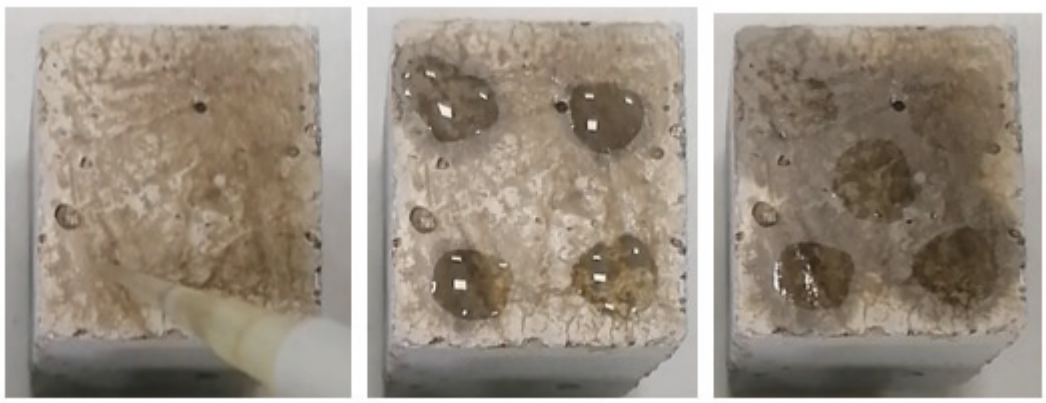


Figura 18. Fases del ensayo de absorción de una gota de agua: a) aplicación de la gota de agua, b) gotas de agua aplicadas sobre la superficie del hormigón, c) aspecto de las gotas en proceso de absorción.

3. Resultados y discusión

El tiempo de absorción de la gota de agua en cada uno de los tratamientos se puede observar en la Figura 3. Los resultados muestran que los ejemplares tratados con el óxido de grafeno son menos permeables que los ejemplares control, que no presentan ningún tipo de tratamiento, y la diferencia es aún más evidente si se analiza el aumento de pasajes de tratamiento de óxido de grafeno. Verificando por lo tanto un efecto positivo del nanorecubrimiento sobre la durabilidad del hormigón.

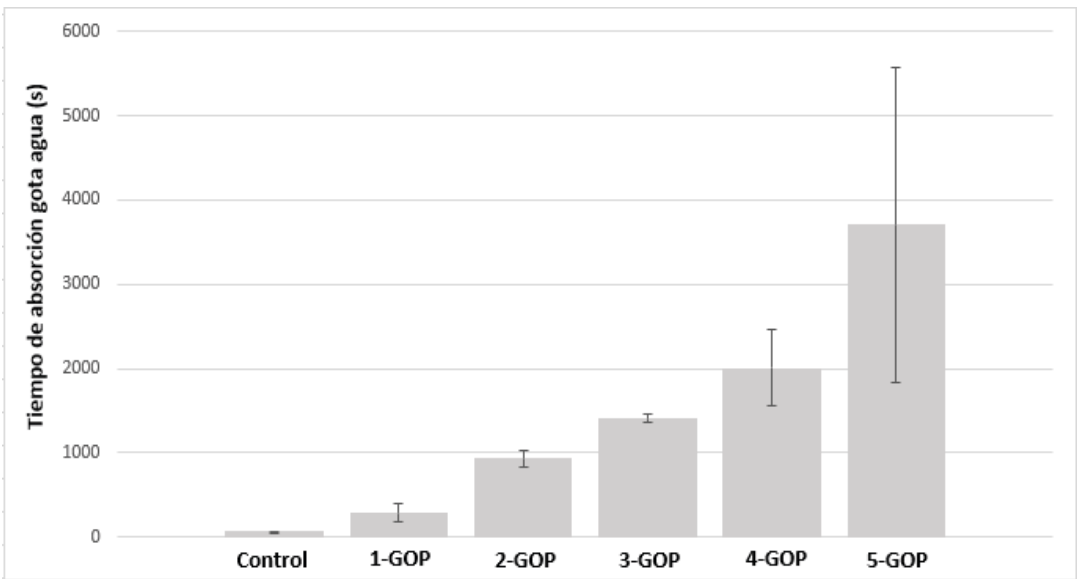


Figura 19. Tiempo de absorción de una gota de agua para los diversos tratamientos

Se puede observar que el tratamiento superficial con óxido de grafeno es eficaz, pues el tiempo de absorción de una gota de agua aumenta. Analizando los tratamientos se observa que a medida que se incrementan los pasajes de tratamiento de GO aumenta el tiempo de absorción; por lo que se propone que se crea una capa protectora sobre la superficie que se incrementa con el aumento de los pasajes de tratamiento. El tratamiento más eficaz es en el que se aplica sobre la superficie de hormigón cinco pasajes de GO.

El uso de óxido de grafeno como tratamiento supone el efecto de impermeabilización de la superficie del hormigón, alcanzando este tratamiento una mejoría notable si se compara con los resultados obtenidos por otros autores, quienes han utilizado otros tipos de nanomateriales como Franzoni et al. [9] en cuya investigación consiguieron aumentar los tiempos de absorción hasta un 17% con la aplicación de una dispersión de nanosílice o un 383% con la aplicación de una dispersión de nanosílice con una pequeña adición de silicato de sodio. En esta línea, en este estudio se ha conseguido mejorar los resultados de absorción de agua, llegándose a incrementar el tiempo empleado de absorción más de 324 veces respecto al empleado en las muestras control, con tan solo un pasaje de tratamiento de GO. Estudios posteriores conseguirán señalar si efectivamente el óxido de grafeno puede utilizarse como tratamiento superficial del hormigón con seguridad y garantías de mejorar de la durabilidad de estos.

4. Conclusiones

Un único tratamiento superficial con óxido de grafeno mejora significativamente el tiempo de absorción de una gota de agua sobre la superficie del hormigón, lo que supone una mejora de la durabilidad del mismo, dejando en evidencia el efecto reparador del GO.

El GO se propone como nanorecubrimiento gracias a su eficacia en la protección y prevención contra la entrada de sustancias, y al aumento de la durabilidad de las estructuras de hormigón. Si bien es verdad, que es necesario realizar un estudio más exhaustivo de este material.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Junta de Castilla y León a través de las Ayudas para financiar la contratación predoctoral de personal investigador, cofinanciada por el Fondo Social Europeo y resultas en la ORDEN EDU/875/2021 y en la ORDEN EDU/601/2020. También se agradece al Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) y a la Agencia Española de Investigación (AEI) el apoyo financiero proporcionado por el proyecto NANOSHIELD (PID2020-120439RA-I00).

Referencias

[1]G. Li, W. Hu, H. Cui, J. Zhou, Long-term effectiveness of carbonation resistance of concrete treated with nano-SiO2 modified polymer coatings, Constr Build Mater. 201 (2019) 623–630. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.004.

[2]G. Fajardo, A. Cruz-López, D. Cruz-Moreno, P. Valdez, G. Torres, R. Zanella, Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cement-based materials, Constr Build Mater. 76 (2015) 158–167. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.11.054.

[3]L. Shi, J. Liu, J. Liu, Effect of polymer coating on the properties of surface layer concrete, Procedia Eng. 27 (2012) 291–300. https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.12.455.

[4]K. Xia, Y. Gu, L. Jiang, M. Guo, L. Chen, F. Hu, Carbonation resistance of surface protective materials modified with hybrid nanosio2, Coatings. 11 (2021) 1–13. https://doi.org/10.3390/COATINGS11030269.

[5] A. Antolín-Rodríguez, D. Merino-Maldonado, Á. Rodríguez-González, M. Fernández-Raga, J.M. González-Domínguez, A. Juan-Valdés, J. García-González, Statistical Study of the Effectiveness of Surface Application of Graphene Oxide as a Coating for Concrete Protection, Coatings. 13 (2023) 213. https://doi.org/10.3390/coatings13010213.

[6]G. Li, Y. Ding, T. Gao, Y. Qin, Y. Lv, K. Wang, Chloride resistance of concrete containing nanoparticle-modified polymer cementitious coatings, Constr Build Mater. 299 (2021) 123736. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123736.

89. [7]G. Li, H. Cui, J. Zhou, W. Hu, Improvements of Nano-TiO 2 on the Long-Term Chloride Resistance of Concrete with Polymer Coatings, (2019). https://doi.org/10.3390/coatings9050323.
90. [8]D. Hou, C. Wu, B. Yin, X. Hua, H. Xu, X. Wang, S. Li, Y. Zhou, Z. Jin, W. Xu, H. Lu, Investigation of composite silane emulsion modified by in-situ functionalized graphene oxide for cement-based materials, Constr Build Mater. 304 (2021) 124662. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124662.
91. [9]E. Franzoni, B. Pigino, C. Pistolesi, Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments, Cem Concr Compos. 44 (2013) 69–76. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2013.05.008.
92. [10]D. González-Campelo, M. Fernández-Raga, Á. Gómez-Gutiérrez, I. Guerra-Romero, J.M. González-Domínguez, Extraordinary Protective Efficacy of Graphene Oxide over the Stone-Based Cultural Heritage, (2021). https://doi.org/10.1002/admi.202101012.
93. [11]Structural Code; Royal Decree 470/2021, Spanish Ministry of the Presidency, Relations with the Courts and Democratic Memory, Madrid, 2021.
94. [12]EN 197-1. Cement. Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, Belgium, Brussels, 2011.
95. [13] CEN. EN 12620+A1 Aggregates for concrete;, Belgium, Brussels, 2003.
96. [14] CEN. EN 933-1 Tests for Geometrical Properties of Aggregates- Part 1: Determination of Particle Size Distribution - Sieving Method;, Belgium, Brussels, 2012.
97.
98.

Análisis de las cargas de viento transversal por CFD en invernaderos multitunel de cubierta curva.

Rafael Agujetas Ortiz [1], Desirée Rodríguez-Robles [2], José Ramón Villar-García [3] and Pablo Vidal-López [2]

[1] Departmento de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales, Esc. Ing. Industriales de Badajoz, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06006, Badajoz; e-mail: rao@unex.es
[2] Departmento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Esc. Ing. Agrarias de Badajoz, Universidad de Extremadura, Av. Adolfo Suarez s/n, 06071 Badajoz; e-mail: desireerodriguez@unex.es; pvidal@unex.es.
[3] Departmento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Centro Universitario de Plasencia, Universidad de Extremadura, Av. Virgen del Puerto 2 10600 Plasencia; e-mail: jrvillar@unex.es.

Abstract: The design of greenhouses requires careful consideration of site-specific climatic conditions and crop loads, with wind being one of the most significant factors to address. In this study, we assessed wind loads on a multi-tunnel greenhouse structure using two different methods: the Eurocode Standard (UNE EN 13031-1) and computational fluid dynamics (CFD). The comparison revealed some important differences between the two approaches, with CFD simulations uncovering previously unknown details that have implications for agricultural engineering. On the one hand, suction wind loads were noticed in the 0–55° region of the first tunnel and, on the other hand, the 60% reduction of the external pressure coefficients proposed by the standard was not detected in the third tunnel. These findings demonstrate the value of using advanced modeling techniques to optimize greenhouse design for specific climatic conditions.

Palabras clave: Acciones, estructuras, dinámica de fluidos computacional.

1. Introducción

Los invernaderos son estructuras utilizadas para el cultivo y/o protección de plantas en condiciones controladas (es decir, luz, temperatura, humedad y composición del aire) para crear un ambiente de crecimiento favorable.

En Europa, la norma UNE EN 13031-1 [1], conocida como el Eurocódigo 1-1, establece los requisitos para el diseño y construcción de invernaderos de producción comercial, definiendo las cargas verticales permanentes y concentradas características, cargas variables y acciones estructurales impuestas por la producción de cultivos.

En la literatura técnica, las cargas de viento se presentan como una de las principales fuentes de daño y falla de estructuras de invernaderos ligeras [2]. De hecho, como estructuras ligeras ubicadas en la cuenca del Mediterráneo, tanto la carga muerta como la carga de nieve son bajas, mientras que la carga de viento es el factor de diseño predominante. En este sentido, también se debe considerar la acción del viento en estructuras usando el Eurocódigo 1-4,es decir la norma UNE EN 13031-4 [3]. Sin embargo, dado que las recomendaciones de los coeficientes de presión de viento externo en cubiertas curvas son diferentes a las transmitidas por la norma UNE EN 13031-1 [1], se requiere un análisis para evaluar las implicaciones de tal diferencia en el diseño del invernadero.

Es por ello que este trabajo se centra en la investigación de las cargas de viento transversales entre ambas normas mencionadas anteriormente y en la simulación de los coeficientes de presión de viento externo mediante CFD.

2. Materiales y métodos

Con el objeto de definir unas condiciones de trabajo concretas que permitan servir de base para comparar las acciones de norma y CFD se emplea el invernadero de sección transversal definido en la Figura 1, cuya geometría se basa en [2].

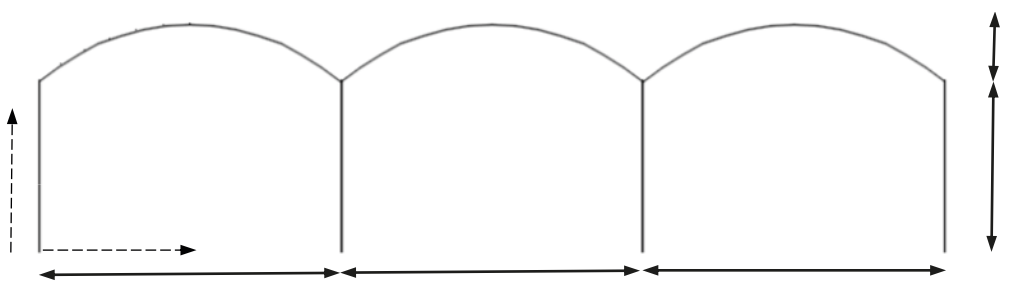


Figura 1. Dimensiones del modelo de invernadero estudiado

La velocidad básica probable del viento alcanza los 23,563 $m \cdot s^{-1}$. Para analizar las diferentes cargas externas contempladas se considera la carga de viento en una categoría de terreno II, es decir, áreas con vegetación baja como hierba y obstáculos aislados (árboles o edificios) con separaciones de al menos 20 alturas de obstáculos.

Los hallazgos aportados por Kim et al. [4], que observaron una buena correlación entre los resultados que surgen de una simulación numérica de CFD y un experimento de túnel de viento, se utilizan como base para la simulación de CFD realizada en este artículo. Basándose en los criterios de sus modelos que emplean el modelo de turbulencia k-ω SST, valores de y+, condiciones de cálculo, etc. se desarrollan los modelos en 2D para el estudio del invernadero denominado "even-span" EV-D22 por Kim et al. [4], y validado en [2] el invernadero multitunel definido previamente.

3. Resultados y discusión

3.1. Acciones de viento según la normativa vigente

La Tabla 1 muestra los diferentes valores de los coeficientes de presión externa (cpe) conformes a la norma UNE EN 13031-1 [1], los cuales dependen de la dirección del viento y el área de la estructura del invernadero sujeta a la acción del viento (es decir, el número de túneles y el ángulo de cubierta) y los valores de carga de viento relacionados. Además, la Figura 2 muestra la carga del viento para las diferentes zonas de la estructura del invernadero.

Tabla 1 Valores de carga de viento en dirección 0º según norma de invernaderos.

Dirección del viento	Parte del invernadero	Angulo (°	Coeficiente externo de presión(cpe)	arga (kN·m-2)
0º	Primer arco	55-70	-1,00	-0,679
	Segundo arco	100- canal	-0,30	-0,204

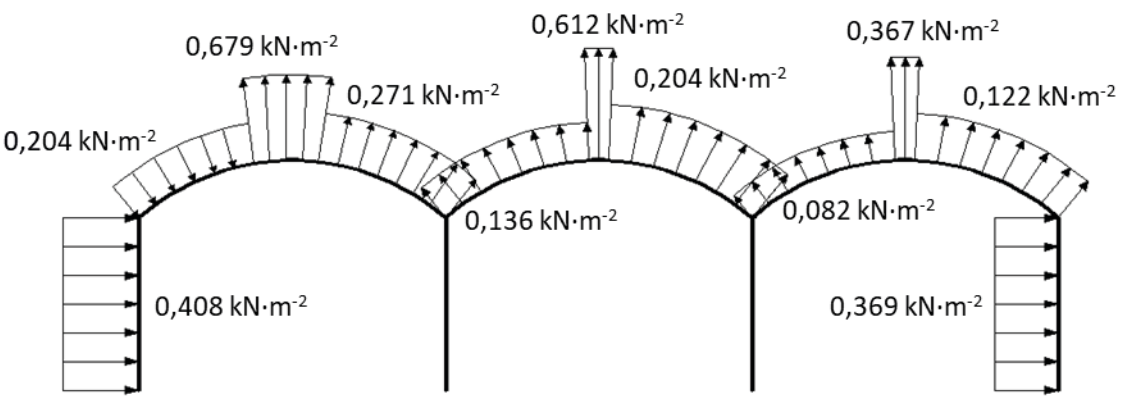


Figura 2. Carga de viento de 0° de acuerdo con UNE-EN 13031-1 [1]

3.2. Simulación CFD para cargas de viento de 0°

En la Figura 3 se muestran los coeficientes de presión externa tanto para el techo como para las fachadas laterales simuladas por CFD. Para el techo, los valores de cp_e se expresan en función de la relación entre la distancia desde el lado de barlovento de la sección transversal de la nave (W) y el ancho del módulo del túnel (W_{arch}).

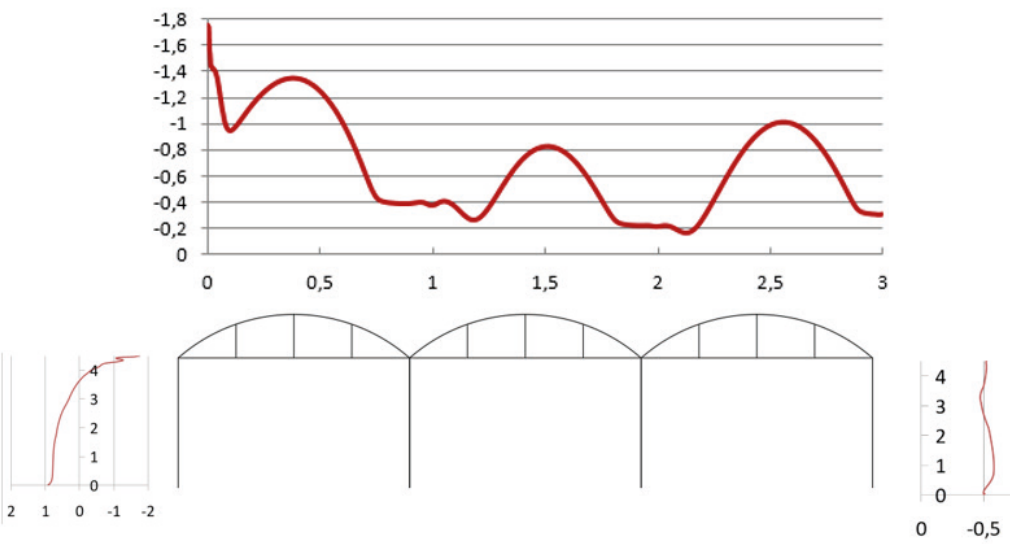


Figura 3. Coeficientes de presión externa del viento determinados mediante CFD para el invernadero de múltiples túneles en fachadas y techo.

Para favorecer las comparaciones, los valores de cpe calculados mediante CFD se discretizaron en las regiones definidas por la norma UNE EN 13031-1 [1], como se puede observar en la Tabla 3. De igual manera, las cargas de viento en la dirección 0º también se definieron para cada región (Tabla 3) y se representaron gráficamente en la Figura 4.

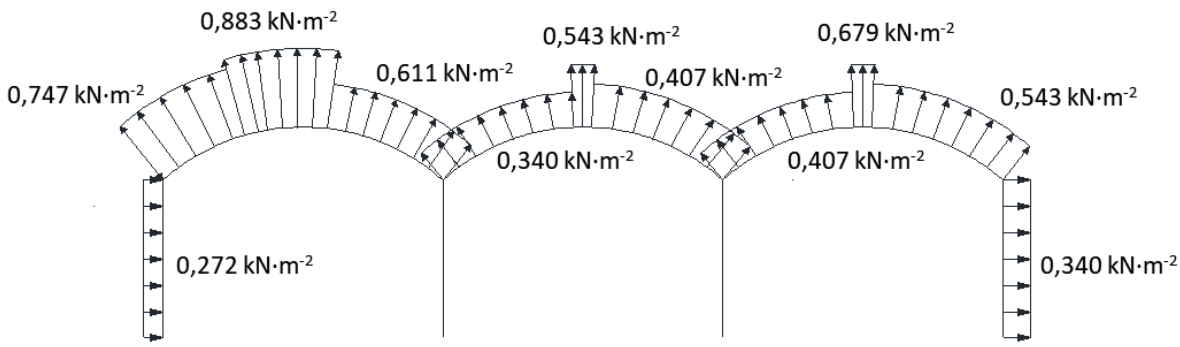


Figura 4. Valores de carga de viento de 0° determinados por CFD

Tabla 2. Valores de carga de viento en dirección 0º estimados mediante CFD.

Dirección del viento	Parte del invernadero	Angulo (º)	Coeficiente externo de presión(cp_e)	Carga (kN·m^{-2})
0º	Primer arco	0-55	-1,20	-0,747
		55-70	-1,30	-0,883
		70-115	-1,30	-0,883
		115-canalón	-0,90	-0,611
	Segundo arco	0-80	-0,50	-0,340
		80-100	-0,80	-0,543
		100- canalón	-0,60	-0,407
	Tercer arco	0-80	-0,60	-0,407
		80-100	-1,00	-0,679
		100- canalón	-0,80	-0,543
	Barlovento	-	0,40	0,272
	Sotavento	-	-0,50	-0,340

La comparación entre los valores de cpe de la norma UNE EN 13031-1 [1] y la simulación CFD propuesta (Tabla 1 y Tabla 2, respectivamente) reveló situaciones similares para las fachadas laterales, independientemente del método de cálculo, Para la fachada expuesta al viento, el modelo CFD arrojó un valor de cpe de 0,4, mientras que la norma UNE EN 13031-1 [1] muestra un valor de cpe de 0,6, En cambio, tanto la norma UNE EN 13031-1 [1] como los resultados CFD mostraron un valor de cpe de -0,5 para la fachada a sotavento,

Sin embargo, se observaron diferencias importantes entre los valores de cpe aportados por la norma UNE EN 13031-1 [1] y la simulación CFD propuesta, específicamente para el primer y tercer túnel, En Maraveas [5], el autor también discute las diferencias encontradas entre la norma

UNE EN 13031-1 [1] y la simulación CFD realizada por Kwon et al, [6] para invernaderos de un solo vano,

La discrepancia más significativa se encontró en el primer punto de contacto entre el viento y el techo, Contrariamente al valor de cpe de 0,3 indicado por la norma UNE EN 13031-1 [1], los resultados CFD apuntaron a un comportamiento significativo de succión en el primer arco con un valor de cpe de -1,2, Este hallazgo está en línea con los valores establecidos en Eurocódigo 1-4 [3] para estructuras de techos abovedados de un solo vano, que también establece un valor de cpe de -1,2 para las condiciones geométricas del invernadero estudiado en este artículo (f/d=0,188 y h/d=0,56), Sin embargo, se debe tener precaución en esta justificación, ya que los resultados de un solo vano y multivanos no pueden extrapolarse debido al efecto de la recirculación del viento en el techo, No obstante, las diferencias causadas por el efecto de recirculación son apenas perceptibles en el área de entrada del viento, En cualquier caso, también se debe tener en cuenta que el Eurocódigo 1-4 [3] establece un ángulo diferente para la primera región del techo, es decir, 55º en lugar de los 45º establecidos en la norma UNE EN 13031-1 [1], que se consideró despreciable,

En este sentido, Blackmore y Tsokri [7] han mencionado previamente las discrepancias entre la norma UNE EN 13031-1 [1] y el Eurocódigo 1-4 [3], Los experimentos en túnel de viento realizados por los autores, quienes llevaron a cabo su investigación en edificios con techos curvos de una sola luz (es decir, con dimensiones que no son comparables a las que se encuentran con frecuencia en invernaderos), también indicaron la existencia de zonas de succión en el punto de contacto del viento con el techo, Además, los autores detectaron un patrón de comportamiento dual para esta zona inicial, es decir, que exhibe tanto presión como succión, lo cual está en línea con la información proporcionada por el Eurocódigo 1-4 [3] para techos a dos aguas, Por lo tanto, también podría ser apropiado considerar estas dos alternativas para invernaderos de varios túneles,

Para la parte superior del arco (55-115º), tanto la norma UNE EN 13031-1 [1] como la simulación señalaron coeficientes negativos de -1 y -1,3, respectivamente, De manera similar, también se detectó succión en la región restante del primer arco, La simulación alcanzó un valor de cpe de -0,9 en comparación con el cpe de -0,4 establecido en la norma UNE EN 13031-1 [1], A excepción de la región de 80-100º del segundo túnel, se observó una tendencia similar en todo el techo del invernadero con valores de cpe mayores que surgen de la simulación, Este patrón fue particularmente evidente para el tercer túnel, ya que la norma UNE EN 13031-1 [1] establece estos valores como una reducción del 60% de los que ocurren en el segundo túnel, Según los resultados de la simulación CFD, tal enfoque parece cuestionable ya que se detectaron aumentos en los valores de cpe en comparación con los del segundo túnel, En este sentido, la simulación realizada por Kim et al, [8] también obtuvo valores de cpe más cercanos a los del túnel central,

Como se esperaba, el segundo y tercer túneles exhibieron efectos de succión en toda la longitud de los arcos, Además, independientemente del método de cálculo, la máxima succión se encontró en la región de la corona (80-110º) del arco, A pesar de las diferencias numéricas, tanto la norma UNE EN 13031-1 [1] como la simulación resultaron en desarrollos de cpe similares a través del segundo y tercer túneles,

4, Conclusiones

En este trabajo se llevó a cabo la evaluación de la carga de viento aplicada a la estructura de un invernadero de múltiples vanos mediante el enfoque de la dinámica de fluidos computacional, Las principales conclusiones extraídas son:

Las cargas de viento que afectan a un invernadero de múltiples vanos como el definido en este trabajo de investigación fueron simuladas numéricamente mediante CFD, En este sentido, se demostró que un invernadero compuesto por tres túneles era de interés desde un punto de vista

científico, ya que esta geometría permitía capturar las diferencias entre los arcos en las cargas de viento, así como los efectos de las cargas en el modo de pandeo de la estructura,

Para las fachadas de la estructura del invernadero, la consideración de la carga de viento en la dirección de 0º condujo a resultados similares a los de la correspondiente acción del viento establecida en UNE EN 13031-1 [1], No obstante, se detectaron discrepancias significativas para los valores de cpe en los arcos del primer y tercer túnel,

En contraposición a la UNE EN 13031-1 [1], las cargas de viento de CFD dieron lugar a efectos de succión en la zona inicial de viento del primer túnel de un invernadero de múltiples vanos, En este sentido, parece apropiado considerar tanto los efectos de presión como de succión para esta región (0-55º) para analizar invernaderos de múltiples túneles con este tipo de cargas, lo cual también ha sido respaldado por las regulaciones del Eurocódigo 1-4 [3] y los resultados encontrados en la literatura,

En cuanto al tercer túnel, la norma UNE EN 13031-1 [1] establece el cpe como el valor del 60% de aquellos en el segundo túnel, Sin embargo, la simulación de CFD no registró dicho comportamiento, sino que exhibió valores de cpe más cercanos a los del segundo arco,

Referencias

1, UNE-EN 1991-1-1 Eurocódigo 1: Acciones En Estructuras, Parte 1-1, Acciones Generales, Pesos Específicos, Pesos Propios, y Sobrecargas de Uso En Edificios; AENOR: Madrid, España, 2019;

2, Fernández-García, M,S,; Vidal-López, P,; Rodríguez-Robles, D,; Villar-García, J,R,; Agujetas, R, Numerical Simulation of Multi-Span Greenhouse Structures, Agriculture **2020**, 10, 31, doi:10,3390/agriculture10110499,

3, UNE-EN 1991-1-4 Eurocódigo 1: Acciones En Estructuras, Parte 1-4: Acciones Generales, Acciones de Viento,; AENOR: Madrid, España, 2018;

4, Kim, R,; Lee, I,; Kwon, K, Evaluation of Wind Pressure Acting on Multi-Span Greenhouses Using CFD Technique, Part 1: Development of the CFD Model, Biosystems Engineering **2017**, 164, 235–256, doi:10,1016/j,biosystemseng,2017,09,008,

5, Maraveas, C, Wind Pressure Coefficients on Greenhouse Structures, Agriculture **2020**, 10, 149, doi:10,3390/agriculture10050149,

6, Kwon, K,; Kim, D,; Kim, R,; Ha, T,; Lee, I, Evaluation of Wind Pressure Coefficients of Single-Span Greenhouses Built on Reclaimed Coastal Land Using a Large-Sized Wind Tunnel, Biosystems Engineering **2016**, 141, 58–81, doi:10,1016/j,biosystemseng,2015,11,007,

7, Blackmore, P,A,; Tsokri, E, Wind Loads on Curved Roofs, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **2006**, 94, 833–844, doi:10,1016/j,jweia,2006,06,006,

8, Kim, R,; Hong, S,; Lee, I,; Kwon, K, Evaluation of Wind Pressure Acting on Multi-Span Greenhouses Using CFD Technique, Part 2: Application of the CFD Model, Biosystems Engineering **2017**, 164, 257–280, doi:10,1016/j,biosystemseng,2017,09,011,

Optimización de cubierta con vigas peraltadas de madera laminada: Ecuaciones de diseño

María Simón-Portela [1], José Ramón Villar-García [2*], Desirée Rodríguez-Robles y Pablo Vidal-López [1]

[1] Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura, Av. Adolfo Suarez s/n, 06071 Badajoz, España.
[2] Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Centro Universitario de Plasencia, Universidad de Extremadura, Av. Virgen del Puerto 2, 10600 Plasencia, España. jrvillar@unex.es *

Abstract: The paper examines the optimisation of a three-dimensional structure formed by GL32h glulam double regular tapered beams and purlins using genetic algorithms. A software was developed in Matlab to perform the structural calculation, and an artificial intelligence optimisation tool based on genetic algorithms was tailored to optimise the roof based on cost. Finally, a statistical analysis of more than 200 optimisation data points was carried out, and several reliable prediction equations for both the geometry and the spacing of the structural elements were proposed based on some known values (i.e., span and snow load). It was found that the optimal purlin spacing is close to the maximum permissible, the optimal height and width for the purlins are 160-200 mm and 90 mm, respectively, and the optimal beam spacing falls within the range of 4-6 m.

Palabras clave: Cubierta; cálculo estructural; inteligencia artificial; algoritmos genéticos; coste.

1. Introducción

Hasta la Revolución Industrial, la madera fue uno de los principales materiales de construcción. Sin embargo, fue desplazada por el acero y el hormigón armado por la limitación en el tamaño de los elementos constructivos que restringía su uso en grandes construcciones. A finales del siglo XX, con el desarrollo de la madera laminada encolada, desaparece esta limitación permitiendo realizar estructuras de grandes luces [1].

Actualmente, la madera se considera un material clave para el futuro sostenible de la construcción, tanto por sus cualidades técnicas destacando su buena relación peso-resistencia [1], como medioambientales al tener unos bajos requerimientos de energía y emisiones de CO_2 en su fabricación [2]. Asimismo, la reforestación continua garantiza la continuidad del secuestro de CO_2 y reduce el efecto invernadero [3]. Es así que la madera es de gran interés agroindustrial, tanto en bodegas como otras construcciones agrarias.

La optimización de estructuras persigue encontrar el mejor diseño estructural con respecto al coste y que, al mismo tiempo, cumpla los criterios predefinidos en las normas de diseño estructural en cuanto a resistencia, estabilidad y magnitud de los desplazamientos de la estructura. Ha sido objeto de estudio desde los años 70, pero su gran desarrollo ha ocurrido recientemente gracias a las técnicas de inteligencia artificial como los algoritmos genéticos. Aunque las investigaciones se han centrado mayoritariamente en estructuras de acero y de hormigón, existen algunas referencias sobre la optimización de cerchas de madera mediante el método de programación no lineal de enteros mixtos [4,5] previos al desarrollo de los actuales Eurocódigos [6]. Posteriormente, se abordó una optimización bidimensional de cerchas de madera con algoritmos genéticos [7] y se extendió su alcance con la consideración tridimensional de la estructura de cubierta con cerchas y correas de madera laminada [8].

Respecto al análisis de vigas de madera laminada, cabe destacar los trabajos de Mayencourt y Mueller [9], Jelušič [10] y Baranski [11]. No obstante, no consideran algunos factores de influencia en la práctica constructiva como el efecto del espesor de la lámina, la influencia de cargas de nieve o viento indicadas en las normas o la interacción de la separación entre correas y la carga de cada viga, es decir, del efecto tridimensional en la optimización.

Por ser las vigas peraltadas una de las más empleadas en las construcciones agroindustriales así como por sus ventajas respecto al reducido tiempo de ejecución al no requerir uniones intermedias, en el presente trabajo se estudia la optimización mediante algoritmos genéticos de una estructura tridimensional de cubierta formada por vigas y correas de madera laminada encolada (GL32h) considerando los valores de las cargas indicados en el Eurocódigo 5 [6]. Para ello, se desarrolla un programa de cálculo numérico y una herramienta de optimización de algoritmos genéticos capaz de analizar las diferentes geometrías de cubierta e identificar los valores óptimos de los diferentes elementos estructurales de acuerdo a la función objetivo de minimización del coste. Finalmente, en base al análisis estadístico de los resultados, se proponen varias ecuaciones como reglas de diseño optimizadas para este tipo de estructuras.

2. Materiales y métodos

2.1. Cálculo Estructural

Para calcular y dimensionar la estructura de cubierta se ha diseñado un programa de cálculo numérico parametrizado en Matlab, que permite variar las dimensiones de los elementos y comprobar la seguridad estructural bajo los criterios del Eurocódigo 5 [6]. La Figura 1 muestra el modelo de la estructura de cubierta formada por vigas peraltadas a dos aguas y correas biapoyadas sin arriostramiento frente al vuelco lateral.

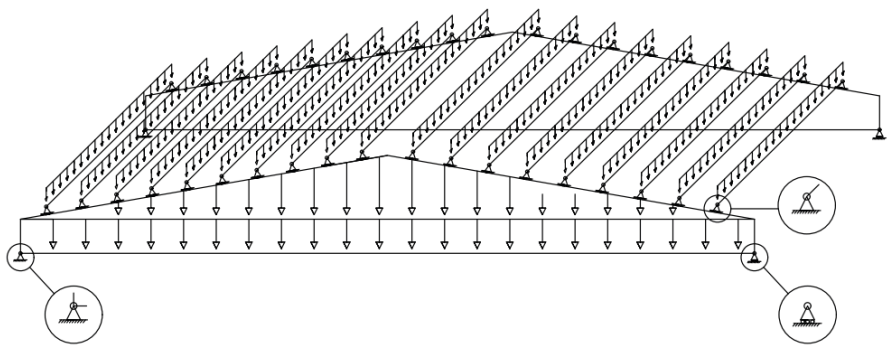


Figura 20. Modelo de cálculo estructural.

La Figura 2 muestra estructura tridimensional objeto de optimización, tanto a nivel de las secciones de los elementos estructurales como de la separación entre ellos. El material, tanto de las vigas como de correas, es madera laminada encolada GL32h cuyas propiedades de resistencias características y rigidez están recogidas en la norma UNE- EN 14080 [12]. Se consideran diferentes valores del ancho de la cubierta (Luz), desde los 15 a los 30 m, tomando valores cada 1,25m. Por el contrario, la longitud de la cubierta se fijó en 45 m y para el ángulo de inclinación de las vigas se tomó 10º, ya que es el más utilizado en el tipo de estructura evaluada. Para el canto de las vigas (Hv) y las correas (Hc), al igual que en Villar [7], se utilizaron láminas de 40 mm de espesor, tomando valores desde 120 a 1200 mm, cada 40 mm. El valor de la base de las vigas (Bv) y de las correas (Bc) osciló entre los 90 y 220 mm en incrementos de 10 mm. La longitud de las correas y la separación entre correas se consideraron variables, lo que permitió determinar el óptimo para minimizar el coste. El valor de la separación entre vigas (Lc) fue contemplado entre 4 y 7 m, y los de la separación entre correas (Sepc) entre 0,625 y 1,25 m, que es la separación máxima permitida.

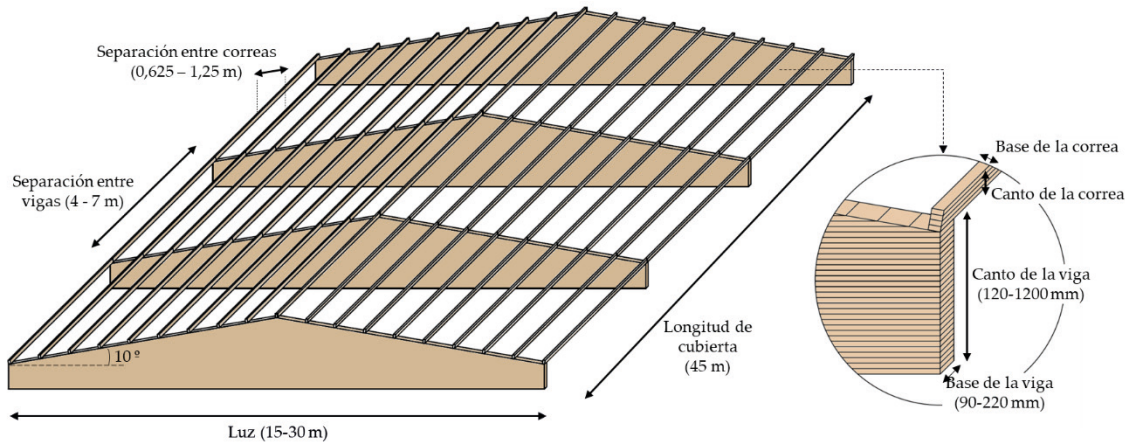


Figura 21. Variables fijas y parámetros de optimización de la estructura.

En cuanto a las cargas superficiales, se consideró una carga muerta de 0,45 kN/m² y el peso propio fue introducido por el algoritmo en la función de las secciones transversales examinadas. La carga de nieve (Nieve) fue variable desde 0,5 a 2 kN/m² cada 0,1 kN/m², para abarcar gran parte de las situaciones geográficas de Europa. La carga de viento fue determinada para una cubierta a dos aguas, sin huecos y con una altura de 5, 6 y 7 m, por ser los valores más comunes. Se tomó una velocidad básica de 27 m/s, una rugosidad de 0,3 m y un terreno tipo III de acuerdo con el Eurocódigo 1-4 [13]. Las cargas se combinaron siguiendo los criterios del Eurocódigo 1 [14], comprobándose la estructura para cada combinación más desfavorable. Además, se consideró una clase de servicio 1, un factor de modificación k_{mod}= 0,9 y un coeficiente parcial de seguridad para el material "Madera laminada encolada" de 1,25.

2.2. Optimización mediante algoritmos genéticos y función objetivo.

Los algoritmos genéticos están basados en los principios de la genética y selección natural, y permiten obtener, a partir de una población, un individuo óptimo tras sucesivas generaciones bajo determinadas reglas. En el proceso de optimización (Figura 3), se seleccionan 600 individuos aleatorios -cada posible solución estructural-, se evaluaron mediante una función objetivo que penaliza en función del coste y la seguridad estructural a través del índice de agotamiento. Se selecciona a los individuos más aptos que someten a cruzamiento, elitismo y mutación formando así, la siguiente generación. Se obtiene el individuo óptimo cuando se alcanzan 150 generaciones o por convergencia, cuando se producen 20 generaciones sin mejora.

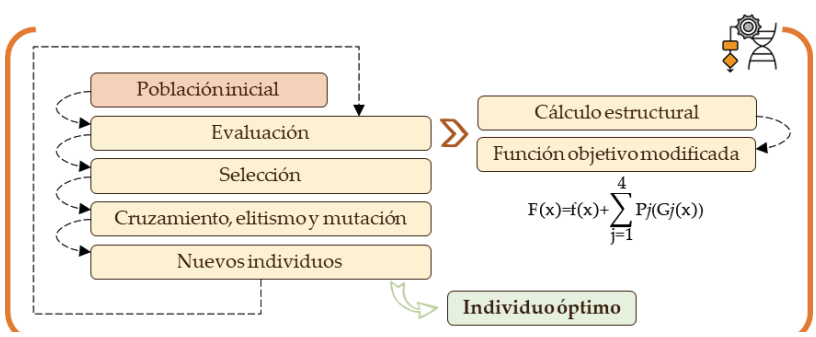


Figura 22. Proceso de optimización de la estructura mediante algoritmos genéticos.

2.4. Análisis estadístico

Se estudia la relación entre tres variables cualitativas (Hc, Bc y Lc) y seis variables cuantitativas (Luz, Nieve, coste de la estructura (Coste, Hv, Bv y Sepc).

3. Resultados y discusión

La combinación de cargas más desfavorable aunó las cargas permanentes, de nieve y de viento de presión. Se apreció la importancia de la carga de nieve, mientras que la carga de viento de presión no variaba significativamente con la altura del pilar y se fijó en 0,07 kN/m². Se obtuvieron 208 individuos óptimos por la combinación de los 13 valores de luz y 16 valores carga de nieve.

3.1. Relación entre Coste, Nieve y Luz

Valores del coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación de R=1 y R^2=0,999, respectivamente, indicaron la existencia de dependencia lineal casi perfecta entre las variables. Los datos no presentaron diferencias significativas con la distribución normal (Shapiro-Wilk 0,994, p>0,05). De este modo, es factible realizar predicciones fiables sobre el coste óptimo de la cubierta, conocidas Luz y Nieve según el modelo de regresión múltiple propuesto (Tabla 1) con indicación de los p-valores que corroboran el buen ajuste lineal entre las tres variables.

Tabla 10. Estimación de parámetros (pendientes y constante) del modelo de regresión múltiple.

Parámetros	Estimación	Error típico	t	p
(Constante)	13,837	0,15350	90,1	< 0,001
Nieve	-1,431	0,11521	-12,4	< 0,001
Luz	0,656	0,00668	98,2	< 0,001
Nieve · Luz	0,245	0,00501	48,8	< 0,001

Tal como se esperaba, a medida que se incrementa carga de nieve y la luz, aumenta el coste. A partir de los coeficientes del plano de regresión múltiple se propone la ecuación de predicción del coste (Ec.1). Si en lugar de calcular el coste considerando el precio de 900 €/m3, se desea conocer el volumen de la estructura, se debe emplear la ecuación del volumen de madera (Ec.2), construida a partir de la división de la ecuación anterior entre el precio.

$$Coste=(13,837 - 1,431\cdot Nieve + 0,656\cdot Luz + 0,245\cdot Nieve\cdot Luz)^{3,125} \quad \text{(Ec.1)}$$

$$Volumen=(1,56922 - 0,16229\cdot Nieve + 0,0744\cdot Luz + 0,02778\cdot Nieve\cdot Luz)^{3,125} \quad \text{(Ec.2)}$$

donde: Coste es el precio de la estructura (€), Volumen es la cantidad de madera laminada (m³), Nieve es la carga de nieve aplicable según la situación geográfica de la construcción (kN/m²) y Luz es la dimensión total de la viga peraltada (m).

A igual luz de la cubierta, a medida que aumenta 0,1 kN/m² la carga de nieve, aumenta entre 2,6% y 4,4 % el coste óptimo -o el volumen- para luces de 15 a 30 m, respectivamente. A igual carga de nieve, a medida que aumenta 1 m la luz, aumenta entre 9,5 % y 11,6 % el coste óptimo para cargas de 0,5 a 2 kN/m², respectivamente. Como en Jelušič [10], el coste elevado al exponente 0,32 linealiza el resultado. Además, la adaptación del modelo a la viga peraltada estudiada por Baranski [11], alcanza las mismas dimensiones de optimización (Hv= 640 mm) salvo en el ancho de la viga, con un óptimo de 150 mm frente a sus 200 mm. En dicho artículo, se fija que como máximo el canto de la viga puede tener un valor de 10 veces la base, condición que se cumple con los algoritmos genéticos. Así, el modelo apunta a un óptimo de la base de la viga un 25 % inferior.

3.2. Relación entre carga de nieve, luz, canto de la correa y canto de la viga

Los resultados del ANCOVA muestran que las variables Luz (F(1,202) =79,8, p < 0,05) y Nieve (F (1,202) =34,1, p < 0,05) y el factor Hc (F (1,202) =14,6, p < 0,05) afectan independientemente de forma significativa a la variable Hv; y que, en conjunto, el factor Hc con la variable Luz (F (1,202) =10,7, p < 0,05), la variable Nieve con la variable Luz (F (1,202) =14,4, p < 0,05) afectan de forma significativa a la variable Hv. Los datos no presentaron heterocedasticidad ni diferencias

significativas con la distribución normal (Levene's 6,58·10-4, p > 0,05 y Shapiro-Wilk 0,994, p > 0,05).

Tabla 2. Estimación de los efectos de las variables sobre la variable respuesta Hv.

Parámetros	Efecto	Estimación	SE	Intervalo de confianza del 95 %	
				Inferior	Superior
(Intercepto)	(Intercepto)	4,2752	0,24322	3,7956	4,75481
Nieve	Nieve	1,0755	0,18408	0,7125	1,43843
Luz	Luz	0,0946	0,01058	0,0737	0,11544
Hc	200 - 160	0,6546	0,17105	0,3173	0,99189
Hc · Luz	Luz · 200 - 160	-0,0243	0,00744	-0,0390	-0,00965
Nieve · Luz	Nieve · Luz	-0,0304	0,00801	-0,0462	-0,01456

En la Tabla 2 se muestran las estimaciones de los efectos de Nieve, Luz y Hc sobre Hv. La nieve y la luz son las variables independientes y su relación con Hv determina la pendiente del plano. Los valores positivos de los coeficientes de mayor valor indican que a medida que aumenta la carga de nieve y la luz, aumenta el canto de la viga.

En la Figura 4 se muestran los planos de regresión múltiple en función de Hc; y la Ec. 3 permite determinar su valor óptimo. Se deduce que por cada 1,2 m (para Hc=160) o 1,5m (para Hc=160) de aumento de la luz y por cada 0,2 kN/m² de aumento de la carga de nieve, se incrementa 40 mm el canto de la viga, es decir, una lámina en su composición.

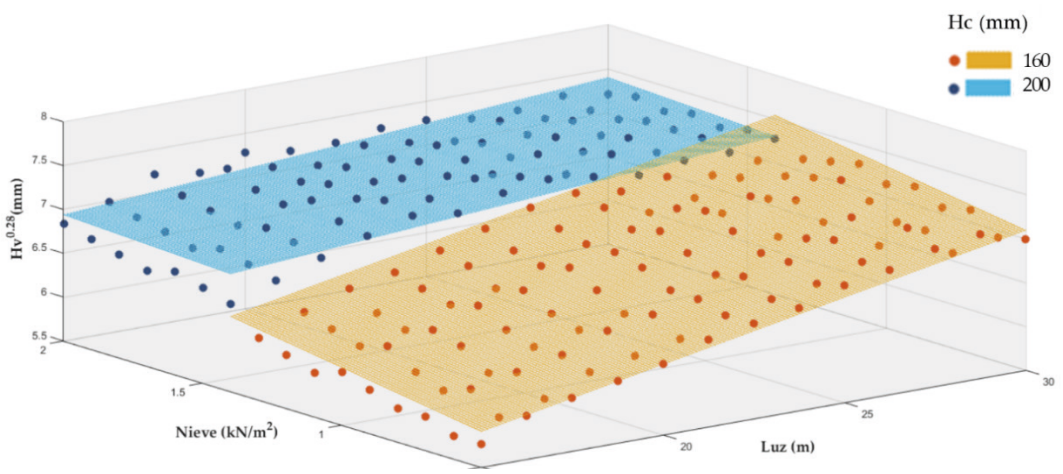


Figura 4. Relación de Nieve, Luz y Hv mediante planos de regresión lineal múltiple según Hc.

$$\text{Para Hc=160 mm} \rightarrow Hv = (4{,}2752 + 1{,}0755 \cdot Nieve + 0{,}0946 \cdot Luz - 0{,}0304 \cdot Nieve \cdot Luz + \varepsilon)^{\frac{1}{0{,}28}}$$

$$\text{Para Hc=200 mm} \rightarrow Hv = (4{,}9298 + 1{,}0755 \cdot Nieve + 0{,}0703 \cdot Luz - 0{,}0304 \cdot Nieve \cdot Luz + \varepsilon)^{\frac{1}{0{,}28}} \quad \text{(Ec. 3)}$$

donde: Hc es el canto de la correa (mm), Hv es el canto de la viga (mm), Nieve es la carga de nieve aplicable (kN/m²), Luz es la dimensión total de la viga peraltada (m) y $\varepsilon = \pm 0{,}0161$.

3.3. Relación entre nieve, luz, canto de la correa y base de la viga

Los resultados del ANCOVA muestran que las variables nieve (F(1,201) =3,99, p < 0,05) y luz (F(1,201) =8,83, p < 0,05) afectan independientemente de forma significativa a la variable Bv/Lc (p < 0,05) y que en conjunto, la variable nieve con la variable luz (F(1,201) =87,56, p < 0,05), el factor Hc con la variable luz (F(1,201)=6,53, p < 0,05) y con la variable nieve (F(1,201)=46,49, p < 0,05) el factor Hc con las variables luz y nieve (F(1,201)=36,62, p < 0,05) afectan de forma significativa a la variable Bv; lo que muestra que el modelo de relación entre las variables va a ser un modelo con

interacción. Los datos no presentaron heterocedasticidad ni diferencias significativas con la distribución normal (Levene's 0,238, p > 0,05 y Shapiro-Wilk 0,997, p > 0,05).

Tabla 3. Estimación de los efectos de las variables sobre la variable respuesta Bv.

Nombres	Efecto	Estimación	SE	Intervalo de confianza del 95 %	
				Inferior	Superior
Parámetros	(Intercepto)	6,0454	0,34505	5,3650	6,72577
Nieve	Nieve	-0,5683	0,28447	-1,1293	-0,00741
Luz	Luz	-0,0458	0,01542	-0,0762	-0,01542
Hc · Nieve	Nieve · 200 - 160	-1,3641	0,20006	-1,7586	-0,96965
Hc · Luz	Luz · 200 - 160	-0,0238	0,00932	-0,0422	-0,00544
Nieve · Luz	Nieve · Luz	0,1170	0,01251	0,0924	0,14169
Hc · Nieve · Luz	Nieve · Luz · 200 – 160	0,0637	0,01053	0,0429	0,08445

La Tabla 3 muestra las estimaciones de los efectos de la nieve, luz y Hc sobre Bv. La nieve y la luz son las variables independientes y su relación con Bv determina la pendiente del plano. En la Figura 5 se muestran los planos de regresión múltiple de la carga de nieve, la luz y Bv en función de Hc. Se deduce que cuando el canto de las correas es de 160 mm, el valor óptimo de la base de la viga es de 90 mm a excepción de luces entre 26 y 30 m, donde aumenta a 100-110 mm. Para el canto de la correa es de 200 mm, el valor óptimo de la base de la viga es de 90-100 mm, 110-120 mm y 130-160 mm para luces de 15-20 m, 20-25 m y 25-30 m, respectivamente. Para poder determinar el valor óptimo de Bv se puede recurrir a la Ec. 4.

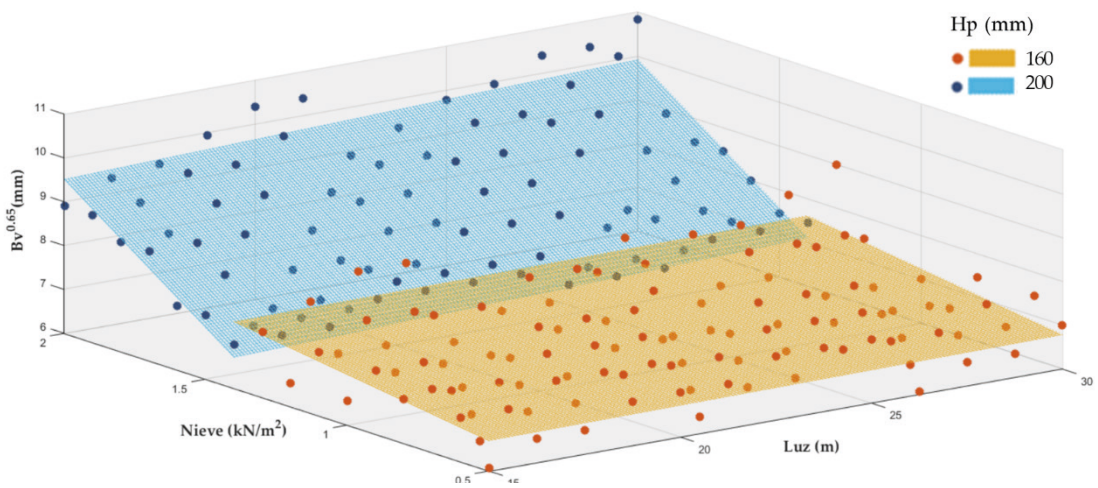


Figura 5. Relación de Nieve, luz y Bv mediante planos de regresión lineal múltiple según Hc.

$$\text{Para Hc=160 mm} \rightarrow Bv = (6{,}054 - 0{,}5683 \cdot Nieve - 0{,}0458 \cdot Luz + 0{,}1170 \cdot Nieve \cdot Luz + \varepsilon)^{\frac{1}{0{,}65}}$$

$$\text{Para Hc=200 mm} \rightarrow Bv = (6{,}054 - 1{,}9324 \cdot Nieve - 0{,}0696 \cdot Luz + 0{,}1807 \cdot Nieve \cdot Luz + \varepsilon)^{\frac{1}{0{,}65}} \quad \text{(Ec. 4)}$$

donde: Hc es el canto de la correa (mm), Bv es la base de la viga (mm) con valor mínimo de 90 mm, Lc es la separación entre vigas (m), Nieve es la carga de nieve aplicable (kN/m²), Luz es la dimensión total de la viga peraltada (m) y $\varepsilon = \pm 0{,}05$.

3.4. Canto de la correa según intervalos de carga de nieve

Para cargas de nieve entre 0,5 y 1,4 kN/m², el valor óptimo del canto de la correa es 160 mm y entre 1,4 y 2,0 kN/m², el valor óptimo es de 200 mm. Como en Villar et al. [8], se aprecia que el canto de la correa se establece a partir de un canto básico de 160 mm, es decir, 4 láminas de 40 mm.

3.5. Base de la correa

La base de la correa no varía a medida que aumenta la luz y la carga de nieve, sino que se mantiene constante siendo su valor el mínimo, 90 mm, como sucede en Villar et al. [8]. Se ha comprobado que solo aumenta para cargas de nieve muy elevadas que no se ajustan a la realidad.

3.6. Relación entre Nieve, Luz, canto de la correa y separación entre correas

Se ha estudiado la relación entre Nieve, Luz y Sepc cuando Hc es de 160 mm, ya que cuando Hc es de 200 mm la separación es invariablemente la máxima permitida (1,25 m). Valores de R=0,972 y R^2=0,944 son indicativos de una dependencia lineal fuerte que avala predicciones fiables de Sepc, conocidas Nieve y Luz según el modelo de regresión lineal múltiple propuesto. Los datos no presentaron diferencias significativas con la distribución normal (Shapiro-Wilk 0,991, p > 0,05). La Tabla 4 muestra que la pendiente del plano es significativamente diferente de 0, ya que test t para Nieve, Luz y Nieve y Luz en conjunto es respectivamente -7,83 (p<0,001), -16,00 (p<0,001), 4,94 (p<0,001). A partir de los coeficientes del plano, con la Ec. 5, se puede obtener el valor óptimo de la separación entre correas.

Tabla 4. Estimación de parámetros (pendientes y constante) del modelo de regresión múltiple.

Parámetros	Estimación	Error típico	t	p
(Constante)	0,73943	0,02625	28,17	< 0,001
Nieve	-0,21961	0,02804	-7,83	< 0,001
Luz	-0,01828	0,00114	-16,00	< 0,001
Nieve · Luz	0,00603	0,00122	4,94	< 0,001

$$\text{Para Hc=160 mm} \rightarrow \text{Sepc}=\frac{\text{Luz}\cdot(0{,}73943 - 0{,}21961\cdot\text{Nieve} - 0{,}01828\cdot\text{Luz} + 0{,}00603\cdot\text{Nieve}\cdot\text{Luz})}{\text{Lc}} \qquad \text{(Ec. 5)}$$

$$\text{Para Hc=200 mm} \rightarrow \text{Sepc}=1{,}25$$

donde: Hc es el canto de la correa (mm), Sepc es la separación entre correas (m), Lc es la separación entre vigas (m), Nieve es la carga de nieve aplicable (kN/m²) y Luz es la dimensión total de la viga peraltada (m).

Al igual que en Villar et al. [8] la separación óptima siempre se aproximó a la máxima permitida. Las ecuaciones apuntan a que la separación óptima entre correas oscila entre 1 y 1,25 m cuando el canto de las correas es de 160 mm y un valor de 1,25 m cuando el canto es de 200 m.

3.7. Separación entre vigas según intervalos de carga de nieve

En el 81,3 % de los casos, la separación entre pórticos es de 4,1 y 4,5 m, valores muy similares a los obtenidos para cerchas [8] y los comúnmente utilizados en la práctica. El valor óptimo de la separación entre pórticos es 4,1 m para cargas de nieve en los intervalos (1,0, 1,4) y (1,6, 2,0], 4,5 m en los intervalos [0,8, 1,0] y [1,4, 1,6], 5 m en el intervalo (0,6, 0,8) y 5,6 m cuando en el intervalo (0,5, 0,6]. Como se esperaba la separación disminuye para aumentos de carga, a excepción del intervalo [1,4, 1,6]. Se debe a que el canto de la correa aumenta de 160 a 200 mm a partir de cargas de nieve de 1,4 kN/m² lo que permite una mayor separación en el intervalo [1,4, 1,6].

4. Conclusiones

Se ha probado la validez programa estructural y la herramienta de algoritmos genéticos para determinar el diseño estructural óptimo de una estructura de cubierta con vigas peraltadas y

correas de madera laminada GL32h según los criterios de los Eurocódigos. Mediante el modelo estadístico, se pueden hacer predicciones fiables de los valores óptimos del coste, dimensiones de vigas y correas y su disposición conocida la luz y la carga de nieve.

- El coste -o volumen- depende en un 99,9 % de la luz y de la carga de nieve con aumentos de un 2,6-4,4% por cada 0,1 kN/m² y un 9,5-11,6 % por cada metro de luz.
- Para canto de la correa de 160 y 200 mm, respectivamente, el canto de la viga aumenta alrededor de 40 mm por cada 1,2-1,5 m de aumento de luz o 0,2 kN/m² de aumento de la carga de nieve.
- Cuando el canto de la correa es 160 mm, el valor óptimo de la base de la viga es de 90 mm a excepción de luces de 26-30 m, donde aumenta a 100-110 m. Para correas de 200 mm, el valor óptimo de la base de la viga es de 90-100 mm, 110-120 mm y 130-160 mm para luces de 15-20 m, 20-25 m y 25-30 m, respectivamente.
- El canto óptimo de la correa es 160 mm cuando la carga de nieve oscila entre 0,5 y 1,4 kN/m² y 200 mm para valores entre 1,4 y 2,0 kN/m².
- El óptimo de la base de la correa es 90 mm, independientemente de la luz y nieve.
- La separación óptima entre correas se aproxima a la máxima permitida; entre 1y 1,25 m cuando el canto de la correa es 160 mm y 1,25 m para correas de 200 mm de canto.
- La separación óptima entre vigas es de 5-6 m para cargas de nieve menores a 0,8 kN/m² y 4-4,5 m para cargas de nieve superiores a 0,8 kN/m².

Referencias

1. Calama-Rodríguez, J.-M.; Martínez-Gracia, J.-J. Architectural Structures of Glued Laminated Wood. (in Spanish) [Estructuras Arquitectónicas de Madera Laminada Encolada]. *Re. Revista de Edificación* **1994**, *18*, 7–21.

2. Forest and Wood Products Research and Development Corporation *The Environmental Properties of Timber-Summary Report*; Australian Government: Melbourne, Australia, 2004;

3. United States Environmental Protection Agency *Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks*; 3rd Ed.; EPA: Washington DC, USA, 2006;

4. Šilih, S.; Premrov, M.; Kravanja, S. Optimum Design of Plane Timber Trusses Considering Joint Flexibility. *Engineering Structures* **2005**, *27*, 145–154, doi:10.1016/j.engstruct.2004.10.001.

5. Šilih, S.; Kravanja, S.; Premrov, M. Shape and Discrete Sizing Optimization of Timber Trusses by Considering of Joint Flexibility. *Advances in Engineering Software* **2010**, *41*, 286–294, doi:10.1016/j.advengsoft.2009.07.002.

6. UNE-EN 1995-1-1 *Eurocódigo 5. Proyecto de Estructuras de Madera. Parte 1-1: Reglas Generales y Reglas Para Edificación.*; AENOR: Madrid, España, 2016;

7. Villar, J.R.; Vidal, P.; Fernández, M.S.; Guaita, M. Genetic Algorithm Optimisation of Heavy Timber Trusses with Dowel Joints According to Eurocode 5. *Biosystems Engineering* **2016**, *144*, 115–132, doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.02.011.

8. Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Rodríguez-Robles, D.; Guaita, M. Cost Optimisation of Glued Laminated Timber Roof Structures Using Genetic Algorithms. *Biosystems Engineering* **2019**, *187*, 258–277, doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.09.008.

9. Mayencourt, P.; Mueller, C. Hybrid Analytical and Computational Optimization Methodology for Structural Shaping: Material-Efficient Mass Timber Beams. *Engineering Structures* **2020**, *215*, 110532, doi:10.1016/j.engstruct.2020.110532.

10. Jelušič, P. Determining Optimal Designs of Timber Beams with Non-Uniform Cross-Section.; WIT Transactions on The Built Environment: Ljubljana, Slovenia, July 11 2018; Vol. 175, pp. 169–175.

11. Baranski, J.; Szolomicki, J.; Damian, K. Shape Optimization of Glulam Timber Roof Girders. In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science; 2018; Vol. 2.

12. UNE-EN 14080 *Estructuras de Madera. Madera Laminada Encolada y Madera Maciza Encolada. Requisitos*; AENOR: Madrid, España, 2022;

13. UNE-EN 1991-1-4 *Eurocódigo 1: Acciones En Estructuras. Parte 1-4: Acciones Generales. Acciones de Viento.*; AENOR: Madrid, España, 2018;

14. UNE-EN 1991-1-1 *Eurocódigo 1: Acciones En Estructuras. Parte 1-1. Acciones Generales. Pesos Específicos, Pesos Propios, y Sobrecargas de Uso En Edificios*; AENOR: Madrid, España, 2019;



Influencia del contenido de humedad en las propiedades mecánicas del trigo

M. Moya[1], D. Sánchez[1], J.A. Romero[1], J.R. Villar[1]

[1] Universidad de Extremadura. Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal. Centro Universitario de Plasencia. Avda. Virgen del Puerto, nº 2, 10600 Plasencia (Cáceres); manuelmi@unex.es; davidsavi4jaraiz@gmail.com; romerolopezjangel@gmail.com; jrvillar@unex.es

Abstract: The values of the mechanical properties of granular materials depend on their moisture content. Since the loads generated within agricultural silos depend on these properties, it is important to know the variation of these parameters when the moisture content of the granular material is varied, too. Therefore, the goal of this research was to determine the values of the angle of internal friction, the apparent cohesion, the dilatancy angle and the apparent specific weight of wheat when its moisture content is varied. For this purpose, direct shear and oedometer tests were conducted. In addition, a climatic chamber was used to provide the moisture content to the samples. Moisture content applied to wheat samples ranged from 7.5% to 15.5%. Preliminary results showed that from direct shear tests, the angle of internal friction increased up to 25% when moisture content increased 8%. The apparent cohesion did not suffer a significant variation as moisture content varied. In addition, the dilatancy angle reached a maximum value of 17° at a moisture content of 10% and at a normal pressure of 10 kPa. Finally, from the oedometer tests conducted, preliminary results showed that the apparent specific weight increase ranged from 3.3% to 9.1% as moisture content increased from 7.5 to 13.4%.

Palabras clave: ángulo de rozamiento interno, cohesión aparente, ángulo de dilatancia, capilaridad, silo agrícola

1. Introducción

El cálculo de silos agrícolas se ha realizado tradicionalmente con las teorías clásicas, siendo la más utilizada la de Jannsen [1] en condiciones estáticas. Para ellas se precisaban propiedades mecánicas tales como el ángulo de rozamiento interno, la cohesión aparente, la densidad o el coeficiente de rozamiento grano-pared, que han sido determinadas por numerosos autores para diversos materiales, tales como trigo, maíz, cebada, etc. [2,3]. Sin embargo, con el desarrollo del cálculo de silos por métodos numéricos se precisaba utilizar nuevas propiedades mecánicas además de las consideradas en las teorías clásicas, tales como el ángulo de dilatancia o el módulo de elasticidad del material, entre otros, para determinar las cargas generadas en el interior de los silos en condiciones dinámicas. Por ello, diversos autores realizaron trabajos con el fin de caracterizar dichas propiedades en diversidad de materiales, tanto granulares como pulverulentos [4,7].

Por otro lado, es conocido desde hace mucho tiempo que el valor que alcanzan las propiedades mecánicas a las que se ha hecho referencia en el párrafo anterior dependen del contenido de humedad que posea la muestra del material almacenado en el interior del silo

agrícola y, por lo tanto, las cargas generadas también dependen de éste. Por esta razón, es importante conocer el valor de estos parámetros cuando varía el contenido de humedad de la muestra. Por ello, se han realizado algunos trabajos en los que se han variado las condiciones de humedad para algunos materiales con el fin de conocer la variación de algunas propiedades [8,9]. Esta variación se debe a los puentes capilares que se establecen entre los granos del material, los cuales dependen de la cantidad de líquido presente en el medio granular. Por esta razón, cuando un material pasa del estado húmedo al estado seco, las uniones capilares, los puentes capilares y/o los puentes líquidos entre partículas se crean o se destruyen, según las circunstancias. En estos casos es importante conocer el comportamiento cohesivo del material, algo que se viene haciendo en los últimos años [10,11]. Sin embargo, aún falta por conocer bien el comportamiento mecánico del material granular no consolidado en condiciones húmedas.

Por todo lo expuesto, el objeto de este trabajo es proporcionar valores de algunas de las propiedades mecánicas habitualmente utilizadas en el cálculo de silos agrícolas cuando varía el contenido de humedad de la muestra. En este caso, el material elegido ha sido trigo. Esos valores podrán servir de base para conocer el comportamiento mecánico del material al variar su contenido de humedad.

2. Materiales y métodos

Todos los ensayos realizados en este trabajo se llevaron a cabo en el laboratorio de geotecnia del Centro Universitario de Plasencia, perteneciente a la Universidad de Extremadura. Las muestras del material utilizado correspondieron a trigo, que es un material granular comúnmente almacenado en silos agrícolas. Las propiedades mecánicas que se han determinado han sido las siguientes: ángulo de rozamiento interno (ϕ), cohesión aparente (C), ángulo de dilatancia (ψ) y peso específico aparente (γ). Dado que los ensayos que se precisan llevar a cabo para determinar estas propiedades han sido suficientemente descritos en trabajos anteriores [12,13], aquí únicamente se describirán las condiciones particulares que han regido los ensayos llevados a cabo en este trabajo.

2.1. Cámara climática

Se ha utilizado una cámara climática para aplicar las condiciones de humedad y temperatura a las muestras de trigo utilizadas y lograr así variar el contenido de humedad de éstas. El rango de temperaturas osciló entre 20 °C y 55 °C, mientras que el rango de la humedad relativa varió entre el 25% y el 90% para obtener los distintos puntos de humedad con los que se han ensayado las muestras. Para lograr ese punto de humedad, las muestras de material depositadas en el interior de la cámara climática estuvieron expuestas a las distintas combinaciones de humedad relativa y temperatura seleccionadas durante un período mínimo de 72 horas. De esa manera el material pudo alcanzar la humedad deseada de manera homogénea antes de comenzar los ensayos correspondientes. La Figura 1 muestra el aspecto de la cámara climática utilizada en el presente trabajo:



Figura 1. Cámara climática utilizada en el laboratorio.

2.2. Ensayos de determinación del contenido de humedad

Los ensayos conducentes a la determinación del contenido de humedad de las muestras de trigo utilizadas se han realizado siguiendo la Parte 1 de la Norma UNE-EN ISO 17892 [14]. Las muestras se depositaron en el interior de una estufa y estuvieron sometidas a una temperatura de 105-110 ºC, pesándolas cada 24 horas hasta alcanzar un peso constante. Para el pesaje se utilizó una balanza electrónica de 0,01 gramos de precisión.

2.3. Ensayos de corte directo

Los ensayos conducentes a la determinación del ángulo de rozamiento interno, la cohesión aparente y el ángulo de dilatancia se realizaron con un aparato de corte directo cuyas características más importantes han sido descritas en trabajos anteriores [7]. En lo que a las condiciones particulares de los ensayos realizados en este trabajo se refiere, se ha de especificar que las tensiones normales aplicadas a las muestras de trigo fueron de 10, 20, 50, 100, 200 y 300 kPa, seleccionando una velocidad de ensayo de 0,4 mm/min. Esta velocidad fue suficientemente alta para asegurar la rapidez del ensayo, garantizando que la muestra no perdiera humedad durante su desarrollo.

2.4. Ensayos edométricos

El peso específico aparente del material fue determinado a partir de los ensayos realizados con los aparatos edométricos totalmente automáticos de los que se dispone en el laboratorio de geotecnia. El equipo consta de tres edómetros provistos de sus respectivas células edométricas, las cuales tienen unas dimensiones útiles de 75 mm de diámetro y 20 mm de altura para las muestras que se ensayen en su interior. La modalidad de ensayo realizada en esta ocasión fue la abreviada, que consiste en realizar un aumento o disminución de la carga de forma automática en el momento en el que se alcanza una deformación máxima de 0,1 mm durante 3 horas consecutivas, suponiendo en tal caso que se ha alcanzado la consolidación primaria. De esta forma los ensayos se pueden hacer de forma más rápida con respecto a la manera tradicional teniendo en cuenta que son muestras con unas condiciones de humedad específicas. Las cargas aplicadas fueron de 8, 16, 32, 64, 128 y 256 kPa. Se realizaron tres repeticiones con las muestras de trigo ensayadas. Para determinar el peso específico del material se pesó la cantidad de muestra colocada en el interior de la célula edométrica y se midió la altura alcanzada por el material en el interior de la célula edométrica tras aplicar cada escalón de carga, conociendo así el volumen ocupado por ésta en todo momento. La Figura 2 ilustra la manera en la que se realiza el ensayo.

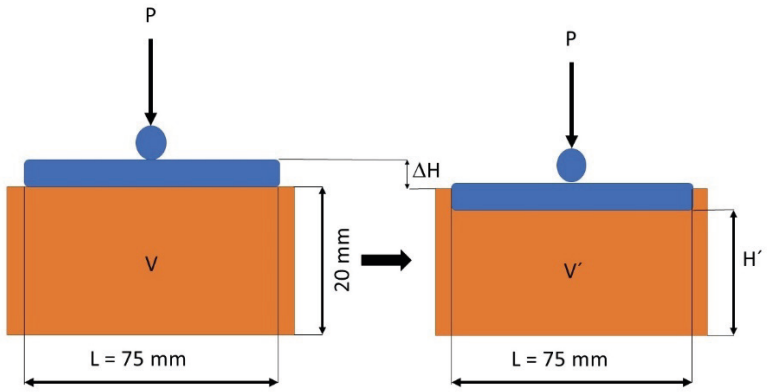


Figura 2. Ensayo edométrico realizado para la determinación del peso específico aparente.

3. Resultados y discusión

3.1. Contenido de humedad

Las muestras de trigo utilizadas fueron sometidas a diferentes contenidos de humedad a partir de las distintas combinaciones de temperatura y humedad relativa programadas en la cámara climática. En cada caso, antes de realizar los ensayos se seleccionó una pequeña muestra para determinar su humedad mediante secado en estufa, permitiendo así conocer el verdadero porcentaje de humedad de la muestra. La Tabla 1 muestra las distintas combinaciones de humedad y temperatura seleccionadas en la cámara climática y el contenido de humedad real de las muestras:

Tabla 1. Combinaciones de temperatura (°C) y humedad relativa (%) seleccionadas en la cámara climática y contenido de humedad real expresado en base seca (%) de las muestras de trigo utilizadas.

Condiciones de la cámara climática		Contenido de humedad
Temperatura (°C)	**Humedad relativa (%)**	**(%)**
55	25	7,5
20	35	10
20	45	10,5
20	65	13,4
20	90	15,5

Como se aprecia en la tabla anterior, el contenido de humedad de la muestra osciló entre el 7,5 y el 15,5%. En otros trabajos se utilizaron rangos de humedad similares [15].

3.2. Ensayos de corte directo

Los resultados obtenidos para el ángulo de rozamiento interno y la cohesión aparente a los diferentes contenidos de humedad aplicados en el presente trabajo se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Valores del ángulo de rozamiento interno y la cohesión aparente a diferentes contenidos de humedad.

Contenido de humedad (%)	Ángulo de rozamiento interno (ϕ)	Cohesión aparente (C, kPa)
7,5	22,9°	10,98
10,0	24,9°	10,37
10,5	24,8°	9,62
13,4	25,1°	11,48
15,5	28,6°	6,47

Por su parte, la figura 3 muestra las envolventes de Mohr-Coulomb obtenidas para el trigo a los diferentes contenidos de humedad ensayados.

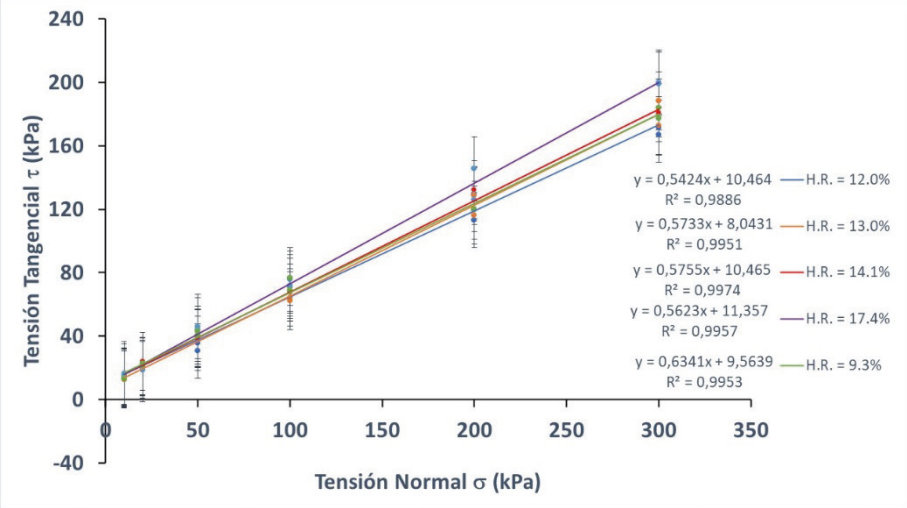


Figura 3. Envolventes de Mohr-Coulomb para el trigo a diferentes contenidos de humedad.

De los resultados anteriores se puede observar que, en general, el ángulo de rozamiento interno aumenta a medida que lo hace también el contenido de humedad de la muestra. La única excepción a esta tendencia se dio a una humedad del 10,5%, en la que el valor alcanzado por este parámetro (24,8°) a dicha humedad fue inferior al obtenido al 10% de humedad (24,9°). El valor mínimo (22,9°) se alcanzó a una humedad del 7,5%, mientras que el máximo (28,6°) se alcanzó al 15,5% de humedad. Por lo tanto, el ángulo de rozamiento interno se incrementó un 25% cuando el contenido de humedad aumentó un 8%. Una tendencia similar fue observada en otros trabajos anteriores [15].

Al comparar los resutados obtenidos para el ángulo de rozamiento interno a altas (100, 200 y 300 kPa) y bajas (10, 20 y 50 kPa) tensiones normales, se observaron algunas diferencias. La Figura 4 muestra las envolventes de Mohr-Coulomb obtenidas para el trigo a una humedad del 13,4%.

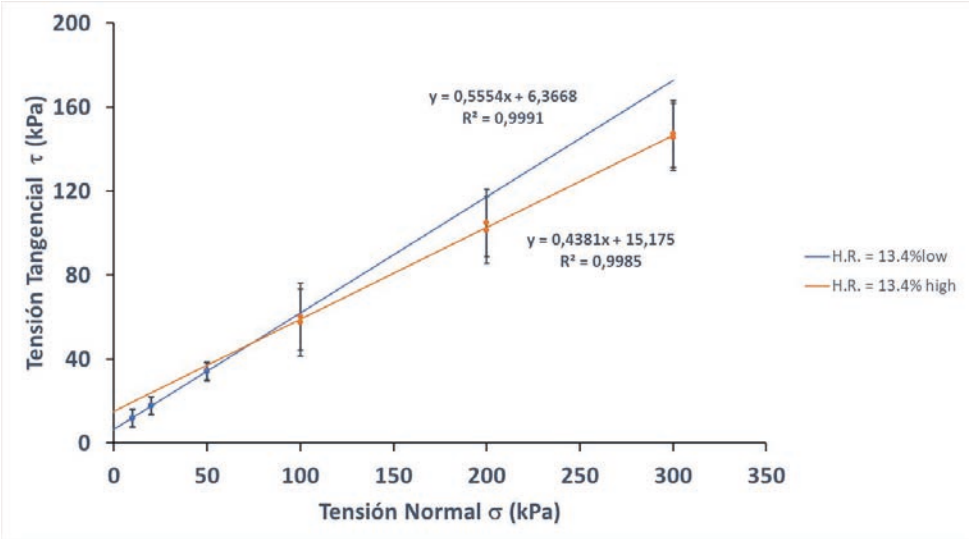


Figura 4. Envolventes de Mohr-Coulomb para el trigo a altas (100, 200 y 300 kPa) y bajas (10, 20 y 50 kPa) tensiones normales a una humedad del 13,4%.

En las restantes humedades ensayadas se obtuvieron curvas similares a la mostrada en la figura anterior. La única excepción se obtuvo al 10,5% de humedad, en el que las curvas a alta y baja tensión normal no se llegaron a cruzar en el intervalo de tensión normal considerado.

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos para el ángulo de rozamiento interno y la cohesión aparente a las diferentes humedades ensayadas en los intervalos para altas y bajas tensiones normales considerados.

Tabla 3. Valores del ángulo de rozamiento interno y la cohesión aparente a diferentes contenidos de humedad para los rangos de altas (100, 200 y 300 kPa) y bajas (10, 20 y 50) tensiones normales considerados.

Contenido de humedad (%)	Ángulo de rozamiento interno (ϕ)		Cohesión aparente (C, kPa)	
	Baja tensión normal	Alta tensión normal	Baja tensión normal	Alta tensión normal
7,5	28,17°	21,18°	10,98	18.98
10,0	29,0°	23,1°	6,66	19,11
10,5	22,9°	23,9°	12,50	15,88
13,4	29,05°	23,66°	9,62	15,18
15,5	29,22°	29,27°	6,47	2,74

De la tabla anterior se deduce que los valores del ángulo de rozamiento interno fueron, en general, mayores en el intervalo de bajas tensiones normales con respecto a los obtenidos en la zona de alta tensiones normales. Por lo tanto, la tensión de corte, de la que depende el valor obtenido para el ángulo de rozamiento interno, depende de la cantidad de líquido añadido y de la tensión normal aplicada, tal y como observaron otros autores [16]. Por su parte, al analizar los valores de la tensión normal se observó que, en general, éstos fueron ligeramente más elevados en el intervalo de altas tensiones normales excepto para una humedad del 15,5%. Esta tendencia fue observada también en otros trabajos [16].

La Figura 5 muestra las curvas de deformación obtenidas para el trigo a una humedad del 7,5% y a las diferentes tensiones normales aplicadas.

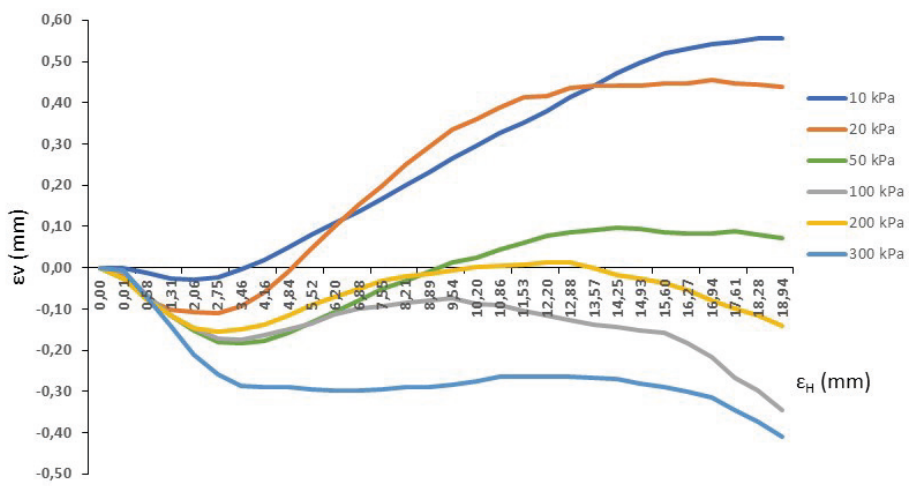


Figura 5. Curvas de deformación obtenidas para el trigo a una humedad del 7,5% y para las distintas tensiones normales aplicadas.

De los restantes ensayos llevados a cabo se obtuvieron curvas similares a la anterior. En ellas se aprecia, por lo tanto, que la muestra empieza a comprimirse inicialmente y después experimenta un incremento de volumen, si bien dicha tendencia se atenúa a medida que aumenta la tensión normal aplicada a la muestra. Las curvas son similares a las obtenidas con otros materiales en condiciones ambientales [7].

La Tabla 4 muestra los valores obtenidos para el ángulo de dilatancia a las distintas tensiones normales y contenidos de humedad aplicados en el trabajo.

Tabla 4. Valores del ángulo de dilatancia a diferentes tensiones normales y contenidos de humedad.

Tensión normal (kPa)	Ángulo de dilatancia (ψ)				
	Contenido de humedad				
	7,5%	10,0%	10,5%	13,4%	15,5%
10	14,2°	17,0°	14,8°	15,3°	12,4°
20	11,6°	15,9°	13,4°	13,2°	8,5°
50	6,5°	8,0°	7,3°	8,2°	8,5°
100	3,5°	5,5°	5,9°	3,6°	7,4°
200	7,0°	1,9°	0,1°	8,3°	3,9°
300	2,8°	4,7°	1,2°	0,7°	0,8°

Como se puede observar en la tabla, el mayor valor para este parámetro (17,0°) se alcanzó a una tensión normal de 10 kPa con un contenido de humedad del 10,0%. De hecho, en todas las humedades ensayadas el valor más alto del ángulo de dilatancia se alcanzó a la menor tensión normal aplicada (10 kPa), como cabía esperar a priori. Por último, también merece destacarse el hecho de que se produjo dilatación del material en todos los ensayos llevados a cabo, incluidos aquéllos en los que se aplicó la mayor tensión normal (300 kPa).

3.3. Ensayos edométricos

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos edométricos llevados a cabo para determinar la variación del peso específico aparente del material a las diferentes tensiones normales aplicadas a las muestras de trigo y para contenidos de humedad del 7,5, 10,0, 10,5 y 13,4%, respectivamente.

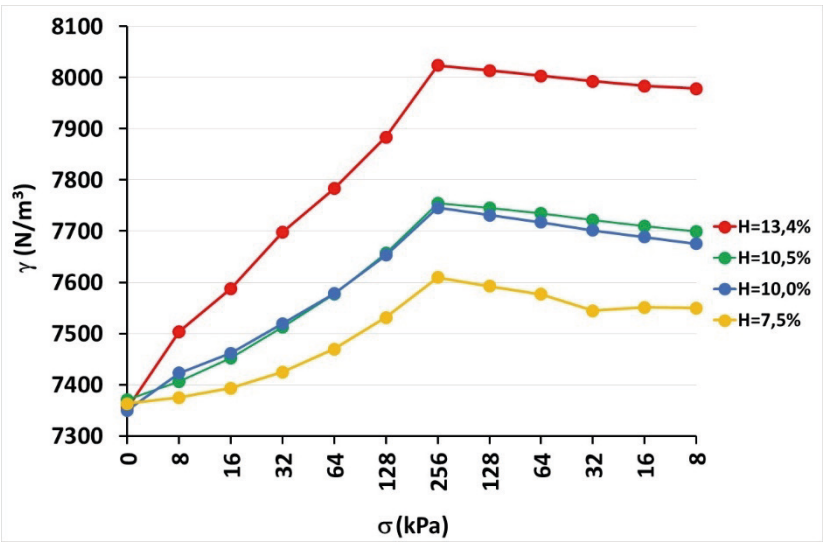


Figura 6. Variación del peso específico aparente del trigo en función de la tensión normal para las distintas humedades ensayadas en los aparatos edométricos.

De la figura anterior se deduce que el peso específico aparente aumenta a medida que lo hace el contenido de humedad de la muestra. Como es lógico, el valor máximo alcanzado para este parámetro se logra a la máximo tensión normal aplicada (256 kPa). Como se aprecia, durante el ciclo de descarga el peso específico aparente disminuye progresivamente experimentando la curva una pendiente similar para las distintas humedades aplicadas en cada caso.

La Tabla 5 ofrece los valores obtenidos para este parámetro a diferentes tensiones normales.

Tabla 5. Valores del peso específico aparente a diferentes tensiones normales y contenidos de humedad.

Tensión normal (kPa)	Peso específico aparente (γ, N/m^3)			
	Contenido de humedad			
	7,5%	10,0%	10,5%	13,4%
0	7363	7370	7350	7354
8	7375	7406	7423	7504
16	7394	7452	7461	7588
32	7425	7513	7520	7699
64	7469	7578	7578	7783
128	7531	7658	7653	7884
256	7610	7754	7746	8024
128	7592	7745	7731	8014
64	7577	7735	7717	8003
32	7545	7722	7702	7993
16	7551	7710	7689	7984
8	7550	7700	7676	7978

De la tabla anterior se deduce que el peso específico aparente se incrementó entre un 3,3 y un 9,1% en el rango de humedad del 7,5 al 13,4% al comparar el valor máximo alcanzado por éste con el valor inicial para cada una de las humedades aplicadas. Estos valores se encuentran dentro del rango de valores proporcionados por otros autores con contenidos de humedad similares [15].

4. Conclusiones

En general, el ángulo de rozamiento interno se incrementó a medida que lo hacía el contenido de humedad de la muestra, obteniéndose un incremento del 25% al aumentar la humedad un 8%.

Se encontraron diferencias significativas para el ángulo de rozamiento interno obtenido al comparar las envolventes de Mohr-Coulomb a altas (100, 200 y 300 kPa) y bajas tensiones normales (10, 20 y 50 kPa).

El material dilató en todos los ensayos de corte directo realizados, aumentando el ángulo de dilatancia a medida que disminuía la tensión normal aplicada, obteniéndose un valor de 17° al 10% de humedad y para una tensión normal de 10 kPa.

El peso específico aparente se incrementó entre un 3,3 y un 9,1% en el rango de humedad del 7,5 al 13,4%.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Estatal de Investigación por financiar el proyecto de investigación "Estudio del comportamiento estructural de silos de pared corrugada utilizando

Elementos Discretos (SILODEM)". Referencia: PID2019-107051GB-I00/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

99. Janssen, H. Versuche Über Getreidebruck in Silozellen. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. 1895, 1045–1049.
100. Lebègue, Y., Boudakian, A. Bases Des Règles « Silos » Du SNBATI - Essais Sur Les Produits et Principes Des Formules « Silos ». Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics. 1989, 476, 69–113.
101. Degoutte, G. Caractérisation En Laboratoire Des Propriétés Physiques et Mécaniques Des Matiéres Ensilées. Construction Métallique**.** 1989, *2*, 91–95.
102. Bucklin, R.A., Thompson, S.A., Ross, I.J., Biggs, R.H. Apparent Dynamic Coefficient of Friction of Corn on Galvanized Steel Bin Wall Material. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. 1993, 36, 1915–1918.
103. Molenda, M.; Stasiak, M.; Moya, M.; Ramirez, A.; Horabik, J.; Ayuga, F. Testing Mechanical Properties of Food Powders in Two Laboratories - Degree of Consistency of Results. International Agrophysics. 2006, 20, 37–45.
104. Ramírez, A., Moya, M., Ayuga, F. Determination of the Mechanical Properties of Powdered Agricultural Products and Sugar. Particle and Particle Systems Characterization. 2010, 26, 220–230.
105. Moya, M, Sánchez, D., Villar, J.R. Values for the mechanical properties of wheat, maize and wood pellets for use in silo load calculations involving numerical methods. Agronomy. 2022, 12(6), 1-18.
106. Frye, K., & Marone, C. Effect of humidity on granular friction at room temperature. Journal of Geophysical Research. 2002, 107(11), 13.
107. Louati, H., Oulahna, D., De Ryck, A. Apparent friction and cohesion of a partially wet granular material in steady-state shear. Powder Technology. 2015, 278, 65-71.
108. Delenne, J., El Youssoufi, M., Cherblanc, F., & Bénet, J. Mechanical behavior and failure of cohesive granular materials. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2004, *28*, 1577-1594.
109. Jiang, M., Yu, H., Harris, D. Bond rolling resistance and its effect on yielding of bonded granulates by DEM analyses. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2006, 30(8), 723-761.
110. Moya, M., Ayuga, F., Guaita, M., Aguado, P.J. Mechanical properties of granular agricultural materials. Transactions of the ASAE. 2002, 45(5), 1569-1577.
111. Moya, M., Guaita, M., Aguado, P.J., Ayuga, F. Mechanical properties of granular agricultural materials. Part 2. Transactions of the ASABE. 2006, *49*(2), 479-489.
112. UNE-EN ISO 17892-1. 2015. Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 1: determinación de la humedad. Madrid: Asociación Española de Normalización.
113. Molenda, M., Horabik, J. 2005. Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling. En Horabik, J., Laskowski, J. (Eds.), Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Lublin (Polonia): Institute of Agrophysics.
114. Louati, H., Oulahna, D., De Ryck, A. Apparent friction and cohesion of a partially wet granular material in steady-state shear. Powder Technology. 2015, 278, 65-71.

Coeficientes de rozamiento del castaño (Castanea Sativa *Mill.*) aserrado para clase de servicio II

Pablo Vidal-López [1], Desirée Rodríguez-Robles [1], Manuel Moya Ignacio [2] y José Ramón Villar-García [2]

[1] Grupo de Investigación Ingeniería Mecánica y Fluidos, Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Extremadura. Av. Adolfo Suarez s/n, 06071 Badajoz, España; pvidal@unex.es ; desireerodriguez@unex.es

[2] Grupo de Investigación Forestal, Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura. Avda. Virgen del Puerto 2, 10600 Plasencia, Cáceres, España; manuelmi@unex.es ; jrvillar@unex.es;

Abstract: Currently, the design standards provide the friction coefficients for softwoods, but there is a lack of specific values for hardwoods. However, these coefficients are necessary for the numerical simulation of joints and supports as well as for the calculation of structures where friction is involved, such as tension plates. Thus, this research work aims to determine the static and dynamic friction coefficients of Spanish chestnut wood (Castanea Sativa Mill.). As in previous works, the authors assessed the 12% moisture content, which corresponds to Service Class I, the experiments for this investigation were carried out at a moisture content of 18%. This higher moisture content is common in Service Class II, which refers to wood exposed to the weather but covered, a common occurrence in wooden structures. Moreover, different orthotropic orientations both for timber-to-timber and timber-to-steel were also considered. The results highlight the influence of the moisture content on the coefficient values, which increase with higher moisture percentages. Additionally, it was found a modification in the sliding behavior compared to the standard 12% moisture content.

Palabras clave: coeficiente de rozamiento, tribología, propiedades mecánicas

1. Introducción

La madera es uno de los materiales constructivos más antiguos empleados por el hombre, a lo largo de la historia ha mermado su uso con la irrupción de nuevos materiales como el acero y el hormigón, sin embargo, en la última década ha experimentado un fuerte resurgir en su empleo, no solo a pequeña escala sino también en construcciones cada vez de mayor entidad. Sus buenas propiedades mecánicas en relación a su peso, la mejora de su durabilidad con nuevos tratamientos, su empleo en forma de productos derivados como la madera laminada o microlaminada que permiten mayores dimensiones que las naturales, junto con su papel ya reconocido de mitigación del cambio climático, al ser sumidero de carbono y necesitar menos energía en su procesado que otros materiales, ha propiciado que ya se le esté considerando el material de construcción del siglo XXI.

Las propiedades de rozamiento de la madera, objeto de este trabajo, tienen interés constructivo en la resolución de uniones y apoyos de una estructura, ya que el coeficiente de rozamiento entre piezas de madera o entre madera y los elementos metálicos de unión, interviene en la magnitud y forma de transmisión de esfuerzos. La gran mayoría de las propiedades de la madera dependen de la humedad de la misma, al ser un material natural, éste gana y pierde humedad, alcanzando un equilibrio con la humedad relativa y la temperatura del ambiente que

la rodea. Las propiedades mecánicas se ensayan por tanto a un valor determinado de humedad, normalmente al 12%, y en su aplicación al cálculo se corrige con coeficientes en función de la clase de servicio en que el elemento va a encontrarse, lo que determina la exposición a unas determinadas condiciones ambientales y a la postre a su humedad de equilibrio.

No obstante, el coeficiente de rozamiento no se encuentra normalizado dentro de las propiedades mecánicas de la madera, apareciendo únicamente en la Tabla 6.1 de la EN1995-2:2004 (2016) Eurocódigo 5-Parte 2: Proyecto de estructuras de madera: Puentes (EC5-2) [1] y solo para coníferas, en su aplicación a puentes de tablero tensado, donde indica valores de rozamiento para humedades <=12% y >=16%, indicando que entre ellos se puede interpolar linealmente.

En trabajos anteriores los autores estudiaron el rozamiento madera madera y madera acero al 12% de humedad [2–4], en este caso se realizaron los ensayos al 18%, con la idea de cubrir esa parte de la tabla del EC5-2 de valor superior al 16% en este caso para una frondosa. La elección del valor del 18% se justifica además porque en obras bajo cubierta, pero abiertas (clase de servicio 2, CS II) la humedad de la madera se encuentra entre el 16-20% [5]. Por lo que los contenidos de humedad de más de un 16% y en particular 18% serán frecuentes en una amplitud de condiciones en CS II. Este tipo de clase de servicio se da mucho en estructuras de madera tipo viseras, pérgolas cubiertas, pasarelas y puentes con cubierta o protegidas por la capa de rodadura, así como piscinas cubiertas y cerradas.

Por otro lado, en muchas de las propiedades mecánicas se admite una variación lineal de sus valores entre determinados niveles de humedad, el coeficiente de rozamiento entre ellas. Hoffmeyer en [6] admite variación lineal de propiedades con la humedad entre el 8 y el 20%, por lo que, al igual que indica el EC5-2, conocidas al 12 y 18% podemos tomar estos extremos para interpolar.

Pocos estudios hacen referencia a variación de humedad y rozamiento, siendo la mayoría al 12% (para este valor se pueden encontrar referencias en trabajos anteriores de los autores). Entre los que sí valoran o dan notas sobre humedad están los recogidos a continuación.

Argüelles et al [5,7] recopila como valores del coeficiente de rozamiento de 0.25 a 0.7 para fricción estática y 0.15 a 0.4 para el dinámica, indicando que éstos aumentan con el contenido de humedad de la madera, hasta la saturación, permaneciendo constante a partir de este punto.

W. Fu et al [8]estudia la madera de haya, con diferentes humedades y secciones. Indicando que al aumentar la humedad aumentan los coeficientes de rozamiento estático y dinámico en el rango 5–30% y a partir de ahí el incremento es ligero. En el rango de este trabajo, refiere valores para 11.25% y 20%, con valores del coeficiente estático en torno a 0.5 y 0.71 y dinámico entre 0.3 y 0.65 para dichas humedades respectivamente dependiendo de orientación de las superficies de contacto.

El USDA Forest Products Laboratory [9] indica que los coeficientes se incrementan continuamente hasta la saturación de las fibras y posteriormente permanece constante hasta que en la superficie está presente el agua, momento en que decrece por el efecto lubricante.

En cuanto al rozamiento madera-acero, la escasez de estudios también es manifiesta. Sin embargo, sí hay un extenso trabajo al respecto en McKenzie et al [10] para el rozamiento dinámico, con numerosas especies aunque sin recoger el castaño. Aporta valores para rozamiento con acero liso y rugoso. Si nos centramos en el liso que es el presente en las uniones de madera, indica, para un contenido de humedad entre 10% y 14%, valores entre 0.1 y 0.21 para deslizamiento lento llegando a 0,30 si el deslizamiento es rápido. Para humedad de saturación de las fibras los valores aportados están entre 0.13 y 0.40 para deslizamiento lento llegando a 0.64 en rápido. En todos los casos valores de rozamiento dinámico, no obstante, de los gráficos aportados por este autor se puede inferir que el valor estático está solo ligeramente por encima de estos valores.

El USDA Forest Products Laboratory [9] también indica que los coeficientes de rozamiento cinéticos para la madera lisa contra superficies duras y lisas, donde podríamos englobar el acero, pueden variar desde 0.3 a 0.5 en madera seca, con contenido de humedad intermedio de 0.5 a 0.7, y de 0.7 a 0.9 alcanzando la saturación.

También se puede referenciar el trabajo de Dorn et al [11] en madera microlaminada de Picea abies contra acero. Aun teniendo presente que sus propiedades son diferentes a la de la madera aserrada, indica valores entre 0.10 y 0.30 para el coeficiente estático al 12%, e indica que para madera secada al horno apenas hay variaciones respecto a los valores anteriores, mientras que con madera en saturación los valores se incrementan entre un 75 y un 123% para rozamiento paralelo a la fibra y 82 y 182% perpendicular. No aporta valores para situaciones intermedias.

2. Materiales y métodos

2.1. Implementación del Ensayo

Dada la ausencia de normativa europea para realizar ensayos de rozamiento y apoyándose en la normativa americana ASTM G-115-10 [12], que únicamente aporta recomendaciones genéricas, los autores desarrollaron un procedimiento de ensayo aplicado ya en trabajos anteriores. Se modificó un equipo de geotecnia [13], la máquina de corte directo, para permitir situar en contacto las superficies a friccionar, aplicarles una carga normal (N) y registrar el desplazamiento y la fuerza (F) necesaria para producir deslizamiento, con lo que se puede obtener el coeficiente de rozamiento según la Ec. 1:

$$F = \mu_{e/d} N \qquad (1)$$

Donde la constante de proporcionalidad recibe el nombre de coeficiente de rozamiento estático μ_e o dinámico μ_d según se trate del valor en el momento inminente de comienzo del deslizamiento o durante el desplazamiento relativo de los sólidos o superficies ensayadas.

En cada ensayo se disponen en el equipo dos probetas de madera, o una de madera y una placa de acero, de las características y dimensiones descritas en el siguiente apartado. La carga normal se aplica a través de un puente de carga con placa de reparto sobre la cara superior de la probeta, de valor similar a la aplicada en anteriores trabajos, así como por otros autores para aplicación a uniones estructurales [14,15]. La velocidad en el tramo dinámico fue también similar a anteriores trabajos. El lector puede encontrar más detalle de la implementación del ensayo en trabajos previos de los autores [3].

2.2. Materiales

La madera empleada es castaño (Castanea Sativa *Mill*.) aserrado de procedencia española. Para la realización de los ensayos se emplean probetas de dimensiones 105 x 50 x 25 mm que se ponen en contacto entre ellas o con una placa de acero por su cara de mayor superficie y con deslizamiento en el sentido de su mayor longitud.

Las probetas fueron acondicionadas en una cámara climática donde se fija una temperatura de 20 grados centígrados y una humedad del 85%, lo que permitiría alcanzar el equilibrio higroscópico y la humedad deseada en las probetas del 18% [9]. Estas humedades fueron comprobadas inmediatamente antes de realizar los ensayos mediante higrómetro y a posteriori mediante secado en estufa.

La madera es un material ortótropo, lo que origina distintas rugosidades en distintos planos de corte, en los que se ha de estudiar el coeficiente de rozamiento para su aplicación a las

superficies que se pueden poner en contacto en las uniones de madera. Estos posibles planos de rozamiento son: i) Plano o sección transversal, perpendicular a la fibra, con dos direcciones de deslizamiento (A) dirección predominante de deslizamiento radial (deslizamiento paralelo al radio de los anillos de crecimiento) y (B) dirección predominante de deslizamiento tangencial a los anillos de crecimiento; ii) Plano o sección radial, definido por el eje y un radio del tronco, con dos posibilidades: (C) dirección de deslizamiento paralela a la fibra, superficies radiales y (D) dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra; iii) Plano o sección tangencial, tangente a los anillos de crecimiento, con: (E) dirección de deslizamiento paralela a la fibra, superficies tangenciales y (F) dirección de deslizamiento perpendicular a la fibra.

La figura 1 muestra estos pares de rozamiento, conduciendo a los siguientes ensayos entre caras de igual orientación: A-A, B-B, C-C, D-D, E-E, F-F y entre caras de distintas orientaciones: A-C, A-E, B-C, B-E. Y a los siguientes pares de rozamiento de madera con acero (Ac): A-Ac, B-Ac, C-Ac, D-Ac, E-Ac, F-Ac. En cada par se realizaron 15 ensayos.

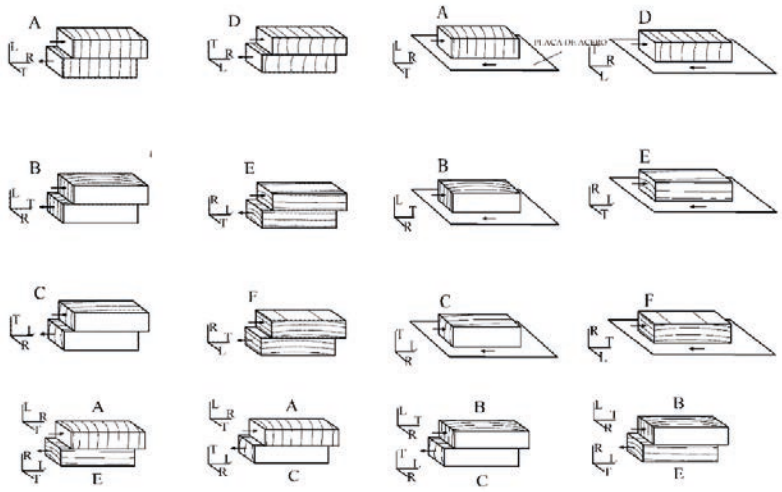


Figura 1. Pares de rozamiento ensayados según la ortotropía de la madera (L - sentido longitudinal o eje del árbol, R - radial según el radio de los anillos de crecimiento, T - tangencial a los anillos de crecimiento) e indicando la dirección de deslizamiento. Parcialmente tomada de [2–4].

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de los ensayos de rozamiento madera – madera al 18%, iguales orientaciones.

La figura 2, muestra los gráficos más representativos de variación del coeficiente de rozamiento frente al desplazamiento para los ensayos realizados enfrentando superficies con iguales orientaciones y direcciones de rozamiento con un contenido de humedad del 18%.

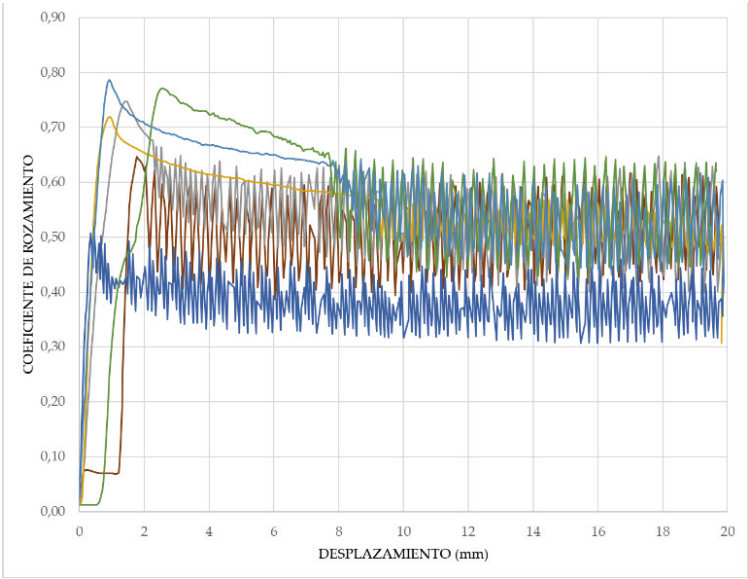


Figura 2. Ejemplos representativos de variación del coeficiente de rozamiento para secciones con igual orientación en ambos especímenes: AA; BB; CC; DD; EE; FF

En la figura 2 se aprecia que las oscilaciones del gráfico, fenómeno conocido como *stick–slip*, disminuyen respecto a menores humedades, algo también apreciado por [8,16]. El proceso de deslizamiento se lleva a cabo de manera continua sobre la trayectoria de fricción, la fuerza horizontal cae parabólicamente al menos en un tramo inicial. La tabla 1 recoge los resultados obtenidos para los distintos cortes y direcciones de fricción con pares de rozamiento de igual orientación y una humedad de la madera del 18%.

Tabla 1. Coeficientes de rozamiento entre caras de igual orientación para un 18% de humedad

Media (CoV %)	A- A	B- B	C- C	D- D	E- E	F- F
μ_e	**0.67**	**0.71**	**0.68**	**0.78**	**0.54**	**0.73**
	(15.3)	**(11.4)**	**(14.4)**	**(8.2)**	**(25.1)**	**(9.9)**
μ_c	**0.42**	**0.47**	**0.49**	**0.56**	**0.46**	**0.54**
	(4.8)	**(12.7)**	**(12.9)**	**(16.7)**	**(29.3)**	**(24.6)**

De los resultados recogidos en la tabla 1, y los obtenidos para estas mismas orientaciones en trabajos previos de los autores, se aprecia que el efecto del contenido de humedad resulta de mayor importancia que la orientación de las secciones ensayadas, tanto para el rozamiento estático como para el dinámico, algo también apreciado por otros autores [8]. Así, el coeficiente de variación (CoV) para las diferentes direcciones resultó estar en el 12%.

La media global sin considerar orientaciones es de 0.69 para el coeficiente estático y 0.48 para el dinámico lo que supone un incremento respecto a los valores al 12% de humedad en torno a un 50%. Los coeficientes de variación (CoV) en cada par de rozamiento ensayado descendieron apreciablemente, en la mayoría de los casos más de 15 puntos respecto a los ensayos al 12%, lo cual tendría relación con la menor variabilidad que una mayor humedad en las caras en contacto produce en el rozamiento. La relación μ_c/μ_e resulto ser de media 0.72, cercano al obtenido al 12%.

3.2 Resultados de los ensayos de rozamiento madera – madera distintas orientaciones

La figura 3, muestra los gráficos más representativos de variación del coeficiente de rozamiento frente al desplazamiento para los ensayos realizados enfrentando distintas orientaciones de las superficies y direcciones de rozamiento para una humedad del 18%.

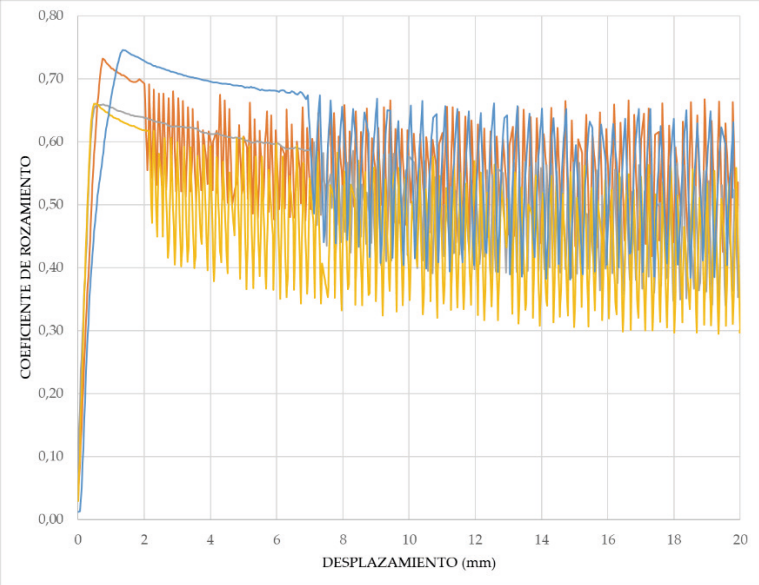


Figura 3. Ejemplos representativos de variación del coeficiente de rozamiento en secciones combinadas para un contenido de humedad del 18%: — AC; — AE; — BC; — BE

Similares comentarios a los gráficos de la figura 2 se pueden realizar para la figura 3, el comportamiento de los pares ensayados es similar en cuanto a las gráficas desplazamiento - coeficiente de rozamiento que el apreciado en casos de igual orientación.

La tabla 2 recoge la totalidad de resultados obtenidos para los distintos cortes y direcciones de fricción con pares de rozamiento de distinta orientación y una humedad del 18%.

Tabla 2. Coeficientes de rozamiento combinando orientación de caras para 18% de humedad

Media (CoV %)	**A- C**	**A- E**	**B- C**	**B- E**
μ_e	**0.70**	**0.65**	**0.64**	**0.7**
	(18.1)	**(15.6)**	**(9.9)**	**(10.3)**
μ_c	**0.48**	**0.45**	**0.43**	**0.5**
	(25.7)	**(13.6)**	**(14.3)**	**(20.7)**

De los resultados recogidos en la tabla 2, se puede apreciar, al igual que en el apartado anterior, un incremento de valores respecto al 12% de humedad, un 42% más para el coeficiente estático con un valor medio de 0.67, y un 30% más para el dinámico, de valor medio 0.47, lo que constituye un incremento algo inferior al observado para iguales direcciones.

Los valores medios globales resultan muy similares a los obtenidos para igual orientación al 18%, sin destacar ningún incremento en un par en concreto, lo que manifiesta el efecto uniformizador del incremento de humedad. Los casos A-C y B-E son los que presentan los mayores valores, como ya ocurría al 12%. Tampoco ahora se aprecia una relación directa entre

los valores más altos en la tabla 2 con las orientaciones que han dado valores superiores friccionando contra sí mismas. La relación μ_c / μ_e resultó 0.69, lo que resulta en un valor similar al obtenido para caras de igual orientación en este contenido de humedad.

El CoV en cada par de rozamiento ensayado descendió respecto al 12% de humedad al igual que ocurrió con los pares de igual orientación y se mantuvieron del mismo orden a los obtenidos para este contenido de humedad (18%) en caras con igual orientación.

3.3. Resultados de los ensayos de rozamiento madera – acero

La figura 4 recoge gráficos representativos para cada corte y dirección de rozamiento según la disposición de la probeta de madera en relación con la chapa de acero.

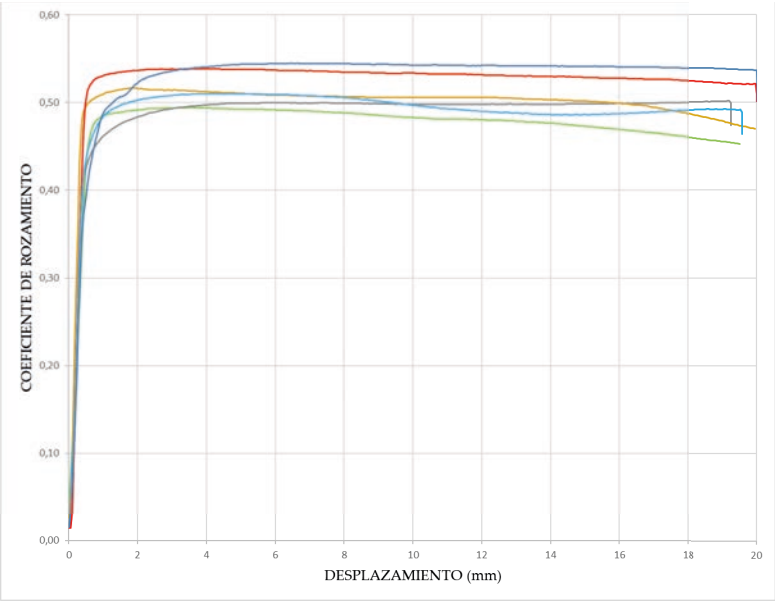


Figura 4. Ejemplos representativos de variación del coeficiente de rozamiento frente al acero a humedad de la madera del 18%: — A-Ac; — B-Ac; — D-Ac; — C-Ac; — E-Ac; — F-Ac

Se aprecia en la gráfica de la figura 4 la ausencia del fenómeno *stick-slip* lo que concuerda con lo apreciado por otros autores, [8,17], igualmente, al aumentar la humedad no existe una inflexión fuerte en el inicio del desplazamiento como también recogen dichos autores. La forma de los gráficos obtenidos concuerda con [18] en su "tipo B" donde la fuerza horizontal toma forma de parábola plana con trayectoria de fricción progresiva que disminuye ligeramente o en algunos casos, se mantiene después de alcanzar la carga máxima, de modo que el valor de fricción de deslizamiento es mayor un poco después de iniciarse éste, como también se aprecia en la figura 4.

La tabla 3 muestra los valores medios para los coeficientes de rozamiento estático y dinámico junto con el coeficiente de variación (CoV) que se ha apreciado en los ensayos madera - acero con una humedad de los especímenes de madera del 18%.

Tabla 3. Valores del coeficiente de rozamiento para los distintos cortes y direcciones de fricción sobre acero.

Media (CoV %)	A- Ac	B- Ac	C- Ac	D- Ac	E- Ac	F- Ac
μ_e	0.484	0.493	0,546	0,531	0,536	0,518

	(2.5)	**(6.1)**	**(4.6)**	**(3.2)**	**(4.9)**	**(4.4)**
μ_c	**0.446**	**0.476**	**0,532**	**0,519**	**0,529**	**0,503**
	(7.2)	**(7.2)**	**(7.2)**	**(3.1)**	**(5.2)**	**(5.3)**

De los resultados recogidos en la tabla 3 se deduce un valor medio estático de 0.52 y dinámico de 0.5 con un CoV respecto a las distintas orientaciones de la madera de 6% y 7% respectivamente. Los CoV dentro de cada orientación son bajos y se reducen apreciablemente respecto a madera al 12% de humedad, cuya explicación también se encuadra en el efecto uniformizador del acero en conjunción con la mayor humedad en la superficie de contacto.

De los valores anteriores se deducen dos aspectos principales, en primer lugar, el elevado aumento de los coeficientes de rozamiento tanto estáticos como dinámicos respecto a los pares acero-madera al 12% de humedad, de un 173% para el estático y de un 194% para el dinámico, siendo especialmente el dinámico el que aumenta más al igualarse al valor estático. Este elevado incremento supera ampliamente al apreciado con el mismo incremento de humedad en pares madera-madera lo que parece indicar que ante un rozamiento con una superficie muy lisa como el acero la humedad de la madera cobra una importancia mucho más elevada en el coeficiente de rozamiento. En segundo, la importante reducción del CoV al incluir como una de las superficies el acero respecto al rozamiento madera-madera como ya aconteció al 12%.

La relación μ_c/μ_e resultó de media 0.97, lo que representa numéricamente el comportamiento observado con la trayectoria de parábola plana sin apenas disminución del valor del coeficiente durante el deslizamiento.

4. Conclusiones

En este trabajo se estudió el coeficiente de rozamiento de madera aserrada de castaño a una humedad del 18 % permitiendo conocer su valor en clase de servicio II, situación muy común en estructuras de madera.

Los coeficientes, tanto estáticos μ_e , como dinámicos μ_c , experimentaron un crecimiento con el aumento de humedad, en particular con respecto al 12% asociada a clase de servicio I. Los valores obtenidos fueron μ_e =0.68 y μ_c =0.47 en el caso de rozamiento entre madera y μ_e =0.52 y μ_c =0.5 en el caso de rozamiento de madera con acero. Su crecimiento fue cercano a un 50% en el caso de rozamiento entre madera y más de un 170% en el caso de rozamiento de madera con acero con respecto al 12% de humedad.

El comportamiento fue tal que en los gráficos de rozamiento madera- madera la oscilación o fenómeno *stick-slip* disminuyó con el aumento de humedad, llegando incluso a desaparecer en tramos iniciales del ensayo. No obstante, se siguió detectando un claro máximo inicial y posterior disminución, esta ha sido menor que la apreciada al 12% con valores μ_c/μ_e mayores.

En el caso de rozamiento madera - acero, el comportamiento resultó en la ausencia total del fenómeno *stick-slip*, que sí estaba presente en el 12%, y sobre todo se apreció la ausencia de máximo al inicio del deslizamiento y el mantenimiento o ligera elevación del coeficiente de rozamiento ya con movimiento relativo, en este caso la relación μ_c/μ_e resultó ser elevada, 0,97.

La poca bibliografía existente en cuanto a rozamiento a estas humedades de la madera, en particular para frondosas y el castaño, más elevadas que la estándar en ensayos del 12% hace difícil la comparación, pero los valores obtenidos se encuentran en lo razonable y acordes con otros autores.

Este nuevo punto de humedad permite conocer el valor por encima del 16% para la tabla de rozamiento que recoge el Eurocódigo 5 parte 2, así como interpolar entre valores de humedad 12 - 18%. Esto último será objeto de nuevos estudios para verificar la linealidad que propone la

bibliografía en la variación de las propiedades mecánicas de la madera y en concreto del coeficiente de rozamiento.

Referencias

1. CEN EN 1995-2:2016 *Eurocode 5 : Design of timber structures - Part. 2. Bridges*; European Committee for Standardisation: Brussels, Belgium, 2016;

2. Villar-García, J.R.; Rodríguez, A.J.C.; Moya Ignacio, M.; Vidal López, P. Determinación de los coeficientes de rozamiento en piezas de madera de castaño de procedencia española y su aplicación estructural. In Proceedings of the X Congreso Ibérico de AgroIngeniería; Universidad de Zaragoza, 2019; pp. 88–98.

3. Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Corbacho, A.J.; Moya, M. Determination of the friction coefficients of chestnut (Castanea sativa Mill.) sawn timber. *Int. Agrophysics* **2020**, *34*, 65–77, doi:10.31545/intagr/112270.

4. Villar-García, J.R.; Vidal-López, P.; Rodríguez-Robles, D.; Moya Ignacio, M. Friction Coefficients of Chestnut (Castanea sativa Mill.) Sawn Timber for Numerical Simulation of Timber Joints. *Forests* **2022**, *13*, doi:10.3390/f13071078.

5. Argüelles, R.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Iñíguez, G.; Argüelles Bustillo, R. *Timber Structures. Basis for Calculation (in Spanish)*; AITIM. Technical Research Association of the Wood and Cork Industries: Madrid. Spain, 2013; ISBN 978-84-87381-44-7.

6. Blass, H.J. *Timber Engineering STEP 1*; Centrum Hout, The Netherlands: The Netherlands, 1995;

7. Argüelles, R.; Arriaga, F.; Esteban, M.; Iñíguez, G.; Argüelles Bustillo, R. *Timber Structures. Joints (in Spanish)*; AITIM. Technical Research Association of the Wood and Cork Industries: Madrid, Spain, 2015; ISBN 9788487381485.

8. Fu, W.; Guan, H.; Chen, B. Investigation on the Influence of Moisture Content and Wood Section on the Frictional Properties of Beech Wood Surface. *Tribol. Trans.* **2021**, *64*, 830–840, doi:10.1080/10402004.2021.1926029.

9. USDA Forest Products Laboratory *Wood handbook : wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190*; Madison, WI, USA, 2010;

10. McKenzie, W.M.; Karpovich, H. The frictional behaviour of wood. *Wood Sci. Technol.* **1968**, *2*, 139–152, doi:10.1007/BF00394962.

11. Dorn, M.; Habrova, K.; Koubek, R.; Serrano, E. Determination of coefficients of friction for laminated veneer lumber on steel under high pressure loads. *FRICTION* **2021**, *9*, 367–379, doi:10.1007/s40544-020-0377-0.

12. ASTM International ASTM G115-10(2018) *Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients*; Am. Soc. Testing Materials: West Conshohocken, PA, USA, 2018;

13. Villar García, J.R.; Vidal López, P. y; Moya Ignacio, M. Device to perform friction tests between solid bodies. Utility Model U 201932027 2020.

14. Aira, J.R.; Arriaga, F.; Iniguez-Gonzalez, G.; Crespo, J. Static and kinetic friction

coefficients of Scots pine (Pinus sylvestris L.), parallel and perpendicular to grain direction. *Mater. Constr.* **2014**, *64*, doi:10.3989/mc.2014.03913.

15. Crespo, J.; Regueira, R.; Soilan, A.; Díez, M.R.; Guaita, M. Methodology to determine the coefficients of both static and dynamic friction apply to different species of wood. In Proceedings of the Proceeding of the 1st Ibero-Latin American Congress on wood in construction. CIMAD 11. June 2011; Coimbra, Portugal, 2011.

16. Berman, A.D.; Ducker, W.A.; Israelachvili, J.N. Experimental and Theoretical Investigations of Stick-Slip Friction Mechanisms. In *Physics of Sliding Friction*; Persson, B.N.J., Tosatti, E., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, 1996; pp. 51–67 ISBN 978-94-015-8705-1.

17. Xu, M.; Li, L.; Wang, M.; Luo, B. Effects of Surface Roughness and Wood Grain on the Friction Coefficient of Wooden Materials for Wood–Wood Frictional Pair. *Tribol. Trans.* **2014**, *57*, 871–878, doi:10.1080/10402004.2014.920064.

18. Mohler, K.; Herroder, W. Range of the coefficient of friction of spruce wood rough from sawing. *HOLZ ALS ROH-UND Werkst.* **1979**, *37*, 27–32, doi:10.1007/BF02614998.

Evaluación del proceso cíclico en los tableros sin adhesivos elaborados con tronco de palmera canaria (*Phoenix canariensis*)

M. Ferrández-Villena[1], A. Ferrández-García[1], B.E. Ferrández-García[1], T. García-Ortuño[1], M.T. Ferrández-García[1]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. Orihuela-Beniel, km 3,2, 03312, Orihuela (Alicante). España, m.ferrandez@umh.es (M.F.-V.); antonio.ferrandezg@umh.es (A.F.-G.); bferrandez@umh.es (B.E.F-G); tgarcia@umh.es (T.G.-O.); mt.ferrandez@umh.es (M.T.F.-G.)

Abstract: The use of by-products of agricultural and forestry activity, besides many other environmental benefits, constitutes an alternative source of income or cost reduction and supports the principles of circular economy. In the southeast of Spain, the Canary Islands palm (*Phoenix canariensis*) is widely used in the urban landscape. The plantations affected by the pest the red palm weevil generate numerous plant residues that must be triturated and transferred to authorized landfills. The aim of this study was the utilization of particles from the trunk of the Canary Island palm tree in the manufacture of particleboards without using any adhesives, achieving an ecological product that would benefit the environment. In the manufacturing of these boards 3 particle sizes were used (<0.25, 0.25-1 and 1-2 mm) with a temperature of 110ºC, and a pressure of 2.6 MPa. In its production a cyclical process was used with up to 4 repetitions of 7 minutes pressing time. As a result, the manufactured boards with the particles size less than 0.25 mm and 3 and 4 cycles of 7 minutes in the hot plate press applied can be classified as grade P2, according to European standards. In addition, the boards had a good thermal performance, so they could be used as interior walls of buildings (vertical and horizontal) without the need of cladding.

Palabras clave: composite, paneles, propiedades mecánicas, físicas y térmicas.

1. Introducción

La renovación y construcción de edificios, al tiempo que se reduce el potencial de calentamiento global, se puede abordar en parte mediante el uso de materiales de bajo impacto ambiental, como los materiales de base biológica. El aprovechamiento de subproductos de la actividad agrícola y forestal, aparte de otros muchos beneficios ambientales, constituye una

fuente alternativa de ingresos o de reducción de gastos y un apoyo a los principios de economía circular. Desde el punto de vista técnico, las plantas no madereras ofrecen una gran variedad de cualidades en sus fibras y explotadas de forma adecuada pueden emplearse en el desarrollo de materiales sustitutos de la madera con propiedades innovadoras.

La agricultura genera residuos que actualmente no se gestionan adecuadamente en términos de medio ambiente y economía. Más allá de reducir y reciclar los desechos, los coproductos y subproductos agrícolas, puede haber oportunidades para nuevos procesos que permitan usos innovadores de tales residuos.

El picudo rojo (*Rhynchophorus ferrugineus*) invadió los estados del Golfo Pérsico a mediados de la década de 1980, causando graves daños a las palmeras [1]. La naturaleza del cultivo, junto con el transporte del material de siembra, han ayudado al rápido desarrollo y la propagación de la plaga en un corto período de aproximadamente una década, afectando a más de 60 países de Europa, África y Oriente Medio. Normalmente conduce a la muerte a la palmera, si no se adoptan medidas curativas oportunas. Sin embargo, a menudo no es posible tomar medidas curativas al inicio del ataque, ya que la detección en la infestación en la etapa temprana es difícil [2]. En el sureste de España, las palmeras se utilizan ampliamente en el paisaje urbano, como en la mayoría de los países que rodean el mar Mediterráneo y la palmera canaria (*Phoenix canariensis*) es de las especies más abundantes en la zona. De esta forma, las numerosas plantaciones afectadas por la plaga del picudo rojo generan numerosos residuos vegetales que deben ser triturados y trasladados a vertederos autorizados. La utilización de estos deshechos puede contribuir a la adopción de soluciones sostenibles para el control y erradicación de especímenes contaminados y producir una mejora ambiental.

Se han realizado varias investigaciones centradas en la fabricación de materiales de construcción utilizando diferentes residuos de palmera. Se han estudiado tableros de partículas utilizando fibras o astillas de palmera de washingtonia [3–5], palmera canaria [5–6], palmera datilera [5, 7–9] y palmera de aceite [10-12]. Se han realizado otros trabajos empleando residuos de la poda de la palmera como refuerzo en el yeso [13], en el hormigón [14-15] y en la fabricación de diferentes compuestos [16–17].

La mayoría de los adhesivos de madera actuales como resinas a base de formaldehído, resinas de acetato de vinilo y resinas a base de isocianato están compuestos por diversos materiales derivados de recursos fósiles. Los adhesivos de madera se han desarrollado en la industria petroquímica y tienen un excelente rendimiento, buenas propiedades de trabajo y son económicamente satisfactorios. Sin embargo, se cree que el uso de los adhesivos de madera actuales será inevitablemente restringido en el futuro debido a las disminuciones en las reservas de recursos fósiles. Debido a este problema, hay un elevado interés relacionado con la fabricación de tableros libres de formaldehído que ha dado lugar a un aumento de la presión sobre los productores de tableros aglomerados para dejar de usar estos aglutinantes. En este sentido, se han realizado estudios sobre tableros de partículas con resinas y adhesivos naturales para sustituir a las resinas sintéticas, tales como proteínas, ligninas, taninos, glútenes, almidones, ácido cítrico, etc. [4, 18-21].

Actualmente las investigaciones con biomasa vegetal se dirigen a obtener tableros de partículas sin adhesivos con diferentes tratamientos previos, estando ampliamente demostrada la capacidad de auto-unión que tienen las fibras naturales cuando se produce la temperatura de transición vítrea.

Es posible procesar tableros de partículas sin la adición de aglutinantes, gracias a la acción del agua (solubilización de moléculas), temperatura y presión que permiten que las partículas se aglomeren entre sí [22]. Las paredes celulares de las partículas vegetales están compuestas principalmente por una mezcla de macromoléculas orgánicas (pectinas, celulosa, hemicelulosas, lignina, ceras, almidón, proteínas, compuestos aromáticos, etc.) y una minoría de moléculas

minerales como las cenizas. Por tanto, las paredes celulares pueden considerarse como compuestos bioquímicamente complejos. Las moléculas de celulosa, hemicelulosas y pectinas son polisacáridos (polímeros de carbohidratos) con funciones hidrófilas. Los compuestos solubles en agua generalmente corresponden a pectinas y pequeñas moléculas solubles. Las proporciones de macromoléculas orgánicas varían según la especie botánica y la ubicación en la planta.

Por ejemplo, la médula de girasol se destaca de las demás con una proporción de compuestos solubles en agua superior al 50% [23].

El tamaño y la forma de la partícula pueden tener mucha influencia sobre las propiedades de los tableros sin adhesivos [24], por tanto, el determinar el rango de tamaño de las partículas es un parámetro importante para mejorar su unión.

Teniendo en cuenta la necesidad de nuevos materiales a partir de la reutilización de residuos, el presente trabajo tiene como objetivo la fabricación y evaluación de tableros de aglomerado de partículas del tronco de palmera canaria sin el empleo de adhesivos, con el fin de conseguir un producto ecológico y biodegradable.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

La biomasa de palmera canaria se obtuvo de palmeras de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Los troncos de palmera se cortaron, después se trocearon y se mantuvieron al aire libre para su secado durante 6 meses. Posteriormente se trituraron en una desfibradora de cuchillas y empleando una tamizadora vibradora se seleccionaron tres tamaños de partículas (<0,25, 0,25-1 y 1-2 mm) (figura 1). Las partículas tenían una humedad relativa inicialmente del 55% por lo que se dejaron secar al aire durante 3 meses más hasta que se alcanzó una humedad relativa del 9%. El agua se tomó directamente de la red de agua potable con una temperatura media de 20ºC.



Figura 1. Troncos de palmera infestadas con el picudo rojo y partículas de palmera con tamaño de partícula 0,25 y 1 mm.

2.2. Proceso de fabricación

Inicialmente se formó la manta del tablero con 1,50 kg de partículas de cada tipo en un molde de dimensiones 600 x 400 mm. Posteriormente se pulverizó sobre la superficie un 10% en peso de agua en función del peso de las partículas, removiéndola de forma manual para su homogeneización durante 5 minutos. Después se introdujeron en una prensa de platos calientes con una temperatura de 110ºC, una presión de 2,6 MPa empleando 7 minutos para el prensado empleando un proceso cíclico en su elaboración con hasta 4 repeticiones, adicionando un 10% de agua sobre las 2 caras antes del siguiente ciclo.

Los tableros eran de una sola capa con un espesor aproximado de 7 mm. Se elaboraron 3 paneles de cada tipo (ver figura 2). Las características de los tableros fabricados son las que se indican en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de tableros fabricados

Tipo de tablero	Nº de tableros	Tamaño de partícula de palmera (mm)	Tiempo (min)	Ciclos	Temperatura (ºC)	Presión (MPa)
A1	4	< 0,25	7	1	110	2,6
A2	4	< 0,25	7+7	2	110	2,6
A3	4	< 0,25	7+7+7	3	110	2,6
A4	4	< 0,25	7+7+7+7	4	110	2,6
B1	4	0,25 a 1,00	7	1	110	2,6
B2	4	0,25 a 1,00	7+7	2	110	2,6
B3	4	0,25 a 1,00	7+7+7	3	110	2,6
B4	4	0,25 a 1,00	7+7+7+7	4	110	2,6
C1	4	1,00 a 2,00	7	1	110	2,6
C2	4	1,00 a 2,00	7+7	2	110	2,6
C3	4	1,00 a 2,00	7+7+7	3	110	2,6
C4	4	1,00 a 2,00	7+7+7+7	4	110	2,6



Figura 2. Tableros de partículas de palmera canaria fabricados

Posteriormente, se cortaron las probetas para realizar los ensayos necesarios para la caracterización de las propiedades mecánicas y físicas de cada uno de los 20 tableros sometidos a estudio con las dimensiones adecuadas según indican las normas europeas [25].

Antes de proceder a los ensayos las probetas se acondicionaron en una cámara de conservación de JP Selecta (modelo Medilow-L, Barcelona, España) a una temperatura de 20º C durante 24 h y una humedad relativa del 65%.

Se han determinado y evaluado las propiedades de los tableros de partículas de madera aplicando las normas europeas vigentes [26,27]. Se ha medido la densidad [28], la absorción de agua y el hinchamiento en espesor tras 2 y 24 horas de inmersión en agua [29], el módulo de elasticidad a flexión (MOE) y el módulo de ruptura a flexión (MOR) [30] y la cohesión interna o resistencia a tracción (IB) [31] y la conductividad térmica [32].

Se ha empleado un medidor de humedad de laboratorio marca Imal (Modelo 200, Modena, Italia) para obtener el contenido de humedad y se utilizó un depósito calefactado a una temperatura del agua de 20ºC para realizar la prueba de inmersión en agua.

Los ensayos mecánicos se realizaron en una máquina de prueba universal Imal (Modelo IB600, Módena, Italia) y los ensayos de conductividad térmica se realizaron en un instrumento medidor de flujo de calor (NETZSCH Instruments Inc., Bulington, MA, USA).

Se ha empleado el software SPSS v.28 (IBM, Chicago, IL, EE. UU.) para realizar el análisis estadístico de la varianza (ANOVA) para un nivel de significancia de α <0.05.

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades físicas y térmicas

Los resultados de la densidad, el hinchamiento en espesor, la absorción de agua y la conductividad térmica de los tableros fabricados se muestran en la tabla 2.

Table 2. Resultados medios de las propiedades físicas**.**

Tipo de Tablero	Densidad (kg/m³)	TS2h (%)	TS24h (%)	WA24h (%)	WA2h (%)	Conductividad Térmica (W/m·K)
A1	882,32 (11,16)	45,65 (1,89)	58,78 (2,27)	63,57 (0,12)	84,10 (4,87)	0,075 (0,003)
A2	873,70 (28,63)	29,21 (2,28)	41,78 (1,27)	51,54 (4,70)	67,31 (0,64)	0,068 (0,004)
A3	1.102,27 (26,07)	20,07 (1,94)	28,47 (2,49)	39,72 (1,27)	59,09 (1,29)	0,068 (0,003)
A4	1.093,41 (61,32)	15,63 (3,61)	20,69 (0,62)	37,43 (13,75)	54,50 (8,69)	0,067 (0,004)
B1	840,98 (37,73)	19,13 (1,92)	38,73 (1,48)	61,57 (5,92)	94,48 (5,38)	0,070 (0,002)
B2	852,29 (68,66)	25,37 (10,30)	39,68 (9,61)	55,30 (10,69)	74,98 (7,75)	0,070 (0,001)
B3	935,46 (16,60)	16,02 (1,.65)	29,05 (3,61)	37,52 (8,11)	75,46 (10,71)	0,060 (0,003)
B4	999,01(53,90)	20,95 (10,42)	34,37 (20,90)	37,32 (7,91)	66,10 (11,19)	0,061 (0,002)
C1	750,94 (36,08)	16,70 (1,69)	21,60 (1,84)	63,96 (4,51)	89,20 (5,19)	0,064 (0,004)
C2	822,18 (62,91)	34,98 (6,.24)	43,21 (4,89)	59,30 (13,72)	81,53 (3,88)	0,062 (0,004)
C3	1.056,08 (40,64)	20,33 (4,53)	27,69 (6,41)	39,52 (7,78)	52,82 (7,73)	0,060 (0,003)
C4	1.031,50 (37,97)	21,31 (3,32)	30,85 (1,43)	38,39 (5,73)	54,57 (2,49)	0,061 (0,002)

TS: hinchamiento en espesor. WA: absorción de agua. (..): desviación estándar.

Los tableros tienen una densidad comprendida entre 750,94 kg/m³ y 1.093,41 kg/m³, por lo que se pueden clasificar como media-alta, lo que está en concordancia con otros tableros de partículas sin aglutinantes obtenidos por otros autores. Más tiempo en la prensa de platos calientes da como resultado una mayor densidad.

Lógicamente los paneles sometidos a mayor tiempo en prensa ofrecen mejores resultados de hinchazón en espesor (TS) y absorción de agua (WA), aunque los parámetros obtenidos no permiten clasificar estos tableros de tipo P3 (tableros no estructurales para uso en ambiente húmedo) [27], ya que se debe conseguir un límite de 17% TS 24h.

La conductividad térmica de los paneles oscila entre 0,060 y 0,075 W/m·K. Estos son buenos resultados en comparación con los tableros de partículas comerciales [33] con valores comprendidos entre 0,180 y 0,070 W/m·K (según su densidad) y similares a los tableros de corcho con 0,065 W/m·K.

3.2. Propiedades mecánicas

Según los estándares europeos [27], los requisitos mínimos para usos generales en ambiente seco son un valor MOR de 10,5 N/mm² y un valor IB de 0,28 N/mm² (grado P1). Un valor MOR de 11,0 N/mm², un valor MOE de 1.800 N/mm² y un valor IB de 0,40 N/mm² son los requisitos mínimos para la fabricación de muebles (grado P2). Para la carga (grado P3), los valores de MOR, MOE e IB son 15,0 N/mm², 2.050 N/mm² y 0,45 N/mm², respectivamente.

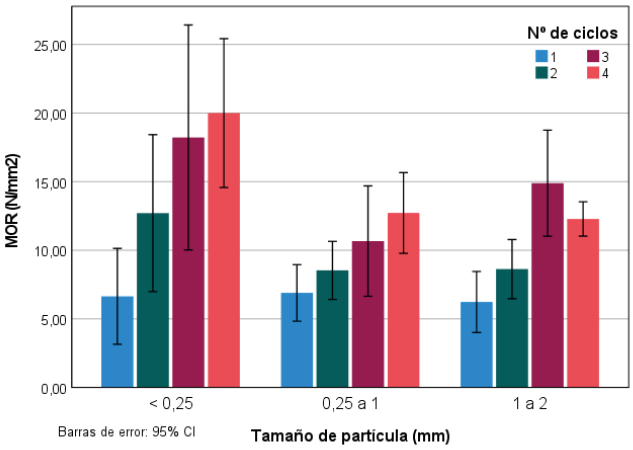


Figura 1.- Módulo de ruptura (MOR)

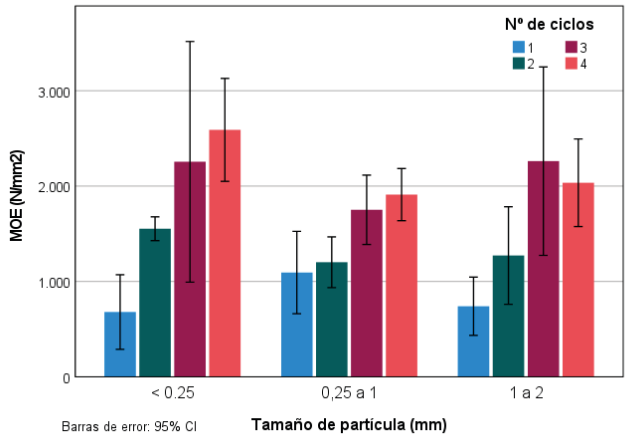


Figura 2.- Módulo de elasticidad (MOE)

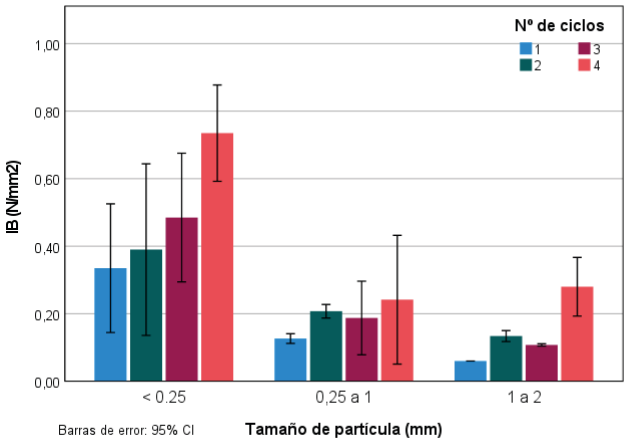


Figura 3.- Cohesión interna o resistencia a tracción (IB)

Las mejores prestaciones mecánicas (figuras 2, 3 y 4) se consiguen con el menor tamaño de partícula y para 4 ciclos de prensado (tablero de tipo A4) con un MOR de 20.0 N/mm², un MOE de 2.589,8 N/mm² y una IB de 0,74 N/mm².

Los tableros A3 y A4 podrían ser clasificado como P2. No pueden ser clasificado como P3, porque no alcanza el mínimo valor TS 24h exigido por lo que sería recomendable utilizar algún producto hidrófugo como los que se emplean en la industria de la madera para poder alcanzar esta clasificación. Todas las propiedades mecánicas dependen del tamaño de partícula.

Según el análisis realizado por varios investigadores [8,34], uno de los factores más importantes para la elaboración de los tableros es el tamaño de partícula, concluyendo en la misma línea que en este trabajo donde se alcanzan las mejores propiedades mecánicas con un menor tamaño de partícula.

Pintiaux et al. [35] indican que para fabricar tableros de fibras vegetales con otros adhesivos ecológicos (taninos, lignina, etc) hacen falta altas temperaturas, superiores a 180ºC, en cambio en este trabajo se han obtenido tableros de partículas de la palmera canaria con temperaturas de 110ºC que podrían ser empleados según se refleja en las especificaciones de las normas europeas [27].

4. Conclusiones

En este trabajo se han analizado las propiedades mecánicas, físicas y térmicas del tablero de partículas del tronco de palmera canaria, llegando a la conclusión de que empleando un proceso de fabricación con temperatura de prensado baja se pueden fabricar tableros de partículas a partir de materiales biodegradables. Este tablero de partículas podría sustituir los materiales tradicionales de madera utilizados en la construcción, contribuyendo a una reducción de la deforestación.

Todas las propiedades analizadas: densidad, TS, WA, MOR, MOE, IB y Conductividad térmica dependen del tamaño de partícula utilizada. Para obtener tableros más resistentes se deberían emplear tamaños de partículas pequeños, sin embargo, para conseguir tableros con mejores prestaciones térmicas se deberían utilizar partículas de gran tamaño. Por tanto, en futuros trabajos se deberían ensayar tableros de dos o tres capas para intentar combinar ambas aplicaciones.

Los tableros tipo A3 y A4 pueden ser clasificados de grado P2 (tableros no estructurales para uso en interior) y presentan buenas prestaciones térmicas por lo que podrían ser empleados como cerramientos interiores de los edificios (verticales y horizontales) sin necesidad de recubrimientos. En futuras investigaciones se podría emplear algún producto hidrófugo o buscar dosificaciones que consiguieran tableros con las propiedades adecuadas para ser empleados en el exterior.

El uso de los residuos del tronco de la palmera canaria para producir materiales duraderos como los tableros de partículas podría ser beneficioso para el medio ambiente, ya que ayuda a disminuir la contaminación atmosférica y reduce la cantidad de residuos que terminan en los vertederos.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (RD 786/2022 de 27 de septiembre) como contribución al Plan Vega Renhace en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

Referencias

115. Murphy, S. T., Briscoe, B. R. The red palm weevil as an alien invasive: biology and the prospects for biological control as a component of IPM. *Biocontrol News Inf.* **1999**, *20*, 35-46.
116. Ferry, M., Gomez, S. The red palm weevil in the Mediterranean area. *Palms*. **2002**, *46(4)*, 172-178.
117. Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez Garcia, M.T.; Andreu Rodriguez, J.; Ferrandez Garcia, C.E.; Ferrandez-Villena, M. Evaluating the properties of palm particle boards (Washingtonia robusta H. Wendl). In Proceedings of the 6th Iberian Congress of Agroengineering, September 2011; Sociedad Española de Agroingeniería: Evora, Portugal; pp. 126–130, ISBN 978-972-778-113-3.
118. Ferrandez-Garcia, M. T.; Ferrandez-Garcia, A.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, C. E.; Ferrandez-Villena, M. Influence of particle size on the properties of boards made from Washingtonia palm rachis with citric acid. *Sustainability*. 2020, 12(12), 4841.
119. Ferrandez-Garcia, C. E.; Ferrandez-Garcia, A.; Ferrandez-Villena, M.; Hidalgo-Cordero, J. F.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, M. T. Physical and mechanical properties of particleboard made from palm tree prunings. *Forests*. **2018**, *9(12)*, 755.
120. Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, M.T.; Andreu-Rodriguez, J.; Ferrandez-Garcia, C.E.; Ferrandez-Villena, M. Valorization of pruning residues: The use of Phoenix canariensis to elaborate eco-friendly particleboards. In Structures and Environmental Technologies. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012, Valencia, Spain, 8–12 July 2012; Federación de Gremios de Editores de España: Madrid, Spain, 2012; ISBN 978-84-615-9928-8.
121. Amirou, S.; Zerizer, A.; Pizzi, A.; Haddadou, I.; Zhou, X. Particleboards production from date palm biomass. *Eur. J. Wood Wood Prod*. **2013**, 71, 717–723.
122. Hegazy, S.; Ahmed, K.; Hiziroglu, S. Oriented strand board production from water-treated date palm fronds. *BioResources* **2015**, *10*, 448–456.
123. Hegazy, S.; Ahmed, K. Effect of date palm cultivar, particle size, panel density and hot water extraction on particleboards manufactured from date palm fronds. *Agriculture* **2015**, *5*, 267–285.
124. Or, K. H.; Putra, A.; Selamat, M. Z. Oil palm empty fruit bunch fibers as sustainable acoustic material. Proceedings of Mechanical Engineering Research Day 2015 (MERD'15), Melaka, Malasya, 31-March, **2015**, 99-100.
125. Kerdtongmee, P.; Saleh, A.; Eadkhong, T.; Danworaphong, S. Investigating Sound Absorption of Oil Palm Trunk Panels Using One-microphone Impedance Tube. *BioResources*. **2016**, *11(4)*, 8409-8418.
126. Kalaivani, R.; Ewe, L. S.; Chua, Y. L.; Ibrahim, Z. The Effects of Different Thickness of Oil Palm Trunk (Opt) Fiberboard on Acoustic Properties. *Sci. Int*. **2017**, *29(5)*, 1105-1108.
127. Kriker, A.; Bali, B.; Debicki, G.; Bouziane, M.; Chabannet, M. Durability of date palm fibers and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cem. Concr. Compos*. **2008**, *30*, 639–648.
128. Ferrandez-Garcia, A.; Ferrandez-Villena, M.; Ferrandez-Garcia, C.E.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, M.T. Potential Use of Phoenix canariensis Biomass in Binderless Particleboards at Low Temperature and Pressure. *BioResources* **2017**, *12*, 6698–6712.
129. Braiek, A.; Karkri, M.; Adili, A.; Ibos, L.; Nasrallah, S.B. Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building. *Energy Build*. **2017**, *140*, 268–279.
130. Boumhaout, M.; Boukhattem, L.; Hamdi, H.; Benhamou, B.; Nouh, F.A. Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. *Constr. Build Mater*. **2017**, *135*, 241–250.
131. Bourmaud, A.; Dhakal, H.; Habrant, A.; Padovani, J.; Siniscalco, D.; Ramage, M.H.; Shah, D.U. Exploring the potential of waste leaf sheath date palm fibres for composite reinforcement through a structural and mechanical analysis. *Compos. Part A Appl*. **2017**, *103*, 292–303.
132. El-Wakil, N.A.; Abou-Zeid, R.E.; Fahmy, Y.; Mohamed, A.Y. Modified wheat gluten as a binder in particleboard made from reed. *J. Appl Polym. Sci*. **2007**, *106(6)*, 3592-3599.
133. Ciannamea, E.M.; Stefani, P.M, Ruseckaite, R.A. Medium-density particleboards from modified rice husks and soybean protein concentrate-based adhesives. *Bioresour. Technol*. **2010**, *101*, 818-825.
134. Wang, Z.; Gu, Z.; Hong, Y.; Cheng, L.; Li, Z. Bonding strength and water resistance of starch-based wood adhesive improved by silica nanoparticles. *Carbohydr. Polym*. **2011**, *86(1)*, 72-76.

135. Ferrandez-Garcia, M. T.; Ferrandez-Garcia, C. E.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, A.; Ferrandez-Villena, M. Experimental Evaluation of a New Giant Reed (Arundo Donax L.) Composite Using Citric Acid as a Natural Binder. *Agron*. **2019**, *9(12)*, 882.
136. Lenormand, H., Glé, P., Leblanc, N., 2017. Investigation of the acoustical and thermal properties of sunflower particleboards. Acta Acust united Ac. 103, 149–157.
137. Chabriac, P.A., Gourdon, E., Glé, P., Fabbri, A., Lenormand, H., 2016. Agricultural by products for building construction and modeling to predict micro-structural parameters. Constr. Build. Mater. 112, 158-167.
138. Widyorini, R.; Xu, J.; Umemura, K.; Kawai, S. Manufacture and properties of binderless particleboard from bagasse I: effects of raw material type, storage methods, and manufacturing process. *J. Wood Sci*. **2005**, *51(6)*, 648-654.
139. EN 326. Wood-based panels. In Sampling, Cutting and Inspection. Part 1: Sampling and Cutting of Test Pieces and Expression of Test; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1994.
140. EN 309. Particleboards. Definitions and classification. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
141. EN 312. Particleboards. Specifications. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2010.
142. EN 323. Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.
143. EN 317. Particleboards and fiberboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.
144. EN 310. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.
145. EN 319. Particleboards and fiberboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of de board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.
146. EN 12667. Thermal performance of building materials and products: Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods: Products of high and medium thermal resistance. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2001.
147. EN 13986 + A1. Wood-based panels for use in construction. Characteristics, evaluation of conformity and marking. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2015.
148. Ferrandez-Villena, M.; Ferrandez-Garcia, C. E.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, A.; Ferrandez-Garcia, M. T. The Influence of Processing and Particle Size on Binderless Particleboards Made from *Arundo donax* L. Rhizome. *Polymers*. **2020**, *12(3)*, 696.
149. Pintiaux, T.; Viet, D.; Vandenbossche, V.; Rigal, L.; Rouilly, A. Binderless materials obtained by thermo-compressive processing of lignocellulosic fibers: A comprehensive review. BioResources. **2015**, *10(1)*, 1915-1963.



Valoración de tableros de partículas de residuos de podas de morera (*Morus alba* L.)

M. Ferrández-Villena[1], A. Ferrández-García[1], B.E. Ferrández-García[1], T. García-Ortuño[1], M.T. Ferrández-García[1]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. Orihuela-Beniel, km 3,2, 03312, Orihuela (Alicante). España, m.ferrandez@umh.es (M.F.-V.); antonio.ferrandezg (A.F.-G.); bferrandez@umh.es (B.E.F-G); tgarcia@umh.es (T.G.-O.); mt.ferrandez@umh.es (M.T.F.-G.)

Abstract: Mulberry trees (Morus alba L.) are currently cultivated in Spain as ornamental and shade trees in urban landscaping. They are pruned once per year and their residues are removed in a landfill. Recent research aims to replace wood with agricultural waste, due to the scarcity of wood, and to valorize these residues. The objective of this study was to determine the physical and mechanical properties of particleboards made from mulberry pruning residues without using any binders. For the manufacturing process, a pressure of 2.6 MPa, three temperatures (110, 120 and 140ºC), two pressing times (30 and 60 minutes) were used, applying a cyclical process in its preparation with up to two repetitions. In addition, the properties of density, thickness swelling (TS), water absorption (WA), internal bounding strength (IB), modulus of rupture (MOR), and modulus of elasticity (MOE) were studied. The mechanical tests indicated that adequate MOR, MOE and IB values were obtained to be considered type P3 (non-structural boards for use in humid environments) as a construction material..

Palabras clave: residuos, paneles, propiedades mecánicas y físicas.

1. Introducción

La deforestación que se está produciendo en los bosques nos impulsa a buscar sustitutos adecuados de la madera, tanto para su empleo en derivados de celulosa como para su utilización en elementos de construcción. Entre las causas de estas pérdidas se señalan la expansión de los pastos y los cultivos, el desarrollo urbano y la producción de madera para usos industriales y combustibles.

Desde el punto de vista técnico, las plantas no madereras ofrecen una gran variedad de cualidades en sus fibras y explotadas de forma adecuada pueden emplearse en el desarrollo de materiales sustitutos de la madera con propiedades innovadoras.

La agricultura genera residuos que actualmente no se gestionan adecuadamente en términos de medio ambiente y economía. Más allá de reducir y reciclar los desechos, los coproductos y subproductos agrícolas, puede haber oportunidades para nuevos procesos que permitan usos innovadores de tales residuos.

La morera es una planta arbórea ampliamente cultivada en los países asiáticos. Morfológicamente es un árbol perenne, caducifolio, de rápido crecimiento y con un sistema de raíces profundas. La hoja de morera es el único alimento disponible para el gusano de seda *Bombyx mori* L. [1]. Además de la cría de gusanos de seda, la morera se puede utilizar para alimentación animal, frutas, medicinas, productos de papel, setas, jardinería, producción de gas, leña, madera y como protección contra incendios en tierras secas [2].

En España, la sericultura fue abandonada en la década de 1970 y las moreras (*Morus alba* L.), se cultivan actualmente como árboles ornamentales y de sombra en el paisajismo urbano. Estos árboles se podan una vez al año como mínimo. Estas podas producen una madera blanca amarillenta que se elimina en vertedero o se quema. La tendencia actual es mejorar la utilización sostenible de los recursos, por lo que se pretende aprovechar estos residuos y obtener nuevos productos.

Actualmente, la mayoría de adhesivos empleados para los tableros de madera son resinas que provienen de materiales derivados de combustibles fósiles (isocianato, acetato de vinilo y formaldehido). Aunque estos adhesivos son económicos y tienen un buen rendimiento, su uso será restringido en un futuro debido a su alta capacidad contaminante y la disminución de las reservas de estos recursos no renovables.

Existen investigaciones para obtener tableros de partículas usando varias especies vegetales como materia prima y las últimas investigaciones se han dirigido a obtener tableros de partículas aglomeradas sin utilizar ningún producto aglomerante: palmera datilera [3-6], palmera de aceite [7-11], palmera canaria [12], tallo de arroz [13,14], kenaf [15,16], caña de azúcar [17], cáscara de coco [18], bambú [19], sorgo [20], tallo de algodón [21] y residuos de almendra [22].

En este trabajo, se propone utilizar los residuos de podas de morera como materia prima para fabricar tableros sin aglomerante, en un intento de desarrollar una aplicación de valor agregado para este residuo. El objetivo es obtener un producto totalmente ecológico, mediante el uso de residuos de morera en la elaboración de tableros aglomerados sin adhesivos y valorar el mecanismo de auto-unión.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Los materiales utilizados en esta investigación fueron ramas de poda de morera de un año de edad recolectadas en el campus de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández. Las ramas se secaron en condiciones ambientales durante 12 meses hasta alcanzar un contenido de humedad del 8% antes de su uso. Los tallos se cortaron manualmente en rodajas (aprox. 40 cm de largo) y se trituraron en una desfibriladora de cuchillas circular a escala de laboratorio

equipada con una pantalla de aberturas de 10 mm. A continuación, las partículas se clasificaron utilizando un agitador de pantalla horizontal. Las partículas utilizadas para este estudio fueron los finos que pasaron por un tamiz de 0,25 mm. Las partículas no sufrieron un tratamiento previo.

2.2. Proceso de fabricación

Los tableros de 600 mm x 400 mm se formaron manualmente en un molde y se prensaron en una prensa de platos calientes a 2,6 N/mm^2. Se aplicaron tres temperaturas 110, 120 y 130 ºC, 2 tiempos de prensado 30 y 60 minutos y se empleó un proceso cíclico de hasta 2 repeticiones, adicionando un 10% de agua sobre las 2 caras antes del siguiente ciclo. Después del prensado, los paneles se dejaron enfriar en posición vertical. Los tableros eran de una sola capa y tenían unas dimensiones aproximadas de 600 x 400 x 5 mm^3. Las características de los paneles fabricados se muestran en la tabla 1. Se elaboraron 6 paneles de cada tipo (figura 1).

Tabla 1. Características de los tipos de paneles elaborados

Tipo de tablero	Nº de tableros	Tamaño de partícula (mm)	Tiempo (min)	Número de Ciclos	Presión (Mpa)	Temperatura (ºC)
A1	6	< 0,25	30	1	2,6	110
A2	6	< 0,25	30+30	2	2,6	110
A3	6	< 0,25	60	1	2,6	110
A4	6	< 0,25	60+60	2	2,6	110
B1	6	< 0,25	30	1	2,6	120
B2	6	< 0,25	30+30	2	2,6	120
B3	6	< 0,25	60	1	2,6	120
B4	6	< 0,25	60+60	2	2,6	120
C1	6	< 0,25	30	1	2,6	140
C2	6	< 0,25	30+30	2	2,6	140
C3	6	< 0,25	60	1	2,6	140
C4	6	< 0,25	60+60	2	2,6	140



Figura 1. Tableros de partículas de podas de morera fabricados.

Las propiedades se determinaron siguiendo las normas europeas establecidas para los tableros de partículas de madera [23]. Antes de proceder a los ensayos se cortaron las probetas de cada tablero con las dimensiones adecuadas según indican las normas europeas. De cada tablero se cortaron 6 probetas para el ensayo a flexión, 6 probetas para el ensayo de densidad, 3 probetas para el ensayo de inmersión en agua y 3 probetas para el ensayo de cohesión interna. Antes de proceder a los ensayos, se acondicionaron las probetas en una cámara normal de conservación JP Selecta (modelo Medilow-L, Barcelona, España) a una temperatura de 20ºC y una humedad relativa del 65%.

Se midieron las propiedades de los tableros siguiendo las normas estándares europeas: densidad [24], hinchamiento en espesor (TS) y absorción de agua (WA) tras 2 y 24 horas de inmersión en agua [25], cohesión interna o resistencia a tracción (IB) [26], módulo de ruptura a flexión (MOR) y módulo de elasticidad a flexión (MOE) [27]. Los tableros se evaluaron según indica la norma europea [28]. Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina de ensayos marca IMAL (Italy), que cumple con la velocidad requerida en cada ensayo, según indican las normas europeas aplicables a los ensayos.

Se ha empleado un medidor de humedad de laboratorio marca Imal (Modelo 200, Modena, Italia) para obtener el contenido de humedad y se utilizó un depósito calefactado a una temperatura del agua de 20ºC para realizar la prueba de inmersión en agua.

Los ensayos mecánicos se realizaron en una máquina de prueba universal Imal (Modelo IB600, Módena, Italia) y los ensayos de conductividad térmica se realizaron en un instrumento medidor de flujo de calor (NETZSCH Instruments Inc., Bulington, MA, USA).

De los valores medios de los ensayos se obtuvieron las barras de error, la desviación estándar y se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) para un nivel de significancia de α <0.05. El análisis estadístico se realizó con el programa informático SPSS v. 28.0 de IBM.

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades físicas

Los resultados de la densidad, el hinchamiento en espesor y la absorción de agua de los tableros fabricados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados medios de las propiedades físicas.

Tipo de Tablero	Densidad (kg/m³)	TS2h (%)	TS24h (%)	WA2h (%)	WA24h (%)
A1	897,21 (55,11)	53,44 (6,71)	59,83 (15,71)	151,50 (15,71)	167,20 (10,25)
A2	1.009,70 (48,52)	57,66 (7,51)	73,24 (7,26)	116,00 (16,79)	142,.40 (19,96)
A3	936,85 (63,03)	51,77 (8,24)	56,86 (5,75)	121,30 (11,33)	141,70 (16,01)
A4	1.085,40 (64,49)	53,43 (16,96)	71,58 (9,75)	82,41 (34,47)	114,40 (32,85)
B1	975,25 (87,92)	30,56 (13,80)	43,42 (15,35)	55,21 (11,96)	76,56 (19,90)
B2	1.101,60 (126,24)	28,43 (7,93)	41,88 (7,06)	46,25 (6,43)	76,31 (10,87)
B3	1.021,00 (109,93)	18,67 (3,12)	29,84 (6,21)	38,36 (8,21)	59,38 (9,24)
B4	1.137,40 (73,70)	17,43 (4,41)	29,83 (7,46)	35,21 (7,63)	54,33 (8,32)
C1	995,29 (63,89)	10,09 (7,44)	22,08 (7,53)	41,33 (8,45)	56,17 (8,98)
C2	997,82 (61,32)	6,66 (2,96)	21,40 (6,21)	38,65 (8,60)	52,99 (11,89)
C3	1.029,20 (73,02)	5,63 (1,63)	17,03 (5,27)	27,44 (6,34)	43,31 (10,20)
C4	1.072,20 (83,60)	5,13 (1,36)	16,02 (5,24)	20,19 (6,45)	35,80 (9,86)

TS: hinchamiento en espesor. WA: absorción de agua. (..): desviación estándar.

Observando los valores medios de densidad de cada tipo de tablero, no se observan diferencias significativas entre unas clases de tableros y otros. Son tableros de media-alta densidad entre 897,21 y 1.137,40 kg/m³. El análisis estadístico indica que la densidad depende de la temperatura, del tiempo en la prensa y del número de ciclos aplicados.

En el ensayo a las 2 h, los tableros con menor TS son tipo C4 con un 5.13%, y los tableros con mayor TS son tipo A2 con un 57.66 %. A las 24 h los tableros tipo C4 tienen un TS del 16,02 % (valor mínimo), y los tableros tipo A2 del 73,24 % (valor máximo).

Los valores del porcentaje de absorción de agua a las 2 h oscilan entre el tipo C4 con un 20,19 % y el A1 con un 151,50 %, habiendo grandes diferencias entre unos tipos de tableros y otros. A las 24 h aumenta la absorción de agua obteniendo en los tipos C4 un valor del 35,80 % y en los tipos A1 del 167,20%. Del análisis estadístico realizado podemos destacar que el TS y el WA sólo dependen de la temperatura aplicada.

Para minimizar el hinchamiento y la absorción de agua se podría emplear algún producto hidrófugo como los que se utilizan en la industria de la madera.

3.2. Propiedades mecánicas

Los resultados de los ensayos a flexión se indican en la tabla 3, donde se observa el valor medio de los ensayos de resistencia a flexión (MOR), el módulo de elasticidad (MOE) y la cohesión interna (IB) de cada uno de los tipos de tableros.

Los valores obtenidos de la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad y la cohesión interna dependen de la temperatura, el tiempo de prensado y el número de ciclos aplicados, mejorando conforme aumentan los citados parámetros. Los mejores resultados se obtienen para el tipo de tablero C4 logrando un valor de MOR de 22,37 N/mm², un MOE de 3.385,02 N/mm² y un IB de 0,90 N/mm². Del análisis estadístico realizado (tabla 3) se desprende que el MOR y el MOE dependen del tamaño de partícula y del tiempo en la prensa. Con menor tamaño de partícula y menor tiempo se obtienen se obtienen mejores resultados en el ensayo a flexión.

Tabla 3. Resultados medios de las propiedades mecánicas.

Tipo de Tablero	MOR (N/mm²)	MOE (N/mm²)	IB (N/mm²)
A1	4,03 (0,67)	809,91 (171,24)	0,18 (0,06)
A2	15,51 (2,23)	2.354,80 (459,81)	0,54 (0,16)
A3	6,54 (2,29)	979,70 (241,52)	0,26 (0,08)
A4	16,72 (3,12)	2.608,80 (675,37)	0,46 (0,12)
B1	10,70 (1,83)	1.461,60 (504,46)	0,41 (0,19)
B2	15,41 (3,31)	2.358,60 (419,69)	0,44 (0,16)
B3	13,67 (3,66)	2.076,70 (843,79)	0,45 (0,23)
B4	17,90 (1,43)	1.917,60 (398,31)	0,70 (0,17)
C1	14,24 (3,30)	2.210,50 (475,67)	0,75 (0,22)
C2	16,62 (2,49)	2.278,20 (469,97)	0,64 (0,39)
C3	18,51 (2,43)	2.674,00 (608,35)	0,66 (0,23)
C4	22,37 (2,26)	3.385,02 (753,47)	0,90 (0,33)

MOR: Resistencia a flexión. MOE: Módulo de elasticidad. IB: Cohesión interna. (..): desviación estándar.

En la tabla 4 se comparan los resultados obtenidos con los valores necesarios especificados en las normas europeas [28] para determinar la compatibilidad de usos de tableros con espesor de 4 a 6 mm.

Tabla 4. Características de los tipos de paneles elaborados y clasificación.

Tipo de tablero	MOR	MOE	IB	TS24 h	Clasificación
A2	15,51	2.354,80	0,54	73,24	P2

Tipo de tablero	MOR	MOE	IB	TS24 h	Clasificación
A4	16,72	2.608,80	0,46	71,58	P2
B2	15,41	2.358,60	0,44	41,88	P1
B3	13,67	2.076,70	0,45	29,54	P2
B4	17,90	1.917,60	0,70	29,83	P1
C1	14,24	2.210,50	0,75	22,08	P2
C2	16,62	2.278,20	0,64	21,40	P2
C3	18,51	2.674,00	0,66	17,03	P3
C4	22,37	3.385,02	0,90	16,02	P3
Tipo P1 [28]	11,50	-	0,31	-	-
Tipo P2 [28]	12,00	1.950,00	0,45	-	-
Tipo P3 [28]	14,00	1.950,00	0,50	20,00	-

La mayoría de los tableros fabricados podrían ser empleados como tableros de uso general para utilización en ambiente interior (P1) o tableros para aplicaciones interiores incluyendo mobiliario (P2). Sólo podrían conseguir la clasificación P3 (tableros no estructurales para ambiente húmedo) los tipos C3 y C4. Para el resto de tipos habría que considerar añadir sustancias hidrófobas para disminuir el valor de TS.

Con los residuos de podas de morera se obtienen mejores propiedades que con la palmera datilera [6, 22] y con la palmera de aceite [7, 11] empleando menor temperatura, lo que supone un gasto energético inferior.

4. Conclusiones

Los tableros fabricados con partículas <0.25 mm, con 140ºC de temperatura y aplicando 1 ó 2 ciclos de 60 minutos (tipos C3 y C4) alcanzan propiedades compatibles para ser empleados como tableros no estructurales para ambientes húmedos. La mayoría de los tableros fabricados se podrían emplear para revestimientos interiores y en elementos de mobiliario.

Los tableros se han fabricado a unas temperaturas de 110, 120º y 140ºC (que pueden considerarse como bajas) y unos tiempos de prensa de 30, 30+30, 60 y 60+60 min, por lo que habría que realizar nuevos ensayos organizando nuevas combinaciones para intentar conseguir mejores propiedades.

Los tableros obtenidos cuentan con una media-alta densidad, por tanto, uno de los mercados potenciales para este tipo de tableros podría ser el núcleo central de los pavimentos laminados, donde actualmente se están empleando tableros de fibra de madera de alta densidad.

Este estudio demuestra que es técnicamente posible fabricar tableros de partículas sin adhesivos con los residuos de podas de palmera.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (RD 786/2022 de 27 de septiembre) como contribución al Plan Vega Renhace en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

Referencias

1. Ghandhi Doss, S., Chakraborti, S.P., Roychowdhuri, S., Das, N.K., Vijayan, K., Ghosh, P.D. Development of mulberry varieties for sustainable growth and leaf yield in temperate and subtropical regions of India. Euphytica, 2012, 185, 215-225.
2. Harizanis, P.C.. Manual of Sericulture. Ministry of Agricultural Development and Food, Directorate of Animal Production, Athens. 2007, 26 pp.
3. Amirou, S.; Zerizer, A.; Pizzi, A.; Haddadou, I.; Zhou, X. Particleboards production from date palm biomass. Eur. J. Wood Wood Prod. 2013, 71(6), 717-723.
4. Saadaoui, N.; Rouilly, A.; Fares, K.; Rigal, L. Characterization of date palm lignocellulosic by-products and self-bonded composite materials obtained thereof. Mater. Des. 2013, 50, 302-308.
5. Hegazy, S.; Ahmed, K.; Hiziroglu, S. Oriented strand board production from water-treated date palm fronds. BioResources. 2014, 10(1), 448-456.
6. Laemsak, N.; Okuma M. Development of boards made from oil palm frond II: properties of binderless boards from steam-exploded fibers of oil palm frond. J. Wood Sci. 2000, 46, 322-326.
7. Hashim, R.; Wan Nadhari,WNA.; Sulaiman, O.; Kawamura, F.; Hiziroglu, S.; Sato, M.; Sugimoto, T.; Seng, TG.; Tanaka, R. Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass. Mater. Des. 2011, 32, 246-252.
8. Boon, J.G.; Hashim, R.; Sulaiman, O.; Hiziroglu, S.; Sugimoto, T.; Sato, M. Influence of processing parameters on some properties of oil palm trunk binderless particleboard. Eur. J. Wood Wood Prod. 2013, 71, 583–589.
9. Lammaming, J.; Sulaiman, O.; Sugimoto, T.; Hashim, R.; Said, N.; Sato, M. Influence of chemical components of oil palm on properties of binderless particleboard. BioResources. 2013, 8(3), 3358-3371.
10. Jumhuri, N.; Hashim, R.; Sulaiman, O.; Noor Aidawati, W.; Salleh, K.M.; Saharudin, N.I.; Razali, M.Z. Effect of treated particles on the properties of particleboard made from oil palm trunk. Mater. Des. 2014, 64, 769-774.
11. Henao, E. M.; Quintana, G. C.; Ogunsile, B. O. Development of binderless fiberboards from steam-exploded and oxidized oil palm wastes. BioResources. 2014, 9(2), 2922-2936.

12. Ferrández-García, A.; Ferrández-Villena, M.; Ferrández-García, C. E.; García-Ortuño, T.; Ferrández-García, M. T. Potential Use of Phoenix canariensis Biomass in Binderless Particleboards at Low Temperature and Pressure. BioResources. 2017, 12(3), 6698-6712.
13. Kurokochi, Y.; Sato, M. (2015). Effect of surface structure, wax and silica on the properties of binderless board made from rice straw. Ind. Crop. Prod. 2015, 77, 949-953.
14. Ferrandez-Garcia, C. C.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, M. T.; Ferrandez-Villena, M.; García, C. E. F. (2017). Fire-resistance, physical, and mechanical characterization of binderless rice straw particleboards. BioResources. 2017, 12(4), 8539-8549.
15. Xu, J.; Sugawara, R.; Widyorini, R.; Han, G.; Kawai, S. Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. J. Wood Sci. 2004, 50(1), 62-67.
16. Widyorini, R.; Xu, J.; Watanabe, T.; Kawai, S. Chemical changes in steam-pressed kenaf core binderless particleboard. J. Wood Sci. 2005, 51(1), 26-32.
17. Nonaka, S.; Umemura, K.; Kawai, S. Characterization of bagasse binderless particleboard manufactured in high-temperature range. J. Wood Sci. 2013, 59(1), 50-56.
18. Van Dam, J. E.; van den Oever, M. J.; Keijsers, E. R. Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk. Ind. Crop. Prod. 2004, 20(1), 97-101.
19. Widyorini, R.; Yudha, A. P.; Prayitno, T. A. Some of the properties of binderless particleboard manufactured from bamboo. Wood Res. J. 2011, 2(2), 89-93.
20. Khazaeian, A.; Ashori, A.; Dizaj, M. Y. (2015). Suitability of sorghum stalk fibers for production of particleboard. Carbohydr. Polym. 2015, 120, 15-21.
21. Ferrández-Garcia, M. T.; Ferrández-García, C. E.; Andreu-Rodriguez, J.; Ferrández-Villena, M.; García-Ortuño, T. The suitability of utilising cotton stalk for low cost binderless panels. In Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 41 International Symposium on Agricultural Engineering, University of Zagreb Faculty of Agriculture, Opatija, Croatia, 19-22 February 2013, 388-392.
22. Ferrandez-Villena, M.; Ferrandez-Garcia, C. E.; Andreu-Rodriguez, J.; Ferrandez-Garcia, M. T.; Garcia-Ortuño, T. Effect of pressing conditions on physical and mechanical properties of binderless boards made from almond hulls (Prunus dulcis (Mill.) DA Webb). In Actual Tasks on Agricultural Engineering. Proceedings of the 41 International Symposium on Agricultural Engineering, University of Zagreb Faculty of Agriculture, Opatija, Croatia, 19-22 February 2013, 392-397.
23. EN 309. Particleboards. Definitions and classification. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
24. EN 323. Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.
25. EN 317. Particleboards and fiberboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.
26. EN 319. Particleboards and fiberboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of de board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.
27. EN 310. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.
28. EN 312. Particleboards. Specifications. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2010.

Utilización de tableros multicapa de caña común (*Arundo donax* L.) para la rehabilitación de edificaciones tradicionales

M.T. Ferrández-García[1], A. Ferrández-García[1], B.E. Ferrández-García[1], T. García-Ortuño[1], A. Ruiz-Canales[1], M. Ferrández-Villena[1]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. Orihuela-Beniel, km 3,2, 03312, Orihuela (Alicante). España. mt.ferrandez@umh.es (M.T.F.-G.); antonio.ferrandezg (A.F.-G.); bferrandez@umh.es (B.E.F.-G); tgarcia@umh.es (T.G.-O.); acanales@umh.es (A.R.-C.) m.ferrandez@umh.es (M.F.-V.)

Abstract: The European Green Deal aims to make Europe the first climate neutral continent. Therefore, one of its priorities is the valorization of waste within the circular economy strategy. Giant reed (vegetable residue that grows wild in riverbeds) was used as a structural element in some traditional constructions, substituting wood in those places where this material was scarce. This paper discusses the use of giant reed residues in the manufacture of chip and particle multilayer boards, which can replace the beam filling elements of traditional buildings. In a first stage, 7 multilayer boards were made with different variables (layers, pressure, % water...). Then tests were carried out to determine its properties and the one with the best results was selected. Of this type, 21 three-layer boards were made with different variables (phases, moisture content, …). The inner layer was made up of different sizes of particles. The outer layers were made with giant reed chips oriented transversally or longitudinally, with dimensions 300 x 15 x 2 mm. The pressure applied was 3.5 MPa, with a temperature of 120ºC for 6 min. Urea formaldehyde of 5.68% with respect to the weight of the material, 6% water and 0.4% ammonium sulfate were used as adhesive. As a result, one of the boards obtained met all the requirements to be classified as OSB/1 (interior use for furniture, decoration and coating). In addition, a board was obtained that could have been classified as OSB/3 (structural applications) if it were not because it did not meet the requirements of a mechanical property.

Palabras clave: residuos vegetales, propiedades mecánicas, OSB, paneles.

1. Introducción

Los edificios son los responsables del 30% del consumo energético global y del 28% de las emisiones de CO2, por tanto, la construcción es una parte fundamental en el problema del desarrollo sostenible. En la evaluación de un edificio se debe realizar un balance energético global, incluyendo no sólo la fase de vida útil del edificio, sino todo su proceso constructivo, desde la extracción de los materiales, su elaboración industrial, su puesta en obra, su uso, su reciclaje y su destrucción, lo que se denomina "Ciclo de Vida". En este caso, el balance energético global y su equivalencia en contaminación ambiental lleva a un análisis pormenorizado de los materiales de construcción y, por tanto, a la utilización de aquellos menos costosos en términos energéticos, o en su equivalente en contaminación ambiental, y al rechazo, o a la mejora del

sistema productivo, de aquellos otros con costes elevados, capaces de anular las posibles ganancias energéticas obtenidas durante el tiempo de usufructo del edificio.

La arquitectura bioclimática se caracteriza por su adecuación al medio ambiente y al lugar en el que se introduce, imposibilitando la misma solución en situaciones geográficas y ambientales distintas.

La "arquitectura bioclimática" entendida en términos conceptuales, se fundamenta en la adecuación y utilización positiva de las condiciones medioambientales y materiales, mantenida durante el proceso del proyecto y la obra [1]. Una lógica que parte del estudio de las condiciones climáticas y ambientales y de la adecuación del diseño arquitectónico, para protegerse y/o utilizar los distintos procesos naturales.

Las maderas y otros vegetales se han usado en las construcciones tradicionales por sus propiedades resistentes y aislantes, luego utilizar biomasa vegetal en los edificios contribuirá a una mayor eficiencia energética.

Por otro lado, la deforestación que se está produciendo en los bosques [2] también nos impulsa a buscar sustitutos adecuados de la madera, tanto para su empleo en derivados de celulosa como para su utilización en elementos de construcción. Entre las causas de estas pérdidas se señalan la expansión de los pastos y los cultivos, el desarrollo urbano y la producción de madera para usos industriales y combustibles.

Desde el punto de vista técnico, las plantas no madereras ofrecen una gran variedad de cualidades en sus fibras y explotadas de forma adecuada pueden emplearse en el desarrollo de materiales sustitutos de la madera con propiedades innovadoras [3]

La caña común (*Arundo donax* L.) es una planta salvaje que crece y se extiende rápidamente, convirtiéndose en una mala hierba que llega a invadir los cauces y las parcelas de cultivo. Todo esto conlleva la necesidad de controlarla ya que se convierte en un grave problema [4]. Este control se realiza mecánica [5] y químicamente [6], y posteriormente la quema, lo que produce emisiones de CO2 a la atmósfera. La necesidad del control incrementa los gastos de mantenimiento de los cauces públicos y de las explotaciones agrarias.



Figura 1. Caña común (*Arundo donax* L.)

La caña común se utilizó como material de construcción en muchos países mediterráneos. En el sur de la provincia de Alicante se usó en todas las construcciones hasta principios del siglo XX, fundamentalmente como falsos techos y formando parte de los forjados de cubierta y de piso, como elemento de entrevigado [7]. Hasta los años sesenta se siguió utilizando para pequeñas construcciones unifamiliares y alojamientos ganaderos. Actualmente, ha quedado en desuso como material estructural.



Figura 2. Forjado con entramado de cañas en el entrevigado

En este estudio se han analizado las propiedades físicas y mecánicas de tableros multicapa elaborados con partículas y virutas de caña común con U.F como adhesivo. El objetivo es obtener un nuevo material que pueda ser empleado como elementos del entrevigado de las construcciones tradicionales.

2. Materiales y métodos

El material utilizado en la fabricación de tableros es caña común (*Arundo donax* L.) (en forma de virutas o astillas y partículas aglomeradas), el adhesivo es urea formaldehído (8 % y el 9% en peso respecto al peso de la caña empleada) disuelto en agua y como catalizador sulfato amónico (0,4 % en peso respecto la caña).



Figura 3. Caña común a la intemperie para su secado.

Para este trabajo la caña se adquirió en una empresa que la recolecta en cañaverales salvajes de la zona sur de provincia de Alicante. Ésta había sido secada al aire durante seis meses en la empresa, posteriormente se dejó al aire durante 3 meses antes de ser procesada, para obtener cañas con una humedad relativa entre el 8,5 y el 9 %. Después, parte se desfibró y parte se trituró, ya que los tableros realizados son multicapa en forma de virutas o astillas y partículas aglomeradas. Para obtener éstas últimas, el producto obtenido se hizo pasar por una tamizadora vibradora para realizar una clasificación del mismo, en diferentes tamaños de partícula.



Figura 4. Partículas y astillas de caña.

En una primera etapa se realizaron 7 tableros multicapa con diferentes variables: nº de capas, presión, % agua, % caña, disposición de la capa del aglomerado y dirección de las astillas de caña (perpendicular o paralela). Posteriormente se realizaron los ensayos para determinar sus propiedades y se seleccionó el que tuvo mejores resultados. De esta tipología se elaboraron 21 tableros de 3 capas (astillas-partículas-astillas) con un espesor medio de 17,5 mm. La capa interior estaba formada por distintos tamaños de partículas (0.25-2, 1-2, 2-4, 4-8, 8-10 mm y granel) de diferente contenido de humedad. Las capas exteriores se realizaron con astillas de caña orientadas transversal o longitudinalmente, de dimensiones 300 x 15 x 2 mm. Se utilizó como adhesivo urea formaldehido del 5.68% respecto al peso del material, un 6% de agua y un 0.4% de sulfato amónico. Se fabricaron en 1, 2 y 3 fases y la edad de la caña común era de 1, 5, 6 y 15 meses.

El proceso de fabricación consistió en la formación la manta del tablero (en una, dos o tres fases) en un molde de 600 x 400 mm (astillas-aglomerado-astillas) con amasado previo de las partículas de caña (1 kg) con el adhesivo mediante una amasadora manual. Después, dependiendo de la fase, se introdujeron en una prensa de platos calientes con una temperatura de 120ºC y una presión de 3.5 MPa, durante 6 min. Las fases de fabricación fueron:

- 1 fase: formación del tablero con las tras capas del tablero en sola fase (astillas-aglomerado-astillas)
- 2 fases: 1º formación de la capa central de aglomerado en la prensa de platos calientes y 2º unión de esta última a las capas exteriores de astillas longitudinales y transversales mediante adhesivo en la prensa de platos calientes.
- 3 fases: 1º formación de la capa central de aglomerado en la prensa de platos calientes y 2º unión de esta última a la capa exterior superior de astillas longitudinales mediante adhesivo en la prensa con un solo plato caliente y 3º unión de la capa aglomerada a la capa exterior inferior de astillas longitudinales, a algunos tableros, y transversales a otros, mediante adhesivo en la prensa con un solo plato caliente.



Figura 5. Tablero 3 fases con caras de astillas perpendiculares



Figura 6. Caras con astillas paralelas

En la tabla 1 se indican las características de fabricación de cada tipo de tablero fabricado con sus diferentes variables.

Tabla 1. Tipo de tableros elaborados

Nº tablero	Fases proceso fabricación	Tamaño partículas (mm)	Disposición de astillas	%RH partículas	Tiempo caña (meses)
1	1	2 a 4	Paralelas	8,7	15
2	1	0,25 a 2	Paralelas	8,7	15
3	1	0,25 a 2	Paralelas	4	15
4	3	Granel	Tangentes	8,7	6
5	2	0,25 a 2	Paralelas	4	5
6	2	0,25 a 2	Paralelas	8,7	5
7	2	4 a 8	Tangentes	8,7	5
8	3	Granel	Paralelas	8,7	5
9	3	1 a 2	Paralelas	8,7	5
10	3	4 a 10	Paralelas	8,7	5
11	3	4 a 8	Tangentes	8,7	5
12	3	2 a 4	Tangentes	4	5
13	3	2 a 4	Paralelas	4	6
14	3	8 a 10	Tangentes	4	6
15	3	1 a 2	Tangentes	4	6
16	3	Granel	Tangentes	8,7	6
17	3	Granel	Tangentes	4	6
18	3	0,25 a 2	Tangentes	8,7	1
19	3	4 a 10	Paralelas	4	1
20	3	4 a 8	Tangentes	4	1
21	3	0,25 a 1	Paralelas	4	1

Tras el enfriado de los tableros se procedió a su corte, según la norma UNE EN 325: 2012 [8], para la obtención de las probetas necesarias para la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes tableros, y así realizar su posterior clasificación.

Las propiedades de los tableros se determinaron siguiendo las normas Europeas establecidas para los tableros de partículas de madera [9] y se midieron siguiendo las normas estándares Europeas: humedad [10], densidad [11], hinchamiento en espesor (TS) tras 24 horas de inmersión en agua [12], cohesión interna o resistencia a tracción (IB) [13], resistencia a la flexión (MOR) y módulo de elasticidad a flexión (MOE) [14]. Los tableros se evaluaron según indica la norma europea para los tableros de virutas orientadas OSB (15).

Los ensayos mecánicos se realizaron en una máquina de prueba universal Imal (Modelo IB600, Módena, Italia).

Los análisis estadísticos se realizaron con el programa informático SPSS v. 26.0 (IBM, Chicago, IL, USA). De los valores medios de los ensayos se obtuvo la desviación estándar y se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) para un nivel de significancia $\alpha < 0.05$.

3. Resultados y discusión

Los valores obtenidos del % de humedad de los tableros son buenos, ya que según las normas, los tableros deben tener menos del 20% de humedad relativa en condiciones ambientales.

El tablero con mayor % de humedad tiene un valor del 9,4% y dicho valor es mucho menor que 20 %, por lo que podría ser utilizado como tablero estructural.

Excepto en el tablero nº 3, los valores de la densidad fueron buenos oscilando entre 600 y 700 kg/m³, lo que indica que son tableros ligeros y que pueden ser estructurales si reúnen el resto de características necesarias.

En cuanto a los resultados de % hinchazón en espesor a las 24 horas, los valores oscilaban entre 11 y 30, por lo que de los 21 tableros había 2 que no cumplían (nº 18 y 21) ya que según la norma [15] para que puedan ser utilizados, el hinchamiento en espesor máximo debe ser del 25% para un rango de espesor entre 10-18 mm.

Según la norma UNE EN [15], los tableros OSB deben tener una tensión característica mínima a flexión longitudinal de 18 N/mm², y a flexión transversal de 9 N/mm². Observando los resultados obtenidos, los valores de la tensión a flexión longitudinal van desde 6,9 a 44,4 N/mm² y los de la tensión a flexión transversal desde 4,6 a 18,4 N/mm²; por lo que vemos que de los 21 tableros fabricados, 10 cumplen dichas indicaciones y son los tableros nº 7, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 20 y 21.

Los resultados del módulo de elasticidad a flexión van desde 950 a 6605 N/mm² (longitudinal) y desde 655 a 4341 N/mm² (transversal). El valor característico mínimo indicado en la norma para tableros OSB [15] es, en flexión longitudinal 2500 N/mm² y en flexión transversal 1200 N/mm². Hay 8 tableros de los que se han fabricado que cumplen ambas condiciones, como son los tableros nº 1, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 18 y 21.

Los valores de la resistencia a tracción de los tableros oscilan entre 0,04 y 0,65 N/mm². Según la norma [15], los tableros OSB deben tener una resistencia a tracción tangencial igual o superior a 0,28 N/mm², por lo que solo 7 tableros de los 21 fabricados cumplen dicho valor y son los tableros nº 5, 7, 11, 12, 13, 14 y 20.

En la siguiente tabla 2 se muestran los tableros que cumplen más de 4 condiciones para que puedan ser comerciales [15], los valores que no cumplen se exponen en rojo.

Tabla 2. Resultados de algunos tableros fabricados.

Nº Tablero	% Humedad	Densidad Kg/m³	% Hinchazón espesor	Resist flexión N/mm²		Mod Elasticidad N/mm²		Resist. Tracción N/mm²
				Long	Transv	Long	Transv	
5	7,85	754	22	25,9	4,6	4349	655	0,30
7	7,86	668	22	27	23,2	2400	2312	0,29
8	8,79	703	13	25,1	7,3	4795	2816	0,26
11	8,51	683	13	31,8	19,6	2541	1576	0,27
12	8,3	669	13	24,0	21,2	2331	1889	0,43
13	8,59	627	13	36,9	6,3	6606	1414	0,38
14	8,44	693	13	23,6	26,2	2868	2387	0,28
15	8,53	683	17	27,3	17,6	2723	1712	0,22
16	8,37	601	15	21,2	17,6	2000	1775	0,20
17	8,36	640	13	19,1	17	2200	1893	0,11
18	6,37	695	27	28,4	19,1	2921	2982	0,23
20	6,68	655	23	30,6	27,2	2421	2362	0,65

El único tablero que cumple todas las condiciones es el nº 14, que sería un tipo OSB/1 "Tableros para uso general y aplicaciones de interior (incluyendo mobiliario) utilizados en

ambiente seco". Es un tablero fabricado en tres fases, con un tamaño de partícula interior de 8 a 10 mm que habían sido secadas previamente hasta alcanzar un 4 % de humedad y las astillas de las caras se habían dispuesto en forma perpendicular.

- El tablero nº 7, podría ser clasificado como OSB/1 si el módulo de resistencia a flexión longitudinal hubiera superado el valor de 2500 N/mm². Éste se ha fabricado en dos fases con un tamaño de partícula interior de 4 a 8 mm, con una humedad del 8,7% y una disposición de astillas perpendiculares.

Los tableros nº 12, y 20 podrían ser clasificados como OSB/3 "Tableros estructurales para utilización en ambiente húmedo", sin embargo, les falla el módulo de elasticidad a flexión longitudinal, que debería ser mayor o igual de 3500 N/mm². Éstos tienen las siguientes características:

- El tablero nº 12 se ha fabricado en tres fases con un tamaño de partícula 2 a 4 mm que tenían un 8,7% de humedad y una disposición de astillas perpendiculares.
- El tablero nº 20 se ha fabricado en tres fases con un tamaño de partícula interior de 4 a 8 mm, con una humedad del 4% y una disposición de astillas perpendiculares.

El tablero nº 13 podría ser clasificado como un OSB/3 de no ser porque falla en la resistencia a flexión transversal que es menor de 10 N/mm². Éste es un tablero fabricado en tres fases, con un tamaño de partícula interior de 2 a 4 mm con una humedad del 4% y la disposición de las astillas en las caras paralelas entre sí.

Si realizamos un resumen de las variables de fabricación que influyen en las propiedades de los tableros como indica la tabla 3.

Tabla 3. Variables de fabricación de las que dependen las propiedades de los tableros.

	Tamaño de partícula interior	% Humedad part. interiores	Fases proceso fabricación	Disposición astillas caras	Tiempo secado caña
% Humedad					X
Densidad Kg/m³	X		X		X
%Hinchazón espesor	X	X			X
MOR Resist a flexión N/mm²					
- Longitudinal	X		X		
- Transversal			X	X	
MOE Módulo Elastic flexión N/mm²					
- Longitudinal	X			X	
- Transversal	X		X		
IB Resistencia tracción tang. N/mm²			X		

Como se puede ver en la tabla 3, el tamaño de partícula interior influye en las propiedades de densidad, % de hinchazón en espesor, resistencia a flexión longitudinal y el módulo de elasticidad longitudinal y transversal, obteniendo mejores valores cuando se emplearon partículas del mayor tamaño.

El % de humedad de las partículas interiores antes del proceso de fabricación influye sobre el % de hinchazón en espesor; obteniendo menor hinchamiento después de inmersión en agua durante 24 horas, en aquellos tableros cuyas partículas no se habían secado previamente.

Las fases del proceso de fabricación influyen sobre la densidad, resistencia a flexión tanto longitudinal como transversal, el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción. La fabricación de tableros en una fase debe rechazarse ya que los tableros realizados no cumplen casi ninguna propiedad, los fabricados en dos fases tienen un comportamiento similar a los de tres fases, teniendo mayor módulo de elasticidad a flexión transversal y resistencia a tracción tangencial.

La disposición de las astillas en las caras influye sobre la resistencia a flexión transversal y el módulo de elasticidad a flexión longitudinal. Si las astillas se disponen paralelas, aumenta el módulo de elasticidad a flexión longitudinal y disminuye la resistencia a flexión transversal y si se disponen perpendiculares sucede al revés.

El tiempo de secado al aire de las cañas, antes del proceso de fabricación, influye sobre la densidad, % de humedad y % de hinchamiento en espesor debiendo estar al aire más de un año para obtener mejores propiedades.

4. Conclusiones

Se consiguen tableros comerciales OSB de partículas y astillas de caña, como sustitutos de los de madera, con buenas propiedades mecánicas.

Los tipos de tableros OSB obtenidos se podrían utilizar como sustitutos de los forjados de cañas utilizados en las edificaciones tradicionales, siendo un buen material para la rehabilitación. Controlando las variables de fabricación se podrían obtener tableros estructurales.

Los tableros cumplen los requisitos para ser considerados más ecológicos que los tableros de madera, porque consumen menos energía en su fabricación y utilizan menor cantidad de U.F. por lo tanto, contaminarán menos.

Utilizar como materia prima una planta residual fácilmente renovable anualmente, como es la caña común (*Arundo donax* L), puede ser una buena alternativa para la industria del tablero.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo de la Conselleria de Vivienda y Arquitectura Bioclimática de la Generalitat Valenciana a través del Plan IRTA, proyecto HBIRT3-2022-2.

Referencias

29. Valsaín, F., Hacia una arquitectura y un urbanismo basados en criterios bioclimáticos. 2000, Actas del seminario del CENEAM (Centro Nacional de Estudios Ambientales).
30. F.A.O. El estado de los bosques en el mundo. 2020. Periodo 1990-2020.
31. Rodríguez JJ.; García HF. y Cordero AT. Posibilidades de aprovechamiento de los residuos lignocelulósicos. 1990. (191-197)

32. San Martín, C.; Gourlie, J. A.; Barroso, J. Control of Volunteer Giant Reed (*Arundo donax*). *Invasive Plant Sci*. Manage. **2019**, 1-8.
33. Spencer, DF.; Tan, W.; Liow, P-S.; Ksander, GG.; Whitehand, LC.; Weaver, S.; Olson, J.; Newhouser, M. Evaluation of glyphosate for managing giant reed (Arundo donax). Invasive Plant Sci. Manage. 2008, 1, 248-254.
34. Goolsby, J. A.; Moran, P. Host range of Tetramesa romana Walker (Hymenoptera: Eurytomidae), a potential biological control of giant reed, Arundo donax L. in North America. Bio. Control. 2009, 49(2), 160-168.
35. García Ortuño, T. Caracterización de la caña común (Arundo donax L.) para uso como material de construcción. 2003. Tesis doctoral por la Universidad Miguel Hernández.
36. EN 325: 2012. Norma UNE. Tableros derivados de la madera. Determinación de las dimensiones de las probetas.
37. EN 309: 2006. Norma UNE. Tableros de partículas. Definición y clasificación
38. EN 322: 1993. Norma UNE. Tableros derivados de la madera. Determinación del contenido de humedad.
39. EN 323: 1993. Norma UNE. Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad.
40. EN 317: 1993. Norma UNE. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua.
41. EN 319: 1993. Norma UNE. Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a tracción perpendicular a las caras del tablero.
42. EN 310: 1993. Norma UNE. Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión.
43. EN 300: 2007. Norma UNE. Tableros de virutas orientadas (OSB). Definiciones, clasificación y especificaciones.



Análisis del almidón de maíz como adhesivo en los tableros aglomerados de partículas de paja de arroz

M.T. Ferrández-García[1], A. Ferrández-García[1], B.E. Ferrández-García[1], T. García-Ortuño[1], M. Martínez-Fernández[1], M. Ferrández-Villena[1]

[1] Departamento de Ingeniería, Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. Orihuela-Beniel, km 3,2, 03312, Orihuela (Alicante). España, mt.ferrandez@umh.es (M.T.F.-G.); antonio.ferrandezg (A.F.-G.); bferrandez@umh.es (B.E.F-G); tgarcia@umh.es (T.G.-O.); maria.mtz.fdz@hotmail.es (M.M.-F.) m.ferrandez@umh.es (M.F.-V.)

Abstract: Agricultural activity generates a large amount of biomass that is often not used for other purposes. Traditionally, this waste is removed by burning it in the open field. However, the burning of agricultural residues entails an environmental cost, has an impact on fauna and flora and generates problems for human health. Since the resin normally used (urea formaldehyde) is classified as a toxic product, the particleboard industry seeks to develop new manufacturing processes and ecological binders. The aim of this study is to obtain a totally ecological product, through the use of rice straw residues using corn starch as a binder in the manufacture of particleboards. 16 types of boards were manufactured with biomass from rice straw using a pressure of 3 MPa, temperature 150ºC, particle size less than 3 mm and varying the % of water, the time in the press and the percentage of added starch. Through experimental tests, the physical and mechanical properties were studied. The results achieved show that more tests must be carried out to improve the mechanical properties of the boards, especially by increasing the percentage of starch added during its manufacture.

Palabras clave: residuos vegetales, tableros de partículas, propiedades mecánicas y físicas.

1. Introducción

Durante los últimos años las investigaciones científicas han puesto de manifiesto que el cambio climático es una de las amenazas más graves y complejas a la que hacer frente a escala mundial: la variación de la temperatura media del planeta puede afectar a ecosistemas y comunidades naturales, generando impactos negativos en las formas de vida de los mismos. Los gases de efecto invernadero generados por las actividades humanas están causando el calentamiento de la Tierra y provocando cambios en el clima mundial, produciendo a la vez efectos negativos en humanos, económicos y medioambientales cada vez más graves

La Directiva (UE) 2018/851, de 30 de mayo de 2018, [1], indica que los Estados miembros deberán adoptar las medidas adecuadas para incentivar el diseño de productos de manera que reduzcan su impacto medioambiental y la generación de residuos durante la producción y subsiguiente utilización de los productos, y para asegurar que la valorización y eliminación de los productos que se han convertido en residuos.

La actividad agraria genera gran cantidad de biomasa que a menudo no se utiliza. Tradicionalmente, la forma de eliminar estos desechos es mediante su quema en campo abierto.

Según indica la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados [1] la quema de residuos agrícolas supone un coste medioambiental, ya que constituye una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) directos (dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O)), GEI indirectos (monóxido de carbono (CO), óxidos del nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y compuestos orgánicos volátiles no metano (COVNM), y otros gases contaminantes (NH_3). Además, la quema de residuos agrícolas produce impacto sobre la fauna y flora, problemas sobre la salud humana (afecciones respiratorias como asma, rinitis…), riesgo para la seguridad vial (por la falta de visibilidad en carreteras debido al humo) y riesgo de incendios.

No obstante, la prohibición de la quema y la expansión por el terreno de los residuos vegetales puede dar lugar a otros problemas medioambientales como eutrofización. La eutrofización del agua de los ecosistemas agrarios es debida entre otras razones al enriquecimiento de nutrientes derivados de la actividad humana agraria. Un ejemplo de este problema se ha producido en la laguna de la Albufera (Parque Natural de la Comunidad Valenciana) debido a la descomposición de la paja de arroz que se dejaba en el campo tras la cosecha [3]. También en ocasiones es importante retirar los residuos rápidamente del campo para evitar la propagación de incendios o plagas. La tendencia actual es mejorar la utilización sostenible de los recursos, por lo que se pretende aprovechar estos residuos y obtener nuevos productos, lo que ha provocado un aumento significativo de las investigaciones orientadas al uso de adhesivos naturales como la lignina [4], los taninos [5], el ácido cítrico [6-10] y el almidón [11].

El almidón es un producto relativamente barato y renovable de las plantas [12]. La producción anual de almidón de cereales es de aproximadamente 2050 millones de toneladas, y de raíces y tubérculos, de aproximadamente 679 millones de toneladas [13, 14]. Además de ser la principal fuente de energía en la dieta humana, el almidón también se utiliza para una amplia variedad de procesos industriales: como adhesivo en la fabricación de papel, como aditivo en el cemento y como aglutinante en yeso y tablero de fibra de yeso [14].

Los dos componentes principales del almidón son la amilosa y la amilopectina. Estas dos moléculas se ensamblan para formar gránulos semicristalinos. Las proporciones de las dos moléculas y el tamaño y forma del gránulo varían entre especies. Los gránulos deben abrirse mediante procesamiento para obtener una unión adhesiva. Cuando los gránulos de almidón nativo se calientan en agua, se rompen gradualmente, lo que da como resultado una transición de fase de una estructura granular ordenada a un estado desordenado en el agua, lo que se conoce como "gelatinización" [15-18].

El objetivo específico de este estudio fue determinar las propiedades mecánicas y físicas de tableros fabricados con partículas de residuos de paja de arroz utilizando como plastificante el almidón de maíz y determinar sus propiedades físicas y mecánicas.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Los materiales utilizados en esta investigación fueron partículas de paja de arroz (figura 1) suministradas por la finca “El Soto” ubicada en Calasparra (Murcia). Los residuos de paja de arroz se habían secado en condiciones ambientales durante 12 meses hasta alcanzar un contenido de humedad del 7% antes de su uso. La paja de arroz se trituró en una desfibradora de cuchillas. Las partículas obtenidas se tamizaron en una tamizadora vibradora y se seleccionó un tamaño de partícula inferior a 3 mm.

Como adhesivo, se utilizó almidón de grado comercial no modificados de maiz con un 5, 10, 15 y 20% en peso (en función del peso de las partículas de paja). No se utilizaron otros aditivos ni productos químicos.



Figura 1. Paja de arroz empleada en la fabricación de tableros**.**

2.2. Proceso de fabricación

La materia prima previamente pesada se colocó en un mezclador de pegamento de tambor de laboratorio (Modelo LGB 100; IMAL S.r.l., Módena, Italia). El adhesivo se mezcló con un 10 y un 20% de agua (referido al peso de las partículas) a 20 ºC, obteniendo una suspensión, y luego se agregó a la licuadora. La masa se mezcló durante 5 min a temperatura ambiente para obtener una mezcla homogeneizada. No se utilizó cera ni ninguna otra sustancia hidrofóbica. La configuración del tablero era de una sola capa. Cada panel se elaboró con 2000 g de partículas y el peso de agua y adhesivo correspondiente en función del porcentaje aplicado.

Tabla 1. Tipos tableros fabricados.

Tipo	Tamaño de partícula (mm)	Cantidad g/100 g de particulas		Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Tiempo (min)	Número de tableros
		Almidón de maiz	Agua				
1	< 3,00	0	10	150	3.0	10	3
2	< 3,00	0	10	150	3.0	20	3
3	< 3,00	0	20	150	3.0	10	3
4	< 3,00	0	20	150	3.0	20	3
5	< 3,00	5	10	150	3.0	10	3
6	< 3,00	5	30	150	3.0	20	3

7	< 3,00	10	10	150	3.0	10	3
8	< 3,00	10	10	150	3.0	20	3
9	< 3,00	10	20	150	3.0	10	3
10	< 3,00	10	20	150	3.0	20	3
11	< 3,00	15	10	150	3.0	10	3
12	< 3,00	15	10	150	3.0	20	3
13	< 3,00	15	20	150	3.0	10	3
14	< 3,00	15	20	150	3.0	20	3
15	< 3,00	20	10	150	3.0	10	3
16	< 3,00	20	10	150	3.0	20	3

La manta se formó en un molde de dimensiones 600 mm x 400 mm y se sometió a presión y calor en una prensa de platos calientes, con una presión de 3 MPa, una temperatura de 150ºC durante 10 y 20 min. Posteriormente, se dejaron los paneles enfriar en posición vertical hasta su enfriamiento. Los tableros tenían unas dimensiones aproximadas de 600 x 400 x 10 mm^3 (figura 2). Las características de los diferentes tipos de tableros fabricados se indican en la tabla 1.



Figura 2. Tableros con partículas de paja de arroz fabricados.

2.3. Resultados experimentales

Sus propiedades se determinaron siguiendo las normas europeas establecidas para los tableros de partículas de madera [19]. Antes de proceder a los ensayos se cortaron las probetas de cada tablero con las dimensiones adecuadas según indican las normas europeas y se acondicionaron en una cámara de conservación de JP Selecta (modelo Medilow-L, Barcelona, España) a una temperatura de 20º C durante 24 h y una humedad relativa del 65%

Se midieron las propiedades de los tableros siguiendo las normas estándares europeas: densidad [20], hinchamiento en espesor y absorción de agua tras 2 y 24 horas de inmersión en agua [21], cohesión interna o resistencia a tracción [22], módulo de ruptura a flexión (MOR) y módulo de elasticidad a flexión (MOE) [23]. Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina de ensayos marca IMAL (Modelo IB600, Módena, Italia). Se ha empleado un medidor de

humedad de laboratorio marca Imal (Modelo 200, Modena, Italia) para obtener el contenido de humedad y se utilizó un depósito calefactado a una temperatura del agua de 20ºC para realizar la prueba de inmersión en agua.

2.4. Análisis estadístico de los resultados

De los valores medios de los ensayos se obtuvo la desviación estándar y se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) para un nivel de significancia de $\alpha < 0,05$ y la correlación de Pearson para niveles de significancia en los niveles 0,01 y 0,05. El análisis estadístico se realizó con el programa informático SPSS v.28 (IBM, Chicago, IL, USA).

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades físicas

Los resultados de la densidad, el hinchamiento en espesor y la absorción de agua de los tableros fabricados se muestran en la tabla 2.

3.1.1. Densidad

La densidad se midió en seis probetas de cada tablero y los valores medios de cada tipo de tablero se observan en la tabla 2. Son tableros de media densidad desde 766,38 kg/m^3 hasta 965,15 kg/m^3 obteniendo mayores valores los tableros que se fabricaron sin añadir aglutinante y con un mayor porcentaje de agua. El análisis estadístico (tabla 3) indica que la densidad depende de los porcentajes de almidón y agua añadidos y del tiempo de prensado observando que disminuye con un mayor porcentaje de agua añadida y aumenta a mayor tiempo en prensa.

Tabla 2. Resultados medios de las propiedades físicas**.**

Tipo de Tablero	Densidad (kg/m^3)	TS24h (%)	WA24h (%)
1	927,57 (29,43)	100,08 (4,32)	217,54 (4,79)
2	890,44 (31,23)	72,86 (12.10)	141,36 (24,87)
3	923,77 (108,47)	76,55 (13,45)	138,09 (33,15)
4	965,15 (13,35)	66,55 (10,36)	118,17 (31,19)
5	768,18 (20,73)	00,08 (4,32)	217,54 (4,80)
6	768,97 (31,23)	78,44 (3,86)	186,59 (13,54)
7	943,19 (31,16)	81,02 (3,65)	158,02 (3,62)
8	766,38 (26,74)	69,23 (13,94)	110,35 (17,79)
9	767,98 (27,12)	62,39 (6,38)	167,03 (19,11)
10	947.69 (44,35)	75,54 (13,18)	134,17 (33,45)

11	900,14 (64,99)	70,94 (5,54)	165,27 (11,28)
12	859,40 (53,14)	55,82 (21,77)	121,45 (27,95)
13	947,69 (44,35)	70,09 (9,53)	137,81 (32,91)
14	821,77 (147,69)	60,71 (19,95)	130,36 (36,78)
15	910,91 (23,70)	52,96 (11,77)	91,10 (27,95)
16	900,14 (64,99)	47,68 (9,68)	92,59 (17,70)

TS: hinchamiento en espesor. WA: absorción de agua. (..): desviación estándar.

Tabla 3. Resultados del ANOVA.

Factor	Propiedadess	Suma de cuadrados	g.l.	Media cuadrática	F	Sig.
Almidón	Densidad (kg/m³)	131.461	4	32.865	7,085	<0,001
	TS 24 h (%)	5.581	4	1.395	5,037	<0,001
	WA 24 h (%)	32.207	4	8.052	9,757	<0,001
	MOR (N/mm^2)	184	4	46	11,590	<0,001
	MOE (N/mm^2)	2.070.022	4	517.505	6,311	<0,001
	IB (N/mm^2)	0,005	4	0,001	7,262	<0,001
Agua	Densidad (kg/m³)	34.849	1	34.849	6,199	0.016
	TS 24 h (%)	4.631	1	4.631	8,173	<0,001
	WA 24 h (%)	8.813	1	8.813	3,765	0,029
	MOR (N/mm^2)	7	1	7	1,010	0,319
	MOE (N/mm^2)	274.847	1	274.847	2,439	0,124
	IB (N/mm^2)	0,001	1	0,001	2,843	0,098
Tiempo	Densidad (kg/m³)	90.903	1	90.903	9,513	<0,001
	TS 24 h (%)	2.706	1	2.706	4,310	0,018
	WA 24 h (%)	8.658	1	8.658	3,691	0,030
	MOR (N/mm^2)	50	1	50	3,984	0,024
	MOE (N/mm^2)	1.956.564	1	1.956.564	11,680	<0,001
	IB (N/mm^2)	0,001	1	0,001	1,563	0,220

g.l.: grados de libertad. F: Distribución Fisher–Snedecor. Sig.: Significancia.

3.1.2. Hinchamiento en espesor (TS) y absorción de agua (WA) después de inmersión.

El ensayo se realizó en tres probetas de cada tablero. En el ensayo a las 24 h, todos los tableros tienen un mal comportamiento a TS y WA Estadísticamente se observa que ambos parámetros dependen de los porcentajes de almidón y agua añadidos y del tiempo de prensado.

Con los datos de hinchamiento en espesor, los tableros solo podrían ser clasificados como tableros de uso general para utilización en ambiente interior o tableros para aplicaciones interiores incluyendo mobiliario, en función del resto de propiedades mecánicas.

La absorción de agua y el hinchamiento en espesor son altos y dependen del tipo de tablero, con mayor porcentaje de almidón se obtienen mejores valores. Para minimizar el hinchamiento y la absorción de agua se podría utilizar algún producto hidrófugo como los que se utilizan en la industria de la madera.

3.2. Propiedades mecánicas

Tabla 4. Resultados medios de las propiedades mecánicas.

Tipo de Tablero	MOR (N/mm²)	MOE (N/mm²)	IB (N/mm²)
1	5,12 (0,81)	555,63 (110,55)	0,007 (0,005)
2	4,74 (2,23)	661,55 (459,81)	0,007 (0,005)
3	4,79 (0,56)	615,66 (89,54)	0,007 (0,005)
4	5,16 (0,35)	757,19 (38,42)	0,010 (0,003)
5	1,47 (0,13)	145,08 (22,99)	0,002 (0,000)
6	2,33 (0,27)	382,84 (68,81)	0,006 (0,000)
7	6,93 (1,92)	983,17 (187,00)	0,018 (0,005)
8	3,43 (0,53)	387,16 (127,43)	0,010 (0,004)
9	3,42 (0,61)	376,25 (110,1º)	0,010 (0,004)
10	7,95 (0,92)	1.247,02 (462,57)	0,018 (0,007)
11	7,10 (1,83)	691,96 (243,34)	0,013 (0,007)
12	6,90 (0,89)	787,78 (92,48)	0,013 (0,006)
13	9,14 (1,77)	1.187,03 (269,05)	0,014 (0,005)
14	9,14 (3,20)	1.187,03 (208,28)	0,031 (0,011)
15	7,05 (1,62)	715,92 (215,63)	0,014 (0,006)
16	7,10 (1,83)	991,96 (143,34)	0,013 (0,007)

MOR: Resistencia a flexión. MOE: Módulo de elasticidad. IB: Cohesión interna. (..): desviación estándar.

3.2.1. Resistencia a flexión (MOR) y módulo de elasticidad (MOE).

Para obtener las propiedades a flexión se cortaron 6 probetas de cada tablero. Los resultados de los ensayos a flexión se indican en la tabla 4, donde se observa el valor medio de los ensayos de resistencia a flexión (MOR) de cada uno de los tipos de tableros y el módulo de elasticidad en flexión (MOE). Para evaluar si el MOR y MOE dependían del tipo de tablero se realizó el análisis de la varianza de la tabla 3.

Los valores obtenidos de resistencia a flexión y el módulo de elasticidad como indica el ANOVA dependen del porcentaje de almidón y del tiempo en la prensa de forma que los valores de MOR y MOE aumentan al incrementar el porcentaje de almidón y el tiempo en la prensa. Los dígitos obtenidos no permiten clasificar los tableros fabricados según la normativa europea [19], puesto que no alcanzan los valores mínimos exigidos.

3.2.2. Cohesión interna (IB).

Los resultados del ensayo a cohesión interna (IB) se indican en la tabla 4 y el ANOVA en la tabla 3. Como se observa la cohesión interna sólo depende del almidón añadido, viéndose incrementados sus valores al aumentar sus porcentajes. Los valores de IB son bajos pudiéndose comprobar durante la realización de los ensayos que se produce delaminación de los tableros.

3.3. Análisis estadístico de la correlación de Pearson.

En la tabla 5 se muestran los valores obtenidos analizando la correlación de Pearson para niveles de significancia en los niveles 0,01 y 0,05.

Tabla 5. Resultados de la correlación de Pearson

Factor	Propiedadess	Correlación de Pearson	N	Sig.
Almidón	Densidad (kg/m^3)	0,420	48	0,727
	TS 24 h (%)	0,376*	48	0,040
	WA 24 h (%)	0,300	48	0,108
	MOR (N/mm^2)	0,501**	48	<0,001
	MOE (N/mm^2)	0,283**	48	0,016
	IB (N/mm^2)	0,397**	48	0,002
Agua	Densidad (kg/m^3)	-0,374*	48	0,016
	TS 24 h (%)	-0,271	48	0,147
	WA 24 h (%)	-0,462*	48	0,010
	MOR (N/mm^2)	-0,128	48	0,319
	MOE (N/mm^2)	-0.196	48	0,124
	IB (N/mm^2)	-0,234	48	0,098
Tiempo	Densidad (kg/m^3)	0,496**	48	<0,001
	TS 24 h (%)	-0,255	48	0,173
	WA 24 h (%)	-0,352	48	0,057
	MOR (N/mm^2)	0,340**	48	0,008
	MOE (N/mm^2)	0,538**	48	<0,001
	IB (N/mm^2)	0,217	48	0,130

De los datos extraídos se puede observar que el porcentaje de almidón añadido influye directamente en los valores mecánicos, por tanto, deberían desarrollarse nuevos ensayos en los que se aporten mayores porcentajes de almidón para intentar mejorar los valores de MOR, MOE e IB.

4. Conclusiones

En este trabajo se han analizado las propiedades mecánicas y físicas de los tableros de partículas de paja de arroz obteniendo materiales que podrían ser empleados con aplicaciones decorativas.

Se deben realizar nuevos ensayos en los que se aumente el porcentaje de almidón añadido, con el fin de mejorar los valores de MOR, MOE e IB y conseguir que los tableros puedan estar clasificados según las normas europeas [19]. Si se consigue este objetivo, el tablero de partículas biodegradable obtenido podría sustituir a los materiales tradicionales de madera utilizados en la construcción.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo de la Conselleria de Vivienda y Arquitectura Bioclimática de la Generalitat Valenciana a través del Plan IRTA, proyecto HBIRT3-2022-2.

Referencias

44. Comisión Europea. Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre residuos. Diario Oficial de la Unión Europea, 150, 109-140
45. BOE (2011). Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado, 181, 85650-85705
46. Soria, J. M., Miracle, M. R., and Vicente, E. (1987). "Aporte de nutrientes y eutrofización de la Albufera de Valencia". Limnetica, 3(2), 227-242
47. El Mansouri, N. E.; Salvadó, J. Structural characterization of technical lignins for the production of adhesives: Application to lignosulfonate, kraft, soda-anthraquinone, organosolv and ethanol process lignins. Ind. Crop. Prod. 2006, 24(1), 8-16.
48. Guimarães Carvalho, A.; Costa Lelis, R. C.; do Nascimento, A. M. Avaliação de adesivos à base de taninos de Pinus caribaea var. bahamensis e de Acacia mearnsii na fabricação de painéis aglomerados. Cienc. Florest. 2014, 24(2), 479-489.
49. Liao, R.; Xu, J.; Umemura, K. Low density sugarcane bagasse particleboard bonded with citric acid and sucrose: effect of board density and additive content. BioResources. 2016, 11(1), 2174-2185.
50. Umemura, K.; Sugihara, O.; Kawai, S. Investigation of a new natural adhesive composed of citric acid and sucrose for particleboard. J. Wood Sci. 2013, 59(3), 203-208.
51. Ferrandez-Garcia, M. T.; Ferrandez-Garcia, C. E.; Garcia-Ortuño, T.; Ferrandez-Garcia, A.; Ferrandez-Villena, M. Experimental Evaluation of a New Giant Reed (Arundo donax L.) Composite Using Citric Acid as a Natural Binder. Agronomy. 2019, 9(12), 882.
52. Kusumah, S. S.; Umemura, K.; Yoshioka, K.; Miyafuji, H.; Kanayama, K. Utilization of sweet sorghum bagasse and citric acid for manufacturing of particleboard I: Effects of pre-drying treatment and citric acid content on the board properties. Ind. Crop. Prod. 2016, 84, 34-42.
53. Widyorini, R.; Umemura, K.; Isnan, R.; Putra, D. R.; Awaludin, A.; Prayitno, T. A. Manufacture and properties of citric acid-bonded particleboard made from bamboo materials. Eur. J. Wood Wood Prod. 2016, 74(1), 57-65.
54. Ferrandez-Garcia, C. E.; Andreu-Rodriguez, J.; Ferrandez-Garcia, M. T.; Ferrandez-Villena, M.; Garcia-Ortuño, T. Panels made from giant reed bonded with non-modified starches. BioResources. 2012, 7(4), 5904-5916.
55. Kennedy, H. M. Starch- and dextrin-based adhesives. Adhesives from Renewable Resources. ACS Symposium Series. 1989, (385) 326-336.
56. Tester, R. F., and Karkalas, J. Polysaccharides. II. Polysaccharides from eukaryotes, In: Vandamme, E. J., De Baets, S., and Steinbuchel, A. (eds.), Starch in Biopolymers, Wiley-VCH, Weinheim. 2002, Vol. 6, pp. 381-438.
57. Burrell, M. M. Starch: The need for improved quality or quantity - An overview," J. Experimental Botany. 2003, 54(382), 451-456.
58. Lelievre, J. Starch gelatinization. J. Appl. Polym. Sci. 1974, 18, 293-296.
59. Atwell, W.A., Hood, L.F., Lineback, D.R., Varriano-Marston, E., and Zobel, H. F. The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. Cereal Food World. 1998, 33, 306-311.
60. Ratnayake, W. S., and Jackson, D. S. Starch gelatinization. Adv. Food Nutr. Res. 2008, 55, 221-268.
61. Xie, F., Halley, P. J., and Avérous, L. Rheology to understand and optimize processibility, structures and properties of starch polymeric materials. Progr. Polym. Sci. 2012, 37, 595-623.
62. EN 309. Particleboards. Definitions and classification. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
63. EN 323. Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.
64. EN 317. Particleboards and fiberboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.

65. EN 319. Particleboards and fiberboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of de board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.
66. EN 310. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.



Energía / Energia



Comparación de la eficiencia y rentabilidad de tres esquemas de estructuras soporte en instalaciones fotovoltaicas

J.L. García[1], A. Perdigones[1], R.M. Benavente[1], F.R. Mazarrón[1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, Dpto. Ingeniería Agroforestal, 28040 Madrid; joseluis.garciaf@upm.es, alicia.perdigones@upm.es, rm.benavente@upm.es, f.ruiz@upm.es

Abstract: The present study on photovoltaic installations shows that, due to the increase in the price of electricity, the profitability of tilted structures to optimize performance has increased, compared to the simpler systems with coplanar structures, in situations where the natural orientation of the roof it is not suitable. The price of electricity greatly affects the profitability of structures: considering an electricity price of around 0.2 euros/kWh, the payback for tilted structures is 2 to 4 years in many situations, compared to the installation of coplanar structures. With the prices of 2020 (around 0.1 euros/kWh) the same recovery of the investment increases to values of 5 to 8 years. The tilted structures can be placed in the optimal plane, or with the base of the panels perpendicular to the ridge; in east and west gabled roofs, the energy differences between these two schemes are less than 5% with roof angles of up to 30º. As a general conclusion, coplanar structures are disadvantaged in this context with higher energy prices, except in the combinations of roof pitch between 20º and 40º and azimuth between -30º and +30º.

Palabras clave: Coplanar structure, tilted structure, PVSYST, PV, solar energy

1. Introducción

En el contexto del suministro eléctrico en España, se han producido dos cambios importantes, que han dado como consecuencia una importante subida de los costes energéticos. Por un lado, la guerra en Ucrania, que ha generado una subida generalizada del precio de los combustibles fósiles, variando radicalmente la rentabilidad de las distintas fuentes energéticas. Por otro lado, los cambios normativos en España, incluyendo el cambio del sistema tarifario de la electricidad en España (junio de 2021), que en la práctica ha supuesto una subida del precio de la electricidad, y las nuevas regulaciones sobre energía fotovoltaica, entre ellas, el Real Decreto 244/2019, que regula las instalaciones fotovoltaicas para autoconsumo. Este conjunto de factores ha producido en el año 2023 un incremento del interés en las fuentes de energía renovables, y en particular, en las instalaciones fotovoltaicas para autoconsumo, que cualquier productor del sector agroindustrial puede instalar en sus edificios [1,2].

El presente estudio se centra en la optimización de la orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos, tema que ya se ha estudiado previamente [3,4,5]. La situación de partida en muchas edificaciones del sector agroindustrial es que las cubiertas no tienen la orientación e inclinación óptimas para la colocación de paneles. La orientación óptima es hacia el sur, mientras que muchas cubiertas tienen una orientación variable sureste, suroeste o en cualquier otra dirección. La inclinación óptima oscila entre 30º y 40º en la España peninsular, que combinada con la orientación sur, genera la máxima producción anual de electricidad para un panel fotovoltaico [6].

Cuando la cubierta tiene la orientación e inclinación óptima, se pueden colocar los paneles fotovoltaicos sobre y en paralelo a la cubierta, en lo que se conoce como una instalación coplanar.

Las estructuras coplanares se fijan directamente sobre la cubierta, utilizando fijaciones sencillas (como las de doble rosca o salvatejas). Este tipo de instalaciones son simples, de peso reducido, con poco impacto visual y precio económico. En cambio, cuando la orientación o inclinación no son óptimas, existen dos opciones: utilizar en cualquier caso la instalación coplanar (perdiendo potencial energético), o montar estructuras metálicas sobre la cubierta para colocar los paneles en la orientación e inclinación óptimas. Pueden ser estructuras de aluminio, bien sobre dados de hormigón, o bien con elementos de fijación que perforan la cubierta. Estas estructuras metálicas son más complejas, y tienen mayor peso, impacto visual y coste; si perforan la cubierta pueden ocasionar goteras. También hay que considerar las cargas de viento. A cambio de estas desventajas, la mejor colocación de los paneles producirá un incremento en la generación.

Los precios estables de la electricidad en los años anteriores habían llevado a unas ideas preconcebidas sobre la idoneidad de la utilización de estructuras coplanares en determinadas situaciones, y de estructuras metálicas de soporte más complejas en otras situaciones. Pero el incremento del coste de la electricidad en 2023 obliga a replantearse esta idoneidad: es necesario realizar nuevos estudios sobre la rentabilidad de ambas alternativas. Con la subida del coste de la electricidad, la colocación de estructuras metálicas puede ser una opción rentable en muchas más situaciones.

El objetivo de este estudio es evaluar la rentabilidad de la colocación de estructuras para optimizar la captación solar, en el marco de costes energéticos del año 2023. Para una mejor comprensión de las diferentes situaciones, parte del estudio se va a realizar con un caso práctico.

2. Materiales y métodos

El estudio va a comparar la rentabilidad de las instalaciones fotovoltaicas para autoconsumo con los siguientes tres tipos de estructuras:

1) Estructura coplanar.
2) Estructura metálica inclinada sobre la cubierta, con la base de los paneles en perpendicular a la cumbrera de la cubierta.
3) Estructura metálica inclinada sobre la cubierta, para colocar los paneles en el plano óptimo (paneles orientados al sur, inclinación entre 30º y 40º).

Un esquema de los tres tipos de estructuras se muestra en la Figura 1. La estructura coplanar da como resultado que los paneles quedan con el mismo azimut e inclinación que la cubierta. Si estos parámetros no son los óptimos, los paneles generarán por debajo de su potencial.
En la segunda opción los paneles se colocan sobre una estructura metálica colocada en perpendicular a la cumbrera. Con esta opción, en cubiertas inclinadas al sureste o suroeste, el azimut no será 0º (sur) sino un azimut sureste o suroeste. La inclinación sí se podrá elegir; utilizaremos la inclinación óptima de la localidad. Pero como el azimut no es el óptimo, los paneles generarán por debajo de su potencial.

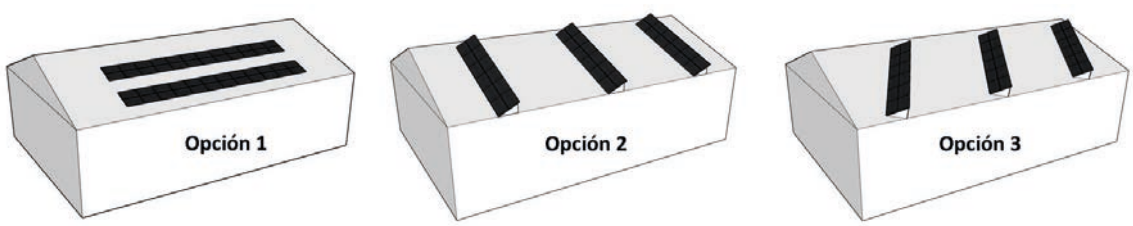


Figura 1. Tres esquemas de estructuras soporte en instalaciones fotovoltaicas.

En la tercera opción los paneles se colocan en el plano óptimo, con lo que proporcionarán la máxima energía posible en esa localización; como en la segunda opción, será necesario colocar estructuras en la cubierta. Estas estructuras no estarán colocadas en perpendicular a la cumbrera de la cubierta, sino con un cierto ángulo con respecto a la perpendicular, lo que puede complicar la instalación o reducir el número de paneles que se pueden colocar. El azimut será 0º (sur, el óptimo) y la inclinación será también la óptima para la localidad. En este caso los paneles sí podrán generar todo su potencial.

Para el cálculo de la energía solar que recibe cada plano se ha utilizado el programa informático PVSYST, versión 7.3.2. Como parámetros de cálculo se han utilizado un panel genérico del programa (de silicio monocristalino y potencia 340 W) y un inversor genérico del programa (de potencia 30 kW). La potencia de diseño de la instalación fotovoltaica ha sido de 96.9 kWpico de paneles (285 paneles) y 90 kW de inversores (3 inversores), por ser 100 kW un valor límite en la normativa española. Con estos valores de partida, se han realizado simulaciones con el programa PVSYST con valores de inclinación de 0º, 10º, 20º, 30º, 40º, 50º y 60º, y valores de azimut de -150º, -120º, -90º (este), -60º, -30º, 0º (sur), 30º, 60º, 90º (oeste), 120º, 150º y 180º (norte). Se han realizado dos conjuntos de simulaciones, en Varea (La Rioja) y en Almería, localidades de las cuales el programa PVSYST tiene datos climatológicos. El parámetro que se ha obtenido del programa PVSYST, en cada caso, ha sido la energía eléctrica que el sistema puede inyectar en la red, en MWh/año.

La rentabilidad de las opciones evaluadas se ha calculado con el payback [7], que una vez calculado, se ha comparado con la vida útil de la instalación fotovoltaica (estimada en 25 años). Se ha calculado este valor, comparando las opciones 1 y 3, para todos los casos mencionados en el apartado anterior, en Varea (La Rioja) y en Almería. Este payback, por las consideraciones que se indican en un apartado posterior - "Ahorro (euros/año)" -, se va a denominar "payback potencial". El payback potencial ha sido calculado usando la siguiente ecuación.

Payback potencial = Inversión / (Ahorro - Mantenimiento) Ecuación 1

En la cual:

- Inversión (euros): calculada multiplicando la potencia instalada de paneles fotovoltaicos (en Wpico) por el coste total de la instalación fotovoltaica por Wpico (euros/Wpico). Este coste total incluye toda la instalación (paneles, inversores, instalación eléctrica). Se ha considerado un coste de 1.5 euros/Wpico para una instalación con estructura coplanar [7], y de 1.63 euros/Wpico para una instalación con estructura metálica inclinada sobre la cubierta.

Los precios de las estructuras se han obtenido en el generador de precios de la construcción en España de CYPE Ingenieros, S.A. [8], en el que figura un presupuesto de ejecución material de 37.08 euros (por panel) para la estructura coplanar y de 82.19 euros (por panel) para la estructura metálica inclinada sobre la cubierta. El panel que se ha utilizado es de 340 W, lo que lleva a unos costes de las estructuras de 0,11 euros/Wpico (7.3% del total) para la estructura coplanar, y de 0,24 euros/Wpico (14.7% del total) para la estructura inclinada. Se ha considerado que el coste de la estructura inclinada es el mismo para las opciones 2 y 3.

- Ahorro (euros/año): calculado multiplicando la diferencia en el valor de la electricidad generada por cada instalación fotovoltaica (kWh/año), por el coste de compra de electricidad a la red (0.2 euros/kWh). En el presente estudio se considera, como una primera aproximación al problema, que toda la electricidad generada produce ahorros en la compra de energía a la red. Esto, evidentemente, no tiene porqué ser así, sino que dependerá de la potencia fotovoltaica instalada y del perfil del consumo eléctrico de la instalación; la evaluación de estas situaciones se

deja para un estudio posterior. Por estas consideraciones, en los resultados se va a denominar el payback calculado "payback potencial".

- Mantenimiento (euros/año): calculado como el 1% anual de la inversión.

Finalmente, para una mejor comprensión de las diferentes situaciones se va a utilizar un caso práctico. Se van a analizar las tres opciones planteadas para una instalación fotovoltaica de 90 kW (de inversores) situada en La Rioja. En este caso práctico el análisis se ha centrado en las cubiertas con orientación este (azimut -90) y oeste (azimut 90).

3. Resultados y discusión

Las Tablas 1 y 2 muestran las pérdidas de energía (en %) en la producción de energía fotovoltaica con distintos valores de inclinación y azimut del panel (que sería la energía producida con estructuras coplanares, opción 1), respecto a la energía producida con los paneles en el plano óptimo (con estructuras metálicas inclinadas sobre la cubierta, opción 3). Son valores calculados con el programa PVSYST en Varea (La Rioja) para la Tabla 1 y en Almería para la tabla 2. La energía calculada es la energía que potencialmente el sistema puede inyectar en la red (o en su caso, reducir de la factura eléctrica). Tanto en La Rioja como en Almería el plano óptimo tiene valores de 34º de inclinación y de 0º de azimut.

Tabla 1. Pérdidas de energía (en %) en la producción de energía fotovoltaica con distintos valores de inclinación y azimut del panel (valores de inclinación en vertical y de azimut en horizontal). Valores calculados con el programa PVSYST 7.3.2 en Varea (La Rioja, latitud 42.5º). La energía calculada es la energía que potencialmente el sistema puede inyectar en la red. La energía máxima, respecto a la cual se han calculado los demás valores de la tabla, es de 1325 kWh/año por kWpico de panel, para una inclinación de 34º y un azimut de 0º.

	-150º	-120º	-90º	-60º	-30º	0º	30º	60º	90º	120º	150º	180º
0º	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
10º	20	17	13	10	7	7	8	10	14	18	20	21
20º	28	22	15	8	4	2	4	9	16	23	29	31
30º	37	28	17	8	2	0	3	9	18	29	38	41
40º	45	33	20	10	3	0	3	11	22	35	47	50
50º	53	38	24	13	5	3	6	14	26	40	54	59
60º	59	43	29	17	10	8	10	18	30	45	60	67

Tabla 2. Pérdidas de energía (en %) en la producción de energía fotovoltaica con distintos valores de inclinación y azimut del panel (valores de inclinación en vertical y de azimut en horizontal). Valores calculados con el programa PVSYST 7.3.2 en Almería (latitud 36.8º). La energía calculada es la energía que potencialmente el sistema puede inyectar en la red. La energía máxima, respecto a la cual se han calculado los demás valores de la tabla, es de 1646 kWh/año por kWpico de panel, para una inclinación de 34º y un azimut de 0º.

	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	180
0	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
10	21	18	14	11	8	7	8	11	14	18	21	22
20	30	24	16	9	4	2	4	9	16	24	30	32
30	39	30	19	9	3	0	3	9	19	30	39	43
40	48	36	22	11	3	0	3	11	23	36	48	52
50	56	41	26	14	6	3	6	14	27	42	56	61
60	62	47	31	19	11	8	11	19	32	47	62	69

Como se puede observar en las Tablas 1 y 2, al tratarse de valores porcentuales, los valores son muy similares en La Rioja y en Almería. Se puede observar que colocar los paneles horizontales tiene unas pérdidas del 13%-14% respecto a colocarlos en el plano óptimo. También se observa que con orientaciones de las cubiertas este (azimut -90º), oeste (azimut 90º) y orientaciones peores (noreste, noroeste) las pérdidas de energía con una estructura coplanar sobre la cubierta siempre son superiores al 12% respecto a la orientación óptima de los paneles.

La Tabla 3 muestra el payback potencial de la instalación fotovoltaica con la opción 3 (estructura metálica inclinada sobre la cubierta, para colocar los paneles en el plano óptimo) respecto a la opción 1 (estructura coplanar), que es una opción más barata. El payback se denomina potencial porque, como ya se ha comentado, se considera que toda la energía generada por la instalación fotovoltaica ahorra energía eléctrica comprada en la red.

Como se puede observar en la Tabla 3, el análisis indica que, con el planteamiento que se ha realizado, en la mayoría de las situaciones interesa, desde el punto de vista económico, instalar estructuras inclinadas para conseguir el plano óptimo. En este resultado influye que se considera que toda la energía se aprovecha ahorrando energía comprada a la red, a un precio de 0.2 euros/kWh. En una situación real puede ocurrir, dependiendo de varios factores y de la normativa, que parte de la energía generada deba inyectarse en la red, consiguiendo un precio inferior a 0.2 euros/kWh, o incluso que parte de la energía no se pueda aprovechar porque no se pueda usar ni inyectar; también el precio de 0.2 euros/kWh puede ser diferente. En un apartado posterior de este estudio se realiza un análisis de sensibilidad evaluando estas situaciones. Sí se verifica en la Tabla 3 que si el precio de la energía eléctrica es caro (0.2 euros/kWh), en muchas situaciones va a resultar muy interesante la instalación de estructuras inclinadas para buscar el plano óptimo.

Se debe destacar que los paybacks de la Tabla 3 son paybacks relativos a las estructuras; se compara la opción 3, con una inversión adicional en estructuras y unos ahorros posteriores, con la opción 1. No son valores de payback de la instalación fotovoltaica, ya que los paneles e inversores son los mismos en la opción 1 y en la opción 3; sólo cambian las estructuras.

Tabla 3. Payback potencial (en años) de la instalación fotovoltaica con la opción 3 (estructura metálica inclinada sobre la cubierta, para colocar los paneles en el plano óptimo) respecto a la opción 1 (estructura coplanar), más barata. Valores calculados con distintos valores de inclinación y azimut del panel (valores de inclinación en vertical y de azimut en horizontal) en Varea (La Rioja, latitud 42.5º). El payback se denomina potencial porque se considera que toda la energía generada por la instalación fotovoltaica ahorra energía eléctrica comprada en la red, con un precio de 0.2 euros/kWh. Se muestran en negrita las tres combinaciones en las cuales el payback es superior a 25 años.

	-150º	-120º	-90º	-60º	-30º	0º	30º	60º	90º	120º	150º	180º
0º	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
10º	2,5	2,9	3,8	5,2	7,1	8,1	7,0	5,1	3,7	2,9	2,5	2,4
20º	1,8	2,3	3,4	6,3	15,3	**28,9**	13,7	5,8	3,2	2,2	1,7	1,6
30º	1,3	1,8	2,9	6,4	**30,2**	**>100**	22,8	5,7	2,7	1,7	1,3	1,2
40º	1,1	1,5	2,5	5,4	23,6		17,3	4,7	2,3	1,4	1,1	1,0
50º	0,9	1,3	2,1	4,0	10,4		9,2	3,7	1,9	1,2	0,9	0,8
60º	0,8	1,1	1,7	3,0	5,4		4,9	2,7	1,6	1,1	0,8	0,7

La Tabla 3 corresponde a la localidad de Varea (La Rioja). Se ha realizado la misma tabla en Almería, pero los resultados son prácticamente idénticos, por lo que la tabla de Almería no se incluye en el presente documento. Sí se ha observado que, de forma sistemática, el payback es igual o ligeramente superior en Varea (La Rioja), por lo que la instalación de estructuras metálicas inclinadas es ligeramente más interesante (desde el punto de vista económico) en Almería que en La Rioja, a igualdad de los demás factores.

La Tabla 4 muestra los resultados de una situación más concreta, en la que se evalúa la opción 2 (estructura metálica inclinada sobre la cubierta, con la base de los paneles en perpendicular a la cumbrera de la cubierta). El análisis se ha realizado en Varea (La Rioja) con una cubierta a dos aguas, con orientación este en una de ellas y oeste en la otra. En la Tabla 4 se muestran las pérdidas de energía (en %) en la producción de energía fotovoltaica de las opciones 1 y 2 respecto a la opción 3, que usa el plano óptimo.

Tabla 4. Pérdidas de energía (en %) en la producción de energía fotovoltaica con las opciones 1 y 2, respecto a la opción 3 (plano óptimo), con una cubierta a dos aguas con orientaciones este y oeste. La opción 1 tiene estructura coplanar y la opción 2, estructura metálica inclinada sobre la cubierta, con la base de los paneles en perpendicular a la cumbrera. Valores calculados con el programa PVSYST 7.3.2 en Varea (La Rioja, latitud 42.5º). La energía calculada es la energía que potencialmente el sistema puede inyectar en la red. La energía máxima, respecto a la cual se han calculado las pérdidas, es de 1325 kWh/año por kWpico de panel (opción 3).

Ángulo de la cubierta (º)	Opción 1			Opción 2		
	Inclinación (º)	Azimut (º)	Pérdidas (%)	Inclinación (º)	Azimut (º)	Pérdidas (%)
0	0	0	13.2	34	0	0
10	10	-90 y 90	13.7	34	-14.6 y 14.6	0.6
20	20	-90 y 90	15.3	34	-28.4 y 28.4	2.1
30	30	-90 y 90	17.8	34	-40.5 y 40.5	4.3
40	40	-90 y 90	21.1	34	-51.2 y 51.2	6.7

Como se puede observar en la Tabla 4, las opciones 2 y 3 tienen unos niveles de producción de energía similares. En este caso práctico estudiado, las pérdidas en la opción 2, respecto a la opción 3, son inferiores al 5% con ángulos de la cubierta de hasta 30º, en estas edificaciones a dos aguas con una cubierta al este y otra al oeste. El coste de las estructuras inclinadas sería similar en las opciones 2 y 3. Por lo tanto, en cada caso correspondería tomar la decisión de si instalar la opción 2, que puede ser más cómoda (por colocar los paneles en perpendicular a la cumbrera) o puede permitir colocar más paneles (por optimizar más el espacio); o si instalar la opción 3, con los paneles en diagonal respecto a la cumbrera, optimizando la captación solar en el plano óptimo.

En la Tabla 4 se observa de nuevo que la opción 1 (estructuras coplanares) sí tiene unas pérdidas superiores, por lo que vuelve a ser menos eficiente en este análisis.

Finalmente, en la Figura 2 se realiza un análisis de sensibilidad respecto al precio obtenido por la energía. El precio global obtenido puede variar, porque varíe el precio de compra, porque

parte de la energía fotovoltaica se inyecte en la red, o porque una parte de la energía que se genere no se pueda utilizar. En la Figura 2 se representan los valores de payback de las opciones 2 y 3 (que incluyen estructuras) respecto a la opción 1, más barata, con diferentes inclinaciones de la cubierta, calculados en Varea (La Rioja) en una edificación con cubierta a dos aguas con orientaciones este y oeste. De nuevo se subraya que se trata de paybacks relativos a la estructura, no paybacks de la instalación fotovoltaica.

En la Figura 2 se puede observar que:

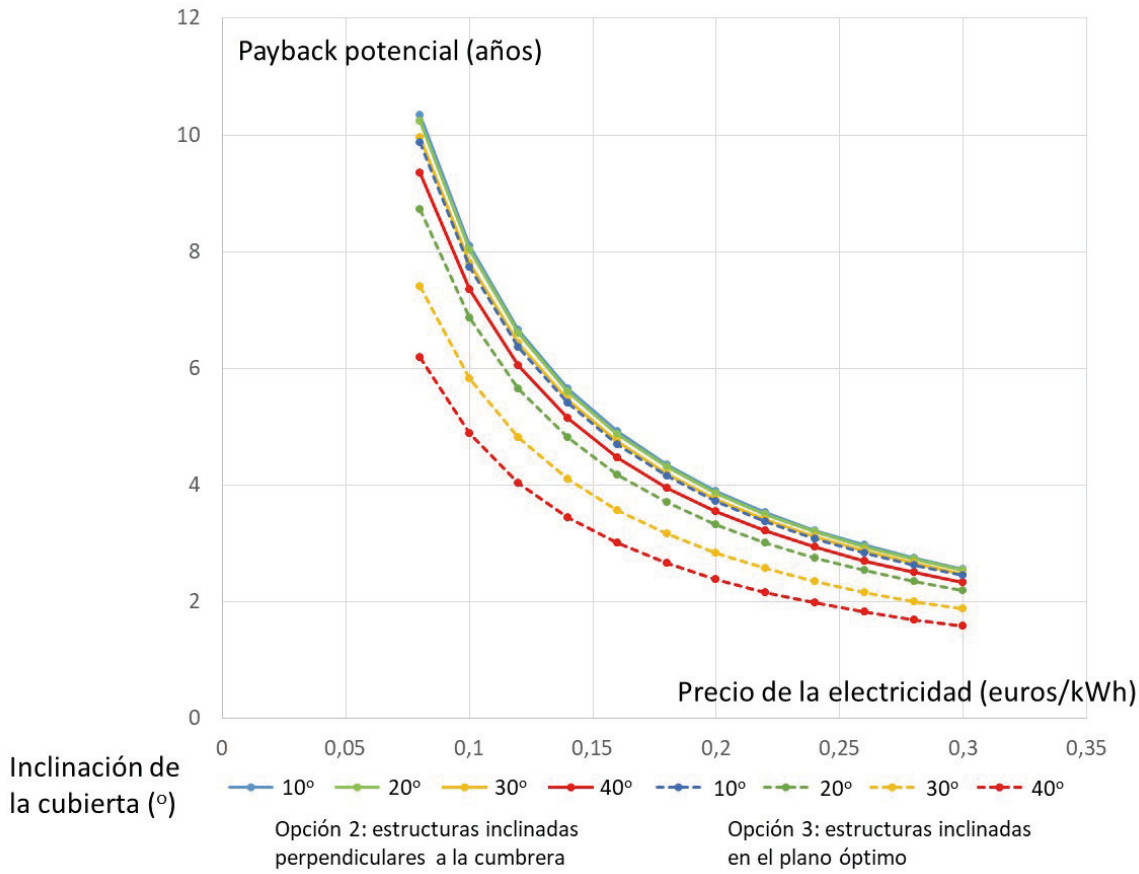


Figura 2. Valores del payback potencial en función del precio de la electricidad, para las opciones 2 y 3 (con estructuras inclinadas) respecto a la opción 1 (con estructura coplanar). Valores con diferentes inclinaciones de la cubierta, calculados en Varea (La Rioja) en una edificación con cubierta a dos aguas con orientaciones este y oeste.

- En general, los valores de payback son inferiores a 10 años en prácticamente toda la Figura 2, de lo que se deduce que la instalación de estructuras es casi siempre interesante en edificios a dos aguas con cubiertas al este y oeste.
- El precio de la electricidad afecta mucho a la rentabilidad de las estructuras; como se puede observar en la Figura 2, el payback pasa de valores de 5 a 8 años con un precio de la energía de 0.1 euros/kWh, a valores de payback de 2 a 4 años con un precio de la energía de 0.2 euros/kWh.

- La inclinación de la cubierta afecta bastante a la rentabilidad de las estructuras; como se puede observar en la Figura 2, el payback es menor con mayores inclinaciones. Esto se debe a que es un payback respecto a la estructura coplanar, que es mucho menos eficiente con valores altos de inclinación de la cubierta; por lo que la rentabilidad comparativa de las estructuras inclinadas es mejor.
- Se observa en la Figura 2 que la curva se aplana con valores altos del precio de la electricidad; por lo tanto, si la electricidad es muy cara, se reducen las diferencias en el valor del payback entre las opciones 2 y 3, porque en ambos casos se recupera rápidamente la inversión.

4. Conclusiones

El estudio muestra que, debido al incremento del precio de la electricidad, ha aumentado la rentabilidad de las estructuras inclinadas para optimizar la captación, respecto a los sistemas más sencillos con estructuras coplanares, en situaciones donde la orientación natural de la cubierta no es adecuada. El estudio cuantifica algunos aspectos de esta variación de la rentabilidad:

- El precio de la electricidad afecta mucho a la rentabilidad de las estructuras. La recuperación de la inversión de las estructuras inclinadas es de 2 a 4 años en muchas situaciones, respecto a la instalación de estructuras coplanares, considerando un precio de la electricidad en torno a 0.2 euros/kWh. Con los precios de 2020 (en torno a 0.1 euros/kWh) la recuperación de la inversión se incrementa a valores de 5 a 8 años.
- Se pueden colocar las estructuras inclinadas en el plano óptimo, o bien con la base de los paneles en perpendicular a la cumbrera. En cubiertas a dos aguas orientadas al este y al oeste, las diferencias entre estos dos esquemas son inferiores al 5% con ángulos de la cubierta de hasta 30º, por lo que se pueden evaluar ambas alternativas considerando además aspectos prácticos como la facilidad de la instalación o la posibilidad de colocar más paneles, sin que las diferencias en captación sean excesivas.
- En general las estructuras coplanares salen desfavorecidas en este contexto con precios más altos de la energía, con pérdidas de energía superiores al 12% en muchas situaciones. El payback de las estructuras inclinadas respecto a las coplanares, con los precios actuales, es inferior a 12 años en todas las situaciones, excepto en las combinaciones de inclinación de la cubierta entre 20º y 40º y azimut entre -30º y +30º. Desde un punto de vista económico, en estas últimas situaciones sí se puede evaluar la instalación de estructuras coplanares. Otros puntos de vista, como el impacto visual o las cargas de viento sobre la cubierta, pueden influir en la toma de la decisión del tipo de estructura a elegir.

Referencias

67. Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. Photovoltaic Self-Consumption in Buildings: A Review. Applied Energy. 2015, 142, 80-94.
68. De Blas M.A., Torres J.L., Prieto E., García A. Selecting a Suitable Model for Characterizing Photovoltaic Devices. Renewable Energy. 2002, 25, 371–380.
69. Raptis P.I., Kazadzis S., Psiloglou B., Kouremeti N., Kosmopoulos P., Kazantzidis A. Measurements and Model Simulations of Solar Radiation at Tilted Planes, towards the Maximization of Energy Capture. Energy. 2017, 130, 570–580.
70. Diez F.J., Martínez-Rodríguez A., Navas-Gracia L.M., Chico-Santamarta L., Correa-Guimaraes A., Andara R. Estimation of the Hourly Global Solar Irradiation on the Tilted and Oriented Plane of Photovoltaic Solar Panels Applied to Greenhouse Production. Agronomy. 2021, 11, 495.

71. Boziková M., Bilcík M., Madola V., Szabóová T., Kubík L., Lendelová J., Cviklovic V. The Effect of Azimuth and Tilt Angle Changes on the Energy Balance of Photovoltaic System Installed in the Southern Slovakia Region. Applied Sciences. 2021, 11, 8998.
72. Barbón A., Bayón-Cueli C., Bayón L., Rodríguez-Suanzes C. Analysis of the Tilt and Azimuth Angles of Photovoltaic Systems in Non-Ideal Positions for Urban Applications. Applied Energy. 2022, 305, 117802.
73. Perdigones A., García I., Porras-Prieto C.J., Gómez-Villarino M.T., Baptista F., García J.L. Evaluation of the Cost-Effectiveness of Grid-Connected Photovoltaic Solar Energy in Wineries. Ciência e Técnica Vitivinícola. 2021, 36(1), 45-54.
74. CYPE Ingenieros, S.A. Generador de Precios de la Construcción. http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Instalaciones/Electricas/Solar_fotovoltaica.html#gsc.tab=0

Energía solar térmica para calentamiento de agua en bodegas

J.L. García[1], F. Baptista[2], A. Perdigones[1], J. Lizcano[1], F.R. Mazarrón[1]

[1] Universidad Politécnica de Madrid, Dpto. Ingeniería Agroforestal, 28040 Madrid; joseluis.garciaf@upm.es, alicia.perdigones@upm.es, juanlizcano@alumnos.upm.es, f.ruiz@upm.es

[2] Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, MED—Instituto Mediterrâneo para a Agricultura, Ambiente e Desenvolvimento, Universidade de Évora, 7000-849 Évora, Portugal; fb@uevora.pt

Abstract: This paper analyzes the sizing, feasibility and profitability of a solar water heating system (SWHS) with evacuated tube collectors in the wine industry. Specifically, it took as a reference the hot water consumption pattern of a medium sized winery, in a location with 4.0 peak sun hour. A total of 2500 cases were analyzed, considering different energy prices, investment required and size of the installation. The energy analyses were carried out with a simulation tool validated with data monitored on an experimental solar system. The results show that the new energy context makes the investment in the SWHS attractive, with paybacks between 3 and 10 years depending on the energy price and the price of the investment. Furthermore, energy consumption reductions of more than 35% are achieved in most of the scenarios analyzed. For this, it is essential to carry out an optimized design, since the savings achieved are very sensitive to the collector surface area and the energy price.

Palabras clave: Solar water-heating system; winery; energy saving; profitability

1. Introducción

El vino es el producto de alimentación y bebidas líder en exportación en la EU, con más 16 billones de euros (Fooddrinkeurope, 2022). La importancia del sector se traduce en una alta demanda energética, siendo parte de la misma debida al calentamiento de agua. El agua caliente se utiliza fundamentalmente en limpieza de filtros, embotellado, lavado de barricas y rehidratación de levaduras.

Los protocolos de limpieza recomendados para limpiar los filtros de membrana de las embotelladoras varían según los suministradores de cartuchos (InVIA, Pall, Agrovin, etc), con temperaturas entre 80 y 90ºC y tiempo entre 10 y 30 minutos según lavados previos.

El consumo de agua caliente en los filtros tangenciales depende de factores como la superficie de filtración, tratamientos previos del vino, etc. El volumen recomendado para un ciclo de limpieza puede variar desde unas decenas hasta centenares de litros, con temperaturas máximas de 60 o 70 ºC (Romfil, BucherVaslim, etc.).

Se pueden emplear distintos aparatos en función de la cantidad de barricas a lavar, destacando los cabezales de lavado flexible multidireccional con aspiración, los lavabarricas manuales y los semiautomáticos. La demanda de agua caliente requerida en la limpieza de las barricas también presenta grandes variaciones en función de las características y el tipo de lavado (manual, semiautomático...), siendo habituales temperaturas entre 50 y 90ºC (incluso vapor a 130ºC) y hasta 100 litros por barrica.

Para la rehidratación de la levadura seca en los pies de cuba, la mayoría de suministradores (Vinqualis, LarroqueOenologie, etc.) recomiendan valores similares de temperatura y volumen

de agua: 20-30 g de levadura por Hl de vino, rehidratando la misma en 10 veces su peso de agua a 35-40ºC.

La integración de sistemas solares térmicos en procesos de la industria de alimentación y bebidas ha sido abordada por numerosos trabajos científicos en los últimos años [2], con estudios en la industria cárnica [3-4], la industria láctea [5], etc. Sin embargo, no se tiene constancia de trabajos previos que analicen la viabilidad en el sector vitivinícola.

Por otra parte, algunos de los citados estudios previos presentan grandes variaciones de rentabilidad del sistema solar en función del contexto y la tecnología. Así, por ejemplo, en una industria cárnica, se obtuvieron paybacks desde 7 años a más de 20 años [4].

Dado el vacío de conocimiento existente, el presente trabajo analiza la viabilidad y rentabilidad de utilizar sistemas solares térmicos (SST) para el calentamiento del agua requerida en las bodegas.

2. Materiales y métodos

2. 1. Demanda de agua caliente analizada

Tras caracterizar el consumo de agua caliente de numerosas bodegas de España y Portugal, se ha seleccionado un patrón de demanda correspondiente a una bodega de tamaño medio, típica de denominaciones como Ribera del Duero o Rioja. Se trata de una bodega con un consumo anual medio de agua caliente en torno a 250 kl (Fig. 1). Presenta una producción de 1 millón de litros de vino que vende embotellada en su totalidad. El trabajo se realiza habitualmente en 1 turno de 8 horas.

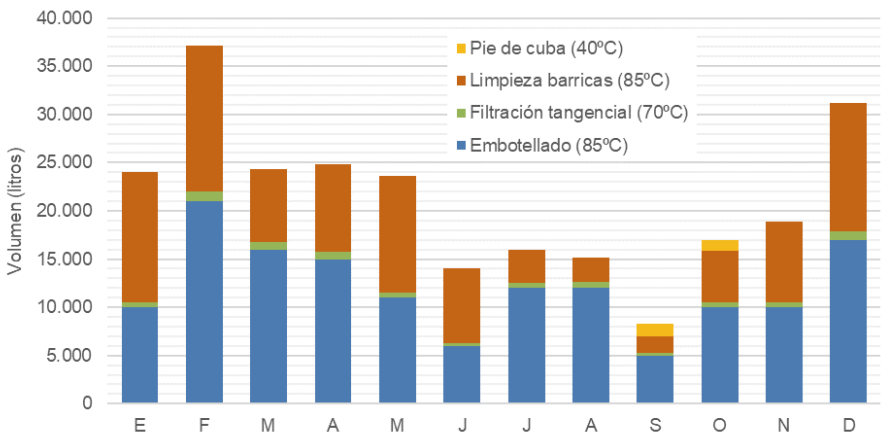


Figura 1. Demanda mensual de agua caliente analizada.

El embotellado se lleva a cabo durante la jornada laboral en función de la demanda, con un promedio de 11±5 días al mes. Se realiza la limpieza antes y después del embotellado, con agua a 85 ºC.

La filtración tangencial se realiza durante días de trabajo consecutivos según las necesidades del mes, con un promedio de 8±3 días al mes. La limpieza del filtro se realiza con agua a 70ºC, siendo habitual la limpieza al finalizar el filtrado.

La limpieza de barricas se realiza de manera continua en pocas horas al mes (promedio de 6±3 horas mensuales), utilizando agua a 85ºC.

Todo el vino se fermenta con levaduras comerciales utilizando agua a 40ºC.

2. 2. Sistema solar y simulación energética

El análisis energético se ha llevado a cabo utilizando una herramienta de simulación desarrollada en Visual Basic for Application y validada a partir de los datos experimentales obtenidos en un SST experimental. Se trata de un sistema solar con captador de tubos de vacío y circulación activa utilizado en trabajos previos [4, 6-9]. Presenta una superficie total de captación de 2 m^2 y un depósito de 80 L. Dicha herramienta ha sido utilizada previamente en el caso de la industria cárnica [4].

La herramienta calcula las variaciones de energía en el depósito y su efecto sobre la temperatura del agua, con un intervalo horario. Calcula la energía captada del sol que se transfiere al depósito, las pérdidas de energía con el ambiente y la energía extraída en las descargas del agua caliente demandada.

La energía cedida al depósito procedente del captador (Q_{SST}, W m^{-2}) se estima mediante un modelo validado con los datos del SST experimental (ecuación 1), a partir de la irradiación (G, W m^{-2}), la temperatura ambiente (T_a, ºC) y la temperatura del agua en el depósito (T_d, ºC):

$$Q_{SST} = 0{,}7551G - 43{,}2053(T_d - T_a) - 0{,}2905(T_d - T_a)^2 \qquad (1)$$

La pérdida de energía con el ambiente se ha calculado multiplicando el salto térmico (agua del depósito y temperatura ambiente) por la transmitancia del aislamiento (suponiendo 1.2 kW/24h según DIN 4753/8) y por la superficie del mismo. Se ha considerado que el depósito está situado en el interior de una nave típica de bodegas, cuya temperatura interior ha sido calculada mediante simulación, utilizando un modelo de simulación desarrollado y validado en un trabajo previo [10].

Cuando se produce una descarga de agua caliente, la energía extraída se calcula a partir de la energía demandada, teniendo en cuenta la diferencia de temperatura entre el agua demandada y la temperatura del agua de la red de suministro.

Tras calcular las variaciones de energía (ΔE, Wh), se determina la temperatura del agua del depósito de cada una de las horas del año a partir de la temperatura del intervalo horario anterior, teniendo en cuenta el volumen del depósito (V_d, m^3), el calor específico (c_p , Wh kg^{-1} $ºC^{-1}$) y la densidad del fluido (ϱ, kg m^{-3}).

$$T_{d,después} = T_{d,antes} + \frac{\Delta E}{V_d \cdot \rho \cdot c_p} \qquad (2)$$

A partir de los sumatorios anuales de irradiación, energía suministra por el sistema solar, energía total demandada y energía suministrada por el sistema convencional, la herramienta lleva a cabo el cálculo de rentabilidad. Calcula el coste total de la factura energética durante la vida útil de la instalación (20 años), teniendo en cuenta el ahorro anual generado y el coste de la inversión, así como otros indicadores como el payback actualizado. Se ha asumido una tasa de actualización de 1.5% y un coste anual de mantenimiento anual del 2% de la inversión.

2. 3. Escenarios analizados

Dada la gran fluctuación de precios de la energía y del coste de las instalaciones experimentada durante los últimos años, se han analizado 25 escenarios diferentes, combinación de 5 precios de la energía del sistema de suministro convencional (de 0.10 a 0.50 €/kWh, con intervalo 0.10) y 5 precios de la inversión en el SST (desde 500 €/m^2 hasta 900 €/m^2, con intervalo de 100 €/m^2).

Se ha seleccionado una localización con radiación de 4.0 Horas Solar Pico (HSP), teniendo presente que la mayoría de regiones de producción vitivinícola del mundo se encuentran en localizaciones con irradiación entre 3 y 5. En concreto, se han utilizado los datos de radiación y temperatura disponibles en el archivo climatológicos de EnergyPlus de Montpellier (FRA_Montpellier.076430_IWEC.epw), localización con extensa tradición vitivinícola.

Con el fin de determinar el dimensionamiento óptimo del SST, para cada uno de los escenarios, se han calculado 100 tamaños diferentes del sistema solar. En total, se ha llevado a cabo el análisis energético y económico de 2500 casos.

3. Resultados y discusión

3. 1. Dimensionamiento del SST

El dimensionamiento del SST condiciona fuertemente la viabilidad del mismo, siendo clave para obtener un máximo ahorro en el gasto energético logrado durante la vida útil de la instalación (inversión + facturas energéticas anuales + mantenimiento).

La dificultad para llevar a cabo un correcto diseño radica en que el tamaño óptimo presenta fuertes variaciones según el precio de la energía del sistema de suministro convencional (Fig. 2). Así, con un precio final del kWh de 0.10-0.20 € (considerando impuestos...), próximo al de hace unos años, el SST apenas consigue reducir el gasto total durante 20 años, debido a que el limitado ahorro en las facturas anuales no compensa la inversión inicial realizada. En este contexto, el mayor tamaño del SST conlleva pérdidas frente al escenario sin sistema solar, salvo en casos con un precio de la inversión bajo.

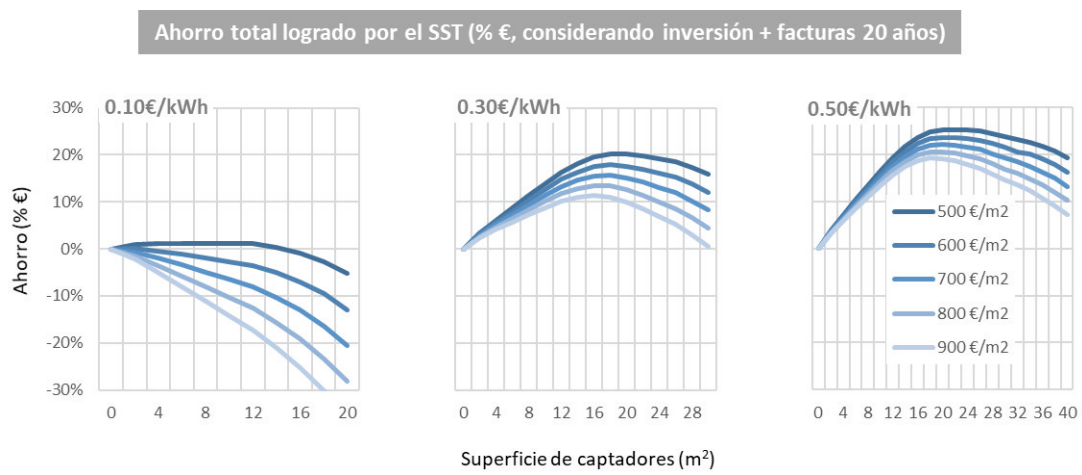


Figura 2. Variaciones del ahorro total (% € frente a escenario sin sistema solar) logrado por el SST durante la vida útil de la instalación (inversión + facturas 20 años), en función de la superficie de captadores y del precio de la energía (€/kWh).

Por el contrario, si el precio de la energía se estabilizase en valores de los últimos dos años, entre 0.30 y 0.50 €/kWh, el tamaño óptimo para la bodega analizada aumentaría a superficies de captación entre 15 y 22 m² (Fig. 3). El SST lograría ahorros en el gasto energético total nada despreciables, superiores al 20% en muchos casos.

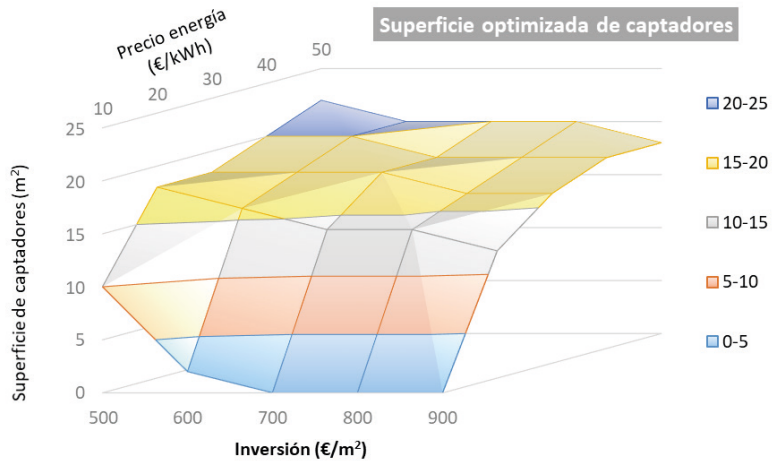


Figura 3. Superficie de captadores que maximiza el ahorro total (% € frente a escenario sin sistema solar) logrado por el SST durante la vida útil de la instalación (inversión + facturas 20 años), en función del coste de la inversión necesaria y del precio de la energía.

3. 2. Reducción del consumo energético

La reducción del consumo de energía (kWh) está fuertemente ligada al tamaño del SST. Considerando los casos con sistema optimizado (máximo ahorro financiero durante 20 años), la reducción alcanzaría valores superiores al 35% en un gran número de escenarios analizados, incluidos los de un precio superior a 0.20 €/kWh (Fig. 4). Desde el punto de vista medioambiental y de eficiencia energética, el SST logra reducciones nada desdeñables.

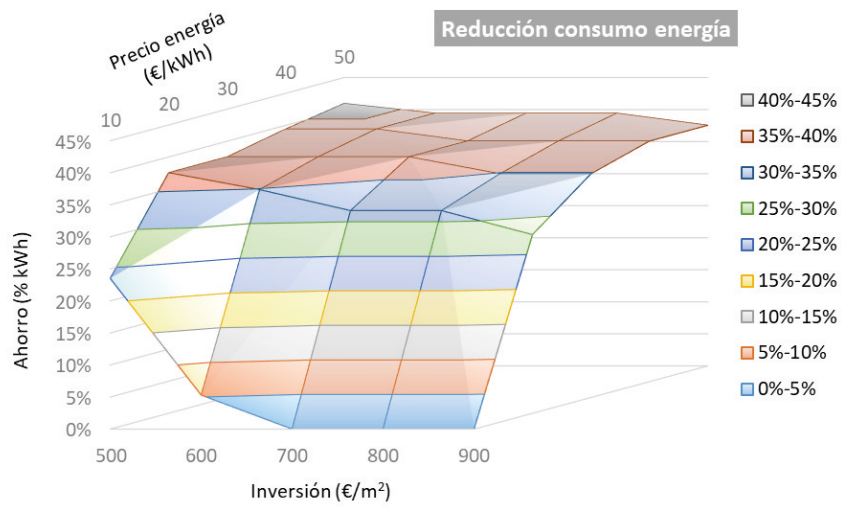


Figura 4. Reducción del consumo de energía logrado por el SST de dimensionamiento optimizado.

3. 3. Rentabilidad

El incremento del precio de la energía de los últimos dos años permite obtener una rentabilidad atractiva del SST, asumiendo que se mantendrán en el futuro. Así por ejemplo, con

un precio de 0.30 €/kWh, el payback oscilaría entre 5 y 10 años dependiendo del precio de la inversión; con 0.40 €/kWh, entre 4 y 8 años; con 0.50 €/kWh, entre 3 y 6 años (Fig. 5).

Si los precios volviesen a caer a valores de hace unos años, la rentabilidad de la inversión se vería condicionada, siendo superior a 10 años para 0.20 €/kWh, dejando de ser rentable si los precios alcanzasen 0.10 €/kWh.

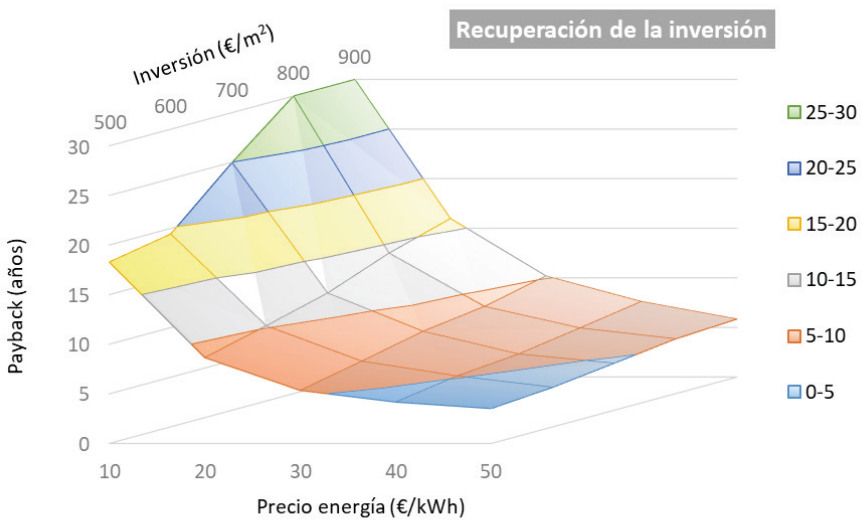


Figura 5. Payback actualizado de la inversión realizada en el SST de tamaño optimizado.

Adoptando criterios de diseño más conservadores que el de maximizar el ahorro durante la vida útil, se lograría aumentar la rentabilidad de la inversión, a costa de reducir el ahorro logrado y la eficiencia energética de la bodega.

4. Conclusiones

El presente trabajo ha analizado la viabilidad y rentabilidad de utilizar sistemas solares térmicos (SST) con captadores de tubos de vacío en el sector vitivinícola. En concreto, toma como referencia un patrón de consumo de agua caliente correspondiente a una bodega de tamaño medio, situada en una localización con 4.0 HSP.

Los resultados demuestran que el nuevo contexto energético (precios de la energía superiores a 0.30 €/kWh) hace atractiva la inversión en el SST para suministrar parte de la demanda de agua caliente de la bodega. El payback oscila entre 3 y 10 años dependiendo del precio de la energía y de la inversión necesaria. Asimismo, se logran reducciones del consumo de energía superiores al 35% en gran parte de los escenarios analizados.

Para lograr alcanzar los resultados descritos, es básico llevar a cabo un correcto dimensionamiento del SST. La dificultad para lograrlo radica en que el tamaño óptimo presenta fuertes variaciones según el precio de la energía del sistema de suministro convencional. Por ello, podría ser conveniente adoptar criterios de diseño más conservadores que el de maximizar el ahorro durante la vida útil, aumentando la rentabilidad de la inversión a costa de una menor eficiencia energética de la bodega.

Futuros trabajos deben ampliar la casuística y determinar la viabilidad y rentabilidad del SST con patrones más extremos y otras localizaciones.

Referencias

1. Fooddrinkeurope (2022). Data and Trends of the EU Food and Drink Industry, from https://www.fooddrinkeurope.eu/wp-content/uploads/2023/01/FoodDrinkEurope-Data-Trends-2022-digital.pdf
2. Ismail, M. I., Yunus, N. A., & Hashim, H. (2021). Integration of solar heating systems for low-temperature heat demand in food processing industry - A review. [Review]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 147.
3. Cotrado, M., Dalibard, A., Soll, R., & Pietruschka, D. (2014). Design, control and first monitoring data of a large scale solar plant at the meat factory Berger, Austria. In A. Haberle (Ed.), Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (Vol. 48, pp. 1144-1151). Amsterdam: Elsevier Science Bv
4. Garcia, J. L., Porras-Prieto, C. J., Benavente, R. M., Gomez-Villarino, M. T., & Mazarron, F. R. (2019). Profitability of a solar water heating system with evacuated tube collector in the meat industry. [Article]. Renewable Energy, 131, 966-976.
5. Bühler, F., Nguyen, T.-V., Elmegaard, B., & Modi, A. (2016). Process and Economic Optimisation of a Milk Processing Plant with Solar Thermal Energy. In Z. Kravanja & M. Bogataj (Eds.), Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 38, pp. 1347-1352): Elsevier.
6. Mazarron, F. R., Javier Porras-Prieto, C., Luis Garcia, J., & Maria Benavente, R. (2016). Feasibility of active solar water heating systems with evacuated tube collector at different operational water temperatures. Energy Conversion and Management, 113, 16-26.
7. Porras-Prieto, C., Lizcano, J., García, J., & Mazarrón, F. (2018). Energy Saving in an ETC Solar System to Produce High Temperature Water. Energies, 11(4), 840.
8. Porras-Prieto, C. J., Benedicto-Schonemann, S., Mazarron, F. R., & Benavente, R. M. (2016). Profitability Variations of a Solar System with an Evacuated Tube Collector According to Schedules and Frequency of Hot Water Demand. Energies, 9(12).
9. Porras-Prieto, C. J., Mazarron, F. R., de los Mozos, V., & Garcia, J. L. (2014). Influence of required tank water temperature on the energy performance and water withdrawal potential of a solar water heating system equipped with a heat pipe evacuated tube collector. Solar Energy, 110, 365-377.
10. Mazarron, F. R., Cid-Falceto, J., & Canas-Guerrero, I. (2012). Assessment of aboveground winery buildings for the aging and conservation of wine. Applied Engineering in Agriculture, 28(6), 903-910.

Reducción de la emisiones de CO_2 en cultivo de maíz a través de la agricultura de precisión.

M. Barrera-Báez[1], E. Ruiz-González[1], S. Mingo-Marín[1], M. Pérez-Ruiz[1]

[1] Universidad de Sevilla, Área de Ingeniería Agroforestal, Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos, Ctra. Sevilla-Utrera km. 1, 41013 Sevilla, España
e-mails: mbarrera@us.es; eruiz4@us.es; sdemingo@us.es; manuelperez@us.es

Abstract: Many farmers already have precision farming equipment, but its disuse is due to lack of knowledge on how to use it. With the assistance of technicians, farmers have been trained in the operation of this equipment, enabling better distribution of inputs such as fertilizer and seeds. The project has developed and validated a Precision Farming Techniques Protocol (PTAP) specifically for sustainable and climate-resilient maize cultivation. The creation of a certification of CO2 emissions in maize cultivation in Spain has been achieved, following PTAP guidelines, by calculating the carbon footprint using a greenhouse gas (GHG) emissions calculator, designed to be easy to use and accurate. The results obtained show a significant reduction in the carbon footprint of maize cultivation compared to the default values used previously. This certified approach provides a solid basis for climate change mitigation in the agricultural sector and helps farmers adapt to an environment of climate change. Furthermore, it is hoped that this information will have an influence in the regulation of the biofuels sector in Europe, highlighting the importance of labelling biofuels with the total carbon footprint of the production process.

Palabras clave: certificación; sostenibilidad; biocombustible; aplicación variable

1. Introducción

El cambio climático es uno de los problemas más apremiantes de nuestro tiempo. Sus efectos se hacen cada vez más evidentes en todo el mundo, manifestándose en fenómenos meteorológicos extremos, aumento del nivel del mar y pérdida de biodiversidad [1]. Entre las actividades humanas que más contribuyen a este fenómeno se encuentra la agricultura, que genera gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono. En las últimas décadas, la agricultura europea y española, además de ser una actividad destinada a la producción de alimentos con altas garantías de calidad y seguridad alimentaria, es la base para conservar la biodiversidad en suelos, paisajes y población rural, además de ser, en el caso del maíz, materia prima para alimentación animal y biocarburantes, jugando un rol determinante para disminuir la dependencia energética nacional [2].

La creciente preocupación sobre el cambio climático ha impulsado la adopción de medidas para reducir la huella de carbono. Una estrategia efectiva es promover la agricultura sostenible mediante el uso de herramientas de agricultura de precisión. Estas tecnologías

permiten una gestión más eficiente y precisa de los insumos agrícolas, lo que a su vez disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de cultivos [3].

Así, la implementación de prácticas agrícolas más sostenibles se convierte en un camino fundamental para mitigar el impacto del cambio climático. La adopción de la agricultura de precisión no solo contribuye a la reducción de la huella de carbono, sino que también puede aumentar la productividad y la eficiencia en el uso de recursos, beneficiando tanto al medio ambiente como a los agricultores y la sociedad en general.

En este contexto, el grupo operativo GO Maíz Sostenible ha trabajado en el impulso de la sostenibilidad del cultivo de maíz en España mediante el empleo de una combinación de metodologías basadas en la monitorización activa y pasiva del cultivo mediante herramientas digitales, con el objetivo de determinar de forma precisa la huella de carbono del cultivo de maíz para certificar su sostenibilidad ambiental. Contando con la participación de Vertex Bioenergy, la Universidad de Sevilla a través del grupo Smart Biosystems Laboratory, Corteva Agriscience o el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, el proyecto ha tenido una duración total de dos años ha contado con un presupuesto de 538.155,64€, con el apoyo financiero de la UE en un 80% a través del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) y del Programa Nacional de Desarrollo Rural del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA).

2. Materiales y métodos

El estudio se ha centrado en cinco distritos de riego de la Península Ibérica, en los municipios de Babilafuente (Salamanca), Beire (Navarra), Cabreros del Río (León), Coreses (Zamora), Monzón (Huesca); Moraleja (Cáceres) y Posadas (Córdoba), como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Ubicación de los ensayos Maíz Sostenible.

En cuanto a las condiciones climáticas de cada una de las zonas de ensayo, se ha llevado a cabo un seguimiento anual mediante la instalación de estaciones meteorológicas para la obtención de datos diarios. En el caso del seguimiento de la ETo se emplearon estaciones públicas.

En cada ensayo se seleccionaron dos zonas, con una superficie aproximada de 1 hectárea cada una. En una de esas zonas se llevaron a cabo técnicas de agricultura de precisión para lograr una reducción de insumos y emisiones de gases de efecto invernadero, considerando esta parte del ensayo la "Parcela Optimizada". En la otra parte se procedió como el agricultor/propietario



de la parcela venía haciendo tradicionalmente de forma convencional, considerando esta última zona del ensayo la "Parcela Testigo" (Figura 2).

Figura 2. Ejemplo de diseño de un de los ensayos, donde A es la Parcela Testigo y B es la Parcela Optimizada.

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis de la variabilidad espacial en las Parcelas Optimizadas mediante el empleo de un sensor de inducción electromagnética (Geonics EM38 mk2). Este sensor de inducción electromagnética mide la conductividad eléctrica aparente (CEa) de diferentes volúmenes de suelo en función de la configuración interna del sensor y, gracias a una antena GNSS, georreferencia cada muestra tomada. Los datos recopilados se trataron mediante un software GIS, obteniendo tres zonas de manejo diferenciadas que se mantuvieron a lo largo de toda la duración del ensayo.

Se instalaron dispositivos de monitorización avanzada en tractores y cosechadoras de la empresa John Deere (DjLink) y Agroplanning (LinkerBox) para llevar a cabo un mejor seguimiento de lo sucedido en las parcelas del ensayo y poder registrar la información vinculada a estas, como son datos de rendimiento de las tareas realizadas, la potencia empleada o el combustible consumido por el vehículo entre otros.

La siembra se realizó mediante sembradora variable, siguiendo un mapa de prescripción generado a partir de los estudios de potencial productivos previos con la aplicación Granular Link (Corteva Agriscience). Para la aplicación del abonado nitrogenado se realizó en primer lugar un abonado de fondo siguiendo las técnicas de agricultura convencional, haciendo un reparto uniforme tanto en las Parcelas Optimizadas como en las Testigo. El abonado de cobertera se realizó mediante abonadora de aplicación variable, para hacer así un reparto diferenciado según los requerimientos del cultivo y de cada zona de manejo. Durante la cosecha se utilizó monitor de rendimiento para recoger los datos de cantidad de producto cosechado por unidad de superficie y las coordenadas de la localización de cada dato.

Con los datos recabados durante todas las tareas llevas a cabo en campo junto con el seguimiento remoto a lo largo del ciclo del cultivo, se calculó el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) mediante el procesamiento de las imágenes satelitales con el software QGIS versión 3.10.11; se estimó el Coeficiente de Cultivo (Kc) y la Evapotranspiración de Cultivo (ETc) de acuerdo con la metodología propuesta por la FAO-56 [4]; se estimó el Índice de Estrés Hídrico mediante los indicadores de Suministro Relativo de Riego (RIS) y Suministro Relativo de Agua (RWS) [5]; y se calculó la Eficiencia del Uso de Agua de Riego mediante la ecuación propuesta por Djaman & Irmak [6]. Para el procedimiento de cálculo de Gases de Efecto Invernadero, se ha desarrollado una calculadora de fácil empleo en la que solo es necesario introducir los datos establecidos que se recopilan de las labores de campo de cada parcela.

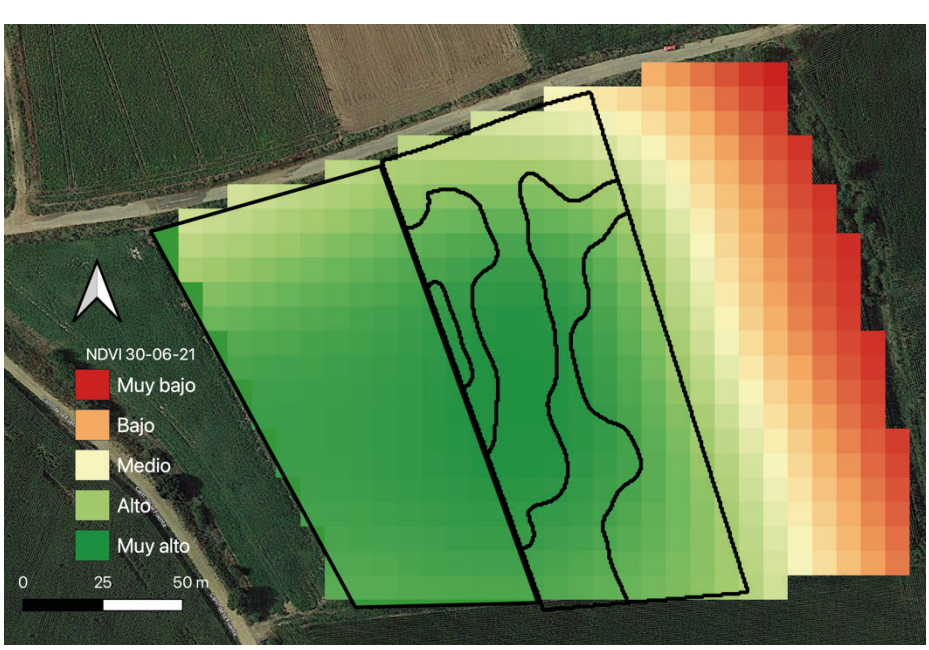


Figura 3. NDVI medido el 30 de junio del 2021. A la izquierda se observa el NDVI correspondiente a la Parcela Testigo y a la derecha el NDVI en la zonificación de la Parcela Optimizada.

Respecto al estudio estadístico, mediante ANOVA se probaron las diferencias espaciales y temporales. Se estudiaron las diferencias tanto entre parcelas como dentro de las diferentes zonas de manejo, además de entre los valores medios de Kc dentro de las etapas de crecimiento del maíz.

3. Resultados

En muchos casos, los agricultores cuentan con equipos de agricultura de precisión, pero no los emplean por desconocimiento de su manejo. Con ayuda de los técnicos que han participado en el proyecto se les ha ayudado a poner en marcha estos equipos y a superar la brecha de uso de la tecnología. De este modo, se han podido poner en marcha nuevas herramientas que han permitido a los agricultores hacer una mejor distribución de los insumos (abono y semillas).

Se ha podido desarrollar y validar un Protocolo de Técnicas de Agricultura de Precisión (PTAP) para un cultivo de maíz sostenible y resiliente al clima. En los últimos años, instituciones reconocidas como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) han emitido manuales y evaluaciones que abordan la forma de afrontar el impacto del cambio climático en la agricultura. Estas publicaciones también ofrecen pautas para reorientar los sistemas agrícolas de manera eficiente, apoyando el desarrollo y asegurando la disponibilidad de alimentos en un entorno de clima cambiante [7].

La comprensión de este impacto y la búsqueda de medidas para mitigar sus consecuencias, como el aumento de las temperaturas promedio y la variabilidad temporal y espacial en eventos climáticos extremos como lluvias y sequías, se ha convertido en una prioridad tanto para el sector agrícola como para instituciones expertas en el diseño de nuevas estrategias [8]. En este contexto, numerosos grupos de investigación a nivel global están empleando la tecnología digital para probar, acelerar y desarrollar soluciones innovadoras que fomenten la sostenibilidad y competitividad de los agricultores ante esta situación de cambio [9, 10].

El proyecto ha validado una serie de herramientas y fuentes de información consolidadas en el ámbito científico, como la aplicación variable de insumos [11], la monitorización de rendimiento [12], el seguimiento de cultivos mediante satélites y la determinación de índices vegetativos [13], así como el uso de sensores de suelo y cultivo [14]. Todos estos recursos se han compilado en forma de manual dentro del PTAP.

Un aspecto fundamental ha sido el desarrollo de una certificación de las emisiones de CO2 en el cultivo de maíz en España, siguiendo las directrices del PTAP. Este enfoque se ha destacado como un instrumento de gran relevancia para mitigar el cambio climático, poniendo especial énfasis en la cuantificación precisa de la huella de carbono.

La huella de carbono representa la evaluación del impacto ambiental de una actividad humana en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. La producción de maíz es una actividad que contribuye a dichas emisiones, y gracias a la certificación de las emisiones de CO2, se han establecido pautas estandarizadas para medir las emisiones generadas por esta actividad en cada ciclo. El propósito de esta certificación es reducir tanto la huella de carbono como otros impactos ambientales relacionados con la producción de este cultivo.

Con el fin de medir la reducción de la huella de carbono, se ha creado una calculadora de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como parte de la versión más reciente del PTAP

para el cultivo de maíz en España. Esta calculadora ha sido diseñada para ser fácil de usar, ya que solo requiere la introducción de datos específicos obtenidos de las labores agrícolas realizadas en cada parcela.

Por ello, para obtener la certificación, los productores de maíz deberán recolectar la información requerida según lo establecido en el PTAP y cargarla en la herramienta de cálculo de emisiones de CO2 (la calculadora). Posteriormente, deberán someterse a una auditoría realizada por una entidad certificadora independiente para evaluar el cumplimiento de los criterios, la exactitud de la información utilizada en el cálculo y el resultado obtenido. Tras la conclusión de la auditoría, se emitirá un Certificado con el valor de las emisiones de CO2 certificadas.

La regulación del sector de biocombustibles en Europa se rige por la Directiva de Fomento de las Energías Renovables (RED), que establece la obligación de etiquetar los biocarburantes con la huella de carbono total del proceso de producción, abarcando el cultivo, almacenamiento, transporte y proceso. La Directiva permite que las emisiones del cultivo se calculen utilizando valores por defecto globales (a nivel mundial) o mediante cálculos específicos a nivel de cada plantación.

El maíz español, certificado conforme a la Directiva RED, ha utilizado tradicionalmente un valor por defecto para las emisiones que es alto (400 kgCO2eq/t), debido a su validez global, lo que significa que es independiente del origen y la técnica del cultivo. Sin embargo, este valor por defecto no refleja de manera precisa la realidad del cultivo de maíz en España. Por otro lado, el maíz procedente de países fuera de la Comunidad Europea, como Ucrania o Brasil, suele emplear valores calculados para las emisiones del cultivo que son mucho más bajos que el valor por defecto mencionado.

En este proyecto, se ha logrado obtener un promedio de emisiones de aproximadamente 185 kgCO2eq/t para el cultivo de maíz. Si se suman las emisiones adicionales de electricidad utilizada en el riego y otras actividades, así como el gas natural empleado en los secaderos, el valor total se sitúa alrededor de 230-240 kgCO2eq/t. Pudiendo concluir que el valor obtenido es al menos un 40% menor que el valor por defecto actualmente utilizado.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado y comprobado la efectividad del Protocolo de Técnicas de Agricultura de Precisión (PTAP) con el objetivo de mejorar la competitividad del sector agrícola de forma sostenible. El PTAP propone medidas innovadoras para adaptarse y fortalecer la resiliencia ante el impacto previsto del cambio climático, al tiempo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.

Gracias a inversiones en nuevos equipos, el sector agrícola está adoptando aplicaciones de precisión. Un número creciente de agricultores están incorporando en su flujo de trabajo la dosificación variable para optimizar el uso de insumos como semillas y fertilizantes.

El resultado de este proyecto ha sido la producción de maíz con una etiqueta de menor emisión de dióxido de carbono, lograda a través de prácticas con agricultura de precisión que contribuyen a un medio ambiente más sostenible. Esto es de gran importancia en el contexto actual de cambio climático.

Uno de los logros significativos de este proyecto ha sido la validación y demostración en el campo de que la tecnología no solo incrementa la productividad agrícola, sino que también contribuye a una mayor sostenibilidad de los cultivos. El sector agrícola tradicionalmente conservador se beneficia de proyectos como este, que transforman ideas en realidades tangibles y responden a las demandas de agricultores y cooperativas.

Referencias

1. United Nations (UN). Climate Change 2023: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2023
2. International Fund for Agricultural Development (IFDA). Agriculture is not just a contributor to climate change. It is an essential part of the solution - IFAD's reaction to the latest IPCC report. Stories. 2022.
3. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Agricultura de precisión: tecnología para enfrentar el cambio climático. Recuperado de https://blogs.iadb.org/innovacion/es/agricultura-de-precision-tecnologia-para-enfrentar-el-cambio-climatico/ (14 de febrero de 2023).
4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop requirements. FAO Irrig. Drain. Report modeling and application. Journal of Hydrology. 1998, 285, 19-40
5. Moreno-Pérez, M.F., Roldán-Cañas, J. Assessment of irrigation water management in the Genil-Cabra (Córdoba, Spain) irrigation district using irrigation indicators. Agricultural Water Management. 2013, 120, 98-106.
6. Djaman, K., Irmak, S. Soil water extraction patterns and crop, irrigation, and evapotranspiration water use efficiency of maize under full and limited irrigation and rainfed settings. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2012, 55(4), 1223-1238.
7. Food and Agriculture Organization (FAO). 2016. The state of food and agriculture. Climate change, agriculture, and food security. FAO, Rome.
8. Denton, F., Wilbanks, T.J., Abeysinghe, A.C., Burton, I., Gao, Q., Lemos, M.C., Masui, T., O'Brien, K.L., and Warner, K. 2014. Climate-resilientpathways: Adaptation, mitigation, and sustainable development. In: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E.Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White, editors, Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II tothe Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. p. 1101-1131.
9. Baso, B., Dumont, B., Maestrini, B. Soil Organic Carbon and Nitrogen Feedbacks on Crop Yields under Climate Change. Agricultural & Environmental Letters. 2018, 3(1).
10. Moghimi, A.; Pourreza, A.; Zuniga-Ramirez, G.; Williams, L.E.; Fidelibus, M.W. A Novel Machine Learning Approach to Estimate Grapevine Leaf Nitrogen Concentration Using Aerial Multispectral Imagery. Remote Sens. 2020, 12, 3515.
11. Simbahan, G.C., Dobermann, A., Ping, J.L. Screening yield monitor data improves grain yield maps. Agronomy Journal. 2004, 96(4), 1091-1102.
12. Peña-Barragán, J.M., López-Granados, F., García-Torres, L., Jurado-Expósito, M., Sánchez de la Orden, M, García-Ferrer, A. Discriminating cropping systems and agro-environmental measures by remote sensing. Agronomy for Sustainable Development. 2008, 28, 355-362.

13. Pedrera-Parrilla, A., Pachepsky, Y.A., Taguas, E.V., Martos-Rosillo, S., Giráldez, J.V., Vanderlinden, K., 2017. Concurrent temporal stability of the apparent electrical con-ductivity and soil water content. Journal of Hydrology. 2017, 544, 319-326
14. Apolo-Apolo, E., Martínez-Guanter, J., Pérez-Ruiz, M., Egea, G. Design and assessment of new artificial reference surfaces for real time monitoring of crop water stress index in maize. Agricultural Water Management. 2020, 240, 106304

Efecto de la adición de partículas en el proceso de digestión anaerobia de paja de trigo para la mejora de la producción de metano

A. García Álvaro[1,2], H. Pizarro Guazha[3], C. Ruiz Palomar[1,2], A. Gascó Guerrero[3], R. Muñoz[1,2], D. Hermosilla Redondo[1,3], I. de Godos Crespo[1,2]

[1] Escuela de Ingeniería Forestal, Agronómica y de la bioenergía (EIFAB), Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, 42004, Soria, España.

[2] Instituto de Procesos Sostenibles, Universidad de Valladolid, 47011, Valladolid, España.

[3] Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Medioambiental, Universidad Politécnica de Madrid, José Antonio Novais 10, 28040 Madrid, España.

Abstract:

Cereal straw is a highly abundant waste globally which has low degradability due to its high lignocellulosic content when used as a substrate in anaerobic digestion. Consequently, costly and unsustainable pretreatments are often necessary. This study proposes the utilization of waste wheat straw from cereal fields in Soria (Spain) with different microparticles to improve the anaerobic digestion process, which is a widely employed approach to enhance efficiency by boosting degradation rates and biogas production trough the use of batch reactors. Fe_2O_3 and Fe_2O_4 biochar particles have demonstrated the most promising outcomes, leading to a methane production improvement of over 8% within 15 days. The study also explored Gompertz model to verify the increased methane production rate corroborating the experimental study.

Palabras clave: Biogás, bioenergía, digestión anaerobia, partículas, paja de trigo

1. Introducción

El aumento del consumo mundial de energía es un fenómeno que ha ido creciendo progresivamente en las últimas décadas (ver figura 1). Este aumento se ha visto impulsado por una serie de factores, entre los que destacan el aumento de la población mundial, el crecimiento económico de los países en desarrollo y la creciente demanda de energía para satisfacer las necesidades de la sociedad moderna. El uso de biocombustibles y la generación de energías renovables se hace necesario en el marco de la transición ecológica hacia una sociedad con menor huella de carbono, tal y como marca el ODS 7 [1].

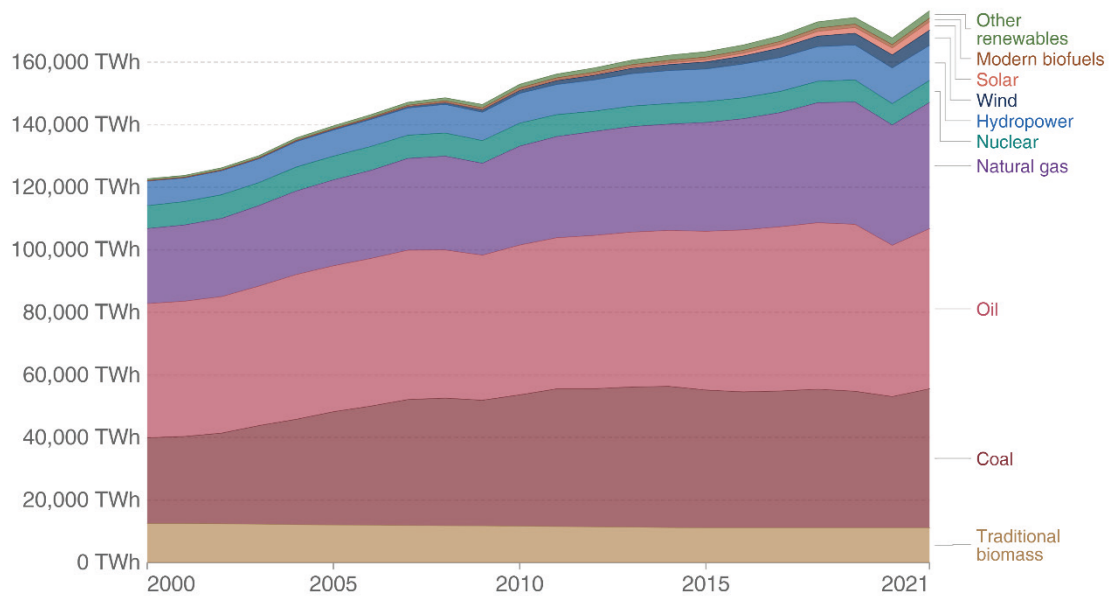


Figura 1. Consumo energético global [2], [3]

El proceso de digestión anaerobia se presenta como una alternativa para la gestión de subproductos agrícolas entre otros, generando en el proceso un biogás de alto poder calorífico [4]. Este proceso biológico, estudiado desde hace años, debe ser optimizado para aumentar el rendimiento en la producción de biogás.

El uso de partículas en la digestión anaerobia es una estrategia ampliamente utilizada para mejorar esta eficiencia al aumentar la superficie de contacto entre los sustratos y los microorganismos, lo que a su vez incrementa la tasa de degradación y la producción de biogás [5]. La elección del tamaño y tipo de partícula adecuados es crucial para maximizar los beneficios

de esta estrategia y lograr una producción de biogás eficiente y rentable. En este trabajo se ha estudiado el efecto de diferentes partículas sobre un sustrato de paja de cereal.

2. Materiales y métodos

Se realizaron ensayos por lotes de BMP para estudiar la degradabilidad y la producción de biogás utilizando paja de trigo molida y tamizada a 1 mm como sustrato. Se utilizaron diferentes micropartículas en el medio de acuerdo con la Tabla 1. Los ensayos se realizaron en un medio inoculado con lodos de EDAR. Tanto el sustrato como el inóculo fueron recogidos en la provincia de Soria (España).

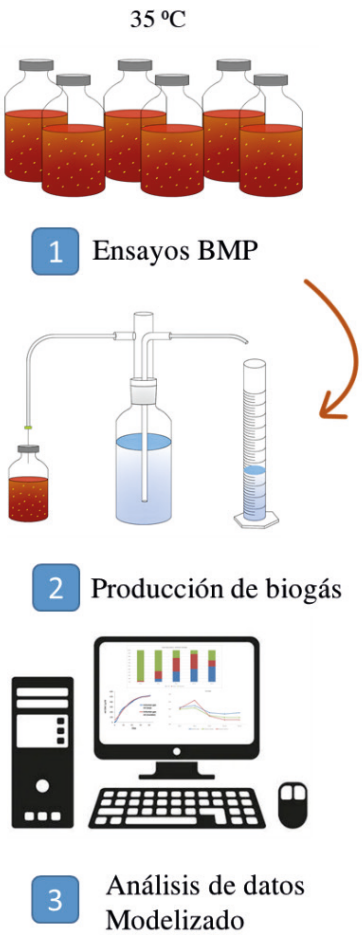


Figura 2. Esquema de trabajo propuesto

Los ensayos se realizaron por triplicado durante 40 días a una temperatura de 35±1 °C bajo agitación orbital y se monitorizaron los siguientes parámetros analíticos: sólidos volátiles,

demanda química de oxígeno, contenido en ácidos grasos volátiles y generación y composición del biogás producido (ver figura 2).

Tratamiento	Inóculo (ml)	Paja de trigo (g)	Partículas (mg)
Control	50 ± 0,5	1,27 ± 0,1	60 ± 1
Arena desionizada	50 ± 0,5	1,27 ± 0,1	60 ± 1
Esferas de Fe	50 ± 0,5	1,27 ± 0,1	60 ± 1
Fe_2O_3	50 ± 0,5	1,27 ± 0,1	60 ± 1
Fe_3O_4	50 ± 0,5	1,27 ± 0,1	60 ± 1
Fe_2O_4 biochar	50 ± 0,5	1,27 ± 0,1	60 ± 1
Grafito	50 ± 0,5	1,27 ± 0,1	60 ± 1

Tabla 1. Cantidad de sustrato, inóculo y partículas por tratamiento

Finalmente, con los datos experimentales, se modelizaron los resultados de acuerdo con el modelo Gompertz [6] (Ecuación 1):

$$M\,(t) = M \cdot exp^{\left\{-e^{\left[\frac{R\cdot e}{P}\cdot(\lambda-t)+1\right]}\right\}} \qquad (1)$$

Donde M (t) es la producción acumulada de metano a temperatura y presión estándar (mL CH_4/g VS), M es la producción potencial de metano (mL CH4/g VS), R es la tasa máxima de producción de metano (mL CH_4/g VS-día), K es la tasa de crecimiento específica de los microorganismos (d-1) λ la fase de latencia (días) y t el tiempo transcurrido (días).

3. Resultados y discusión

La figura 3 muestra la producción acumulada de metano en los distintos ensayos realizados. Se observa una mejora en la producción de metano aunque las mejoras más significativas se encontraron en la fase intermedia del experimento, entre los días 7 y 22, donde la producción de metano aumentó en comparación con el experimentos de control. Por tanto, el principal beneficio de las micropartículas es favorecer una degradación más rápida del sustrato, lo que podría suponer menores costes de capital al reducir el tamaño de los digestores anaerobios. Esto puede atribuirse al hecho de que las partículas pueden servir como cofactores para las enzimas implicadas en el proceso de formación de metano (Dehhaghi et al., 2019).

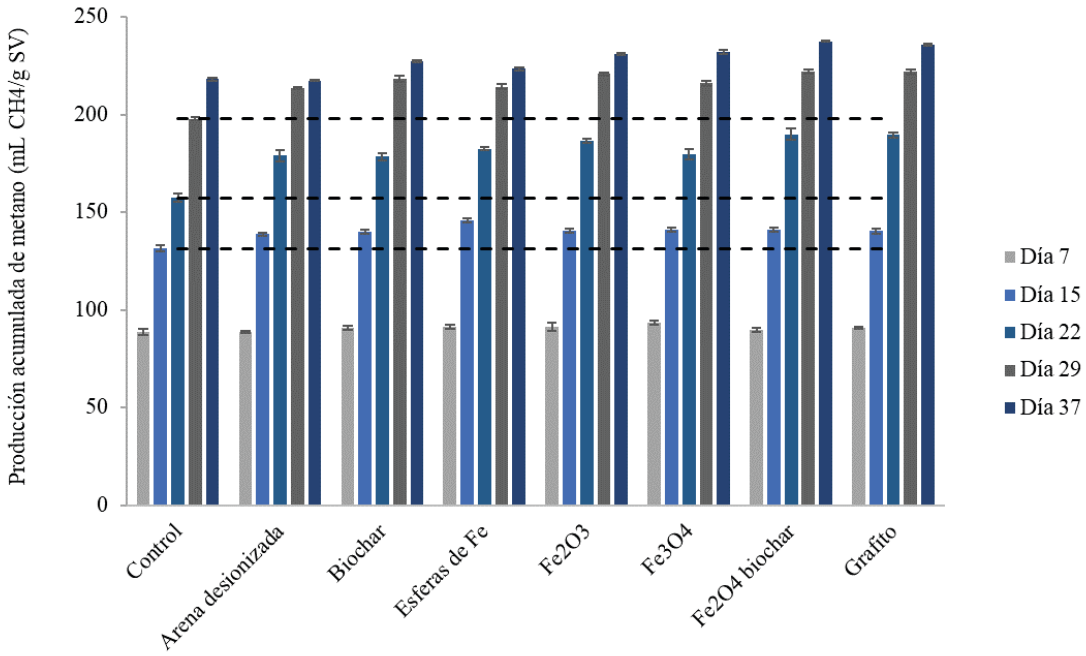


Figura 3. Producción acumulada de metano con diferente adición de partículas a partir de la digestión anaerobia de paja de trigo

Los mejores resultados se obtuvieron para Fe_2O_3 y Fe_2O_4-biochar, donde la producción se mejoró en torno a un 10% respecto al ensayo de control sin partículas entre los días 15 y 22. Estos resultados también se obtuvieron en estudios similares con sustratos como lodo de depuradora o residuos ganaderos [7].

De acuerdo con los resultados obtenidos tras la modelización Gompertz (tabla 2), la tasa de producción de biometano para el ensayo control (R) fue de 8,62 mL CH_4/g VS-día, mientras que la tasa se ha incrementado hasta el 10,4% (9,51 mL CH_4/g VS-día) para las partículas de esferas de Fe y el 7,2% (9,24 mL CH_4/g VS-día) para Fe_2O_3. Este mayor efecto en las esferas de Fe se debe a que los primeros días se produce un efecto de abrasión que acelera la hidrólisis del proceso. Sin embargo, a mitad de ensayo la producción decrece como se puede ver en la figura 3.

Modelo Gompertz

	Volumen máximo (gas)	R (d-1)	λ (fase de latencia)	Coef regresión
Control	211,13	8,62	0,00	96,1%
Arena desionizada	197,98	9,16	0,00	96,0%
Biochar	216,00	8,68	0,00	96,4%
Fe2O3	212,15	9,04	0,00	96,4%

Fe3O4	215,06	9,24	0,00	96,0%
Grafito	215,78	9,01	0,00	96,6%
Fe2O4 Biochar	217,49	8,90	0,00	96,8%
Esferas de Fe	198,36	9,51	0,00	96,4%

Tabla 1. Resultados de la modelización Gompertz

4. Conclusiones

La producción de metano ha aumentado utilizando partículas en el proceso de digestión anaerobia, siendo las partículas de Fe_2O_3 y Fe_2O_4-biochar las que han conseguido las mayores tasas de producción de metano. Estos resultados obtenidos a escala de laboratorio deben ser validados en una operación continua para corroborar su efecto a escala industrial.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por la Junta de Castilla y León y por la Beca PID2020-114918RB-I00 financiada por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033

Referencias

[1] United Nations, “Sustainable Development Goals : SDG 7 - Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all,” 2015.

[2] Vaclav Smil, “Energy Transitions: Global and National Perspectives.,” 2017.

[3] British Petroleum Report, “Statistical Review of World Energy,” 2021.

[4] P. G. Kougias and I. Angelidaki, “Biogas and its opportunities—A review,” *Front Environ Sci Eng*, vol. 12, no. 3, p. 14, 2018, doi: 10.1007/s11783-018-1037-8.

[5] C. M. Ajay, S. Mohan, P. Dinesha, and M. A. Rosen, “Review of impact of nanoparticle additives on anaerobic digestion and methane generation,” *Fuel*, vol. 277, p. 118234, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118234.

[6] B. Shamurad, N. Gray, E. Petropoulos, S. Tabraiz, E. Membere, and P. Sallis, “Predicting the effects of integrating mineral wastes in anaerobic digestion of OFMSW using first-order and Gompertz models from biomethane potential assays,” *Renew Energy*, vol. 152, pp. 308–319, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.067.

[7] R. S, T. N. Vasa, and P. C. Sabumon, “A mini review on effect of nano particles of Fe in the anaerobic digestion of waste activated sludge,” *Mater Today Proc*, vol. 51, pp. 1482–1488, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.265.

Evaluación del Ciclo de Vida de la planta solar fotovoltaica de la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir (Sevilla).

J.A. Flores Cayuela[1], I. Fernández García[2], J.A. Rodríguez Díaz[3],

[1] Investigador contratado, Departamento de Agronomía, Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Córdoba; g12flcaj@uco.es
[2] Profesora ayudante doctora, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Automática. Universidad de Córdoba; g52fegai@uco.es
[3] Catedrático, Departamento de Agronomía, Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Córdoba; ma2rodij@uco.es

Abstract: Due to the rising price of energy in recent years, the costs of irrigated agriculture have increased significantly. This, coupled with concerns about climate change, has led to the search for cleaner and cheaper energy sources. In this search, photovoltaic solar energy appears to be the best option. For some years now, photovoltaic solar energy has been implemented in small pumping installations, with low peak installed power systems. However, there are already irrigation communities, with high pumping power, that use this kind of energy thanks to large solar plants of up to several MWp of power. These large solar plants do not have a significant environmental impact during their operation phase, but they do have a significant environmental impact during the manufacture of their components and construction. In this work, the life cycle assessment (LCA) of a solar photovoltaic plant of 6 MWp of an irrigation community, located in the south of Spain, has been carried out. With the data provided for the three years it has been in operation, energy payback time (EPBT) results have been obtained between 3.58 and 3.89 years, and carbon payback time (CPBT) between 7.62 and 10.55 years. The influence on the reduction of environmental impact has also been analyzed, with results showing that, even by consuming part of the energy from the grid, the impacts associated with the emission of greenhouse gases (GHG) and the consumption of energy from fossil fuels have been reduced by almost 50%.

Palabras clave: Energía renovable, Evaluación del Ciclo de Vida (ECV), energía solar fotovoltaica, comunidades de regantes, GEI regadío.

1. Introducción

En los últimos años, e incluso décadas, la preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han impulsado la búsqueda de fuentes de energía sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. En este contexto, la energía solar fotovoltaica ha surgido como una de las soluciones más prometedoras, especialmente en el ámbito agrícola, siendo, hoy en día, una alternativa viable, tanto técnica como económicamente, a las fuentes de energía convencionales (red eléctrica y diésel).

Y es que el riego de cultivos es una actividad esencial para garantizar la producción de alimentos y el desarrollo de la agricultura a nivel mundial. Sin embargo, históricamente, el riego ha estado vinculado al uso intensivo de combustibles fósiles y la dependencia de sistemas

eléctricos convencionales, lo cual ha generado un impacto ambiental significativo. Según distintos estudios se estima que la agricultura es responsable de aproximadamente el 12% de las emisiones de GEI a nivel global, cifra que aumenta hasta el 18,4% si se tienen en cuenta los usos del suelo y la silvicultura [1]. Si se tiene en cuenta el sistema alimentario en su conjunto, incluyendo refrigeración, procesado de alimentos, envasado y transporte; éste representa en torno hasta el 26% del total de GEI a nivel global.

En este escenario, la adopción de la energía solar fotovoltaica para el regadío agrícola se presenta como una alternativa sostenible que ofrece beneficios tanto para el medio ambiente como para los agricultores. Diversos estudios científicos respaldan la idea de que la implementación de sistemas fotovoltaicos (SPV) en el regadío agrícola puede reducir de manera significativa las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y otros GEI. Estudios realizados en los años 90 [2] y primeros de los 2000 [3] ya mostraban los beneficios ambientales de la energía solar fotovoltaica con respecto a las fuentes de energía convencionales, fósiles y no renovables. Posteriormente, otros trabajos han evaluado el beneficio de esta tecnología en la agricultura de regadío, con resultados que revelan que el uso de SPV puede reducir las emisiones de CO_2 y GEI entre un 54 y un 77% [4,5,6] en comparación con los sistemas tradicionales basados en combustibles fósiles y/o energía de la red. Esto se debe a que la energía solar es una fuente renovable y libre de emisiones durante su fase de generación, lo que contribuye directamente a la mitigación del cambio climático.

Además de la reducción de emisiones, la utilización de energía solar fotovoltaica en el regadío agrícola también presenta ventajas en términos de conservación de recursos hídricos. En el análisis de un SPV montado sobre un canal de riego, Kumar et al. [7] estimaron que, para una superficie de agua de 52.163 m² (3,6 km de canal), la reducción de la evaporación era de 95,54 millones de litros de agua por año. Esto es especialmente relevante en un contexto donde la escasez de agua es un desafío cada vez más apremiante, y puede ser una alternativa realmente interesante para Comunidades de Regantes (CC.RR.) como la del Valle Inferior del Guadalquivir, que cuentan con decenas de kilómetros de canales abiertos.

En resumen, la energía solar fotovoltaica aplicada al regadío agrícola se presenta como una solución viable y sostenible que reduce las emisiones de GEI y, además, conserva los recursos hídricos. Sin embargo, a pesar de existir trabajos que evalúan el ciclo de vida de un SPV ligado al regadío, ninguno lo hace de un sistema del tamaño del de la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir, que cuenta con una potencia pico instalada de 6 MWp.

2. Metodología

2.1. Objetivo y alcance

En este estudio se ha evaluado el impacto ambiental de una gran planta solar fotovoltaica de una comunidad de regantes (C.R.) en España mediante la metodología de la Evaluación del Ciclo de Vida (ECV). La ECV incluye la definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario (ICV), la evaluación del impacto (EICV) y la interpretación de los resultados.

La ECV ha tenido tres objetivos fundamentales:

- Determinar el impacto que ha supuesto la creación de la planta solar.
- Estimar la reducción del impacto ambiental de la C.R. por dejar de consumir energía de la red.
- Comparar el impacto ambiental con vertido de energía excedente a la red y sin vertido de energía excedente.

La ECV considera los materiales, los procesos de fabricación, transporte y operación de la planta solar, pero no se consideran impactos asociados al mantenimiento de la planta, debido a su poca importancia en el total.

Se ha considerado una vida útil del sistema de 30 años, ya que esta es la vida útil media de los principales elementos que componen un SPV: paneles solares, estructura y cables [8]. En el caso de los inversores, su vida útil es de 15 años para plantas pequeñas (uso residencial), y de 30 años con un 10% de sustitución de piezas cada 10 años para plantas grandes [9]. Se han empleado como unidades funcionales el kWh de energía producida o consumida, y el m^3 de agua consumido por la C.R. Para el análisis del impacto se ha utilizado el método EF 3.0 (Environmental Footprint), ya que contiene una gran variedad de categorías para evaluar el impacto ambiental de un material o proceso. En este caso, de entre todas las categorías existentes, se han seleccionado seis por ser las más representativas e importantes (Tabla 11).

Tabla 11. Categorías de impacto evaluadas en la ECV.

	Categoría de impacto	Descripción
AE	Acidification (Accumulated exceedance) (mol H+ eq)	Impacto de las sustancias acidificantes en el suelo, las aguas subterráneas y superficiales, los organismos, los ecosistemas y los materiales.
GWP	Climate Change (Global Warming Potential) (kg CO_2 eq)	Relacionados con las emisiones de GEI que contribuyen al cambio climático.
ADPF	Energy resources: non-renewable (abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels) (MJ)	Agotamiento de la energía como depósitos de combustibles fósiles utilizados para generar electricidad.
ADPE	Material resources: metals/minerals (abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)) (kg Sb eq)	Protección del bienestar humano y de la salud de las personas y los ecosistemas. Relacionados con la extracción de minerales y combustibles fósiles, en función de las reservas mundiales.
HTNC	Human toxicity: non-carcinogenic, metals (CTUh)	Efectos de las sustancias tóxicas en el entorno humano. No se incluyen los riesgos para la salud derivados de la exposición en el entorno laboral.
WS	Water use (user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)) (m^3 world eq. Deprived)	Indicador de la cantidad relativa de agua utilizada, basado en factores regionalizados de escasez de agua.

2.2. Caso de estudio: La Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir

La planta solar analizada pertenece a la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir, situada en la provincia de Sevilla, en Andalucía, al sur de España; formada por 18.945 ha de cultivos herbáceos y leñosos. Esta planta solar, instalada en 2019, está formada por 17.880 paneles fotovoltaicos que suman una potencia pico total de 6 MWp. Esta planta solar genera energía para alimentar las cargas de la comunidad, principalmente bombas hidráulicas para la impulsión del agua, que suman una potencia de 12.760 kW.

La instalación solar fotovoltaica está conectada a la red eléctrica convencional, por lo que puede verter la energía excedente y, al mismo tiempo, la C.R. puede tomar energía de la red cuando la planta no genera energía o no genera la suficiente para satisfacer la demanda.

Hay que destacar que desde que existe la planta solar, las campañas de riego se han visto muy condicionadas por una situación de sequía, que ha hecho que las dotaciones para agua de riego se hayan reducido considerablemente. Esto hace que los consumos de energía sean inferiores a los de años normales, sin restricciones en las dotaciones.

2.3. Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

Los datos utilizados en el ICV se han obtenido del proyecto de ejecución de la planta solar y de otros documentos proporcionados por la C.R. del Valle Inferior. El ICV incluye gran número de entradas y salidas, como son todos los elementos que componen la planta solar (paneles, cables, seguidores, plásticos, inversores, etc.), la obra civil que ha sido necesaria para su

construcción, el transporte de los distintos elementos, o el vallado. No se ha tenido en cuenta el impacto producido por el mantenimiento (control de malas hierbas, limpieza de paneles, reparaciones, etc.).

Para el cálculo del impacto del transporte se ha supuesto transporte por carretera desde los lugares de fabricación de los distintos elementos, con camiones EURO5 de entre 16 y 32 t. Todos los datos de impacto se han tomado de la base de datos Ecoinvent v3.9.1 (2022).

Los datos de energía generada, consumida y vertida proporcionados corresponden a los años 2020, 2021 y 2022. Estos datos se han empleado para cuantificar el beneficio provocado por la creación y uso de la planta solar. Como ya se ha indicado anteriormente, los tres años de estudio han sido años de sequía con importantes restricciones en las dotaciones de riego, por lo que el consumo de la C.R. también es menor en estos años que en años normales.

2.4. Evaluación de impacto

Para la evaluación de impacto, cómo se indicó en la Tabla 1, se han empleado seis categorías diferentes, de las que destacan especialmente dos, GWP y APDF. La primera, el cambio climático, cuantifica la contribución de los gases de efecto invernadero emitidos por un sistema de producción, y se presenta en unidades de kg de dióxido de carbono equivalente (CO_2 eq). La segunda categoría analiza las necesidades de energía primaria (MJ) de un determinado sistema. En todas las categorías se tiene en cuenta la vida útil completa de la instalación (de la cuna a la tumba). La carga medioambiental asociada a cada categoría de impacto estudiada se ha calculado como la suma de todos procesos y materiales implicados en cada opción, y se expresa con la siguiente ecuación:

$$EB_{s,i} = \sum_{x=1}^{X} K_{x,i} \cdot U_x \quad (1)$$

donde EB es la carga medioambiental (environmental burden) de la categoría de impacto *i*, *K* es la carga medioambiental asociada a cada proceso o material; *X* es el número total de los distintos procesos y materiales; y *U* es el total de unidades para el proceso o material implicado en cada opción.

Además de las categorías de impacto, se han evaluado los tiempos de amortización de la energía y el carbono (EPBT y CPBT) y el rendimiento energético de la inversión (EROI). El EPBT se expresa en años y representa la relación entre la energía primaria gastada por el SPV durante toda su vida útil y la energía primaria anual ahorrada. En otras palabras, el EPBT expresa el tiempo necesario para que el SPV ahorre la misma cantidad de energía primaria consumida durante su vida útil. La fórmula sería:

$$EPBT\ (years) = \frac{MJ\ of\ primary\ energy\ spent\ from\ cradle\ to\ grave}{MJ\ of\ annual\ primary\ energy\ saved} \quad (2)$$

El CPBT expresa la relación entre la cantidad (kg) de CO_2 emitida durante toda la vida útil del SPV y la cantidad anual (kg) de CO_2 evitada. Al igual que el CPBT, se expresa en años y representa el tiempo necesario para que el SPV evite la misma cantidad de CO_2 equivalente emitida durante su ciclo de vida. La fórmula de este indicador sería:

$$CPBT\ (years) = \frac{kg\ CO_2\ eq\ emitted\ from\ cradle\ to\ grave}{kg\ CO_2\ eq\ avoided\ per\ year} \quad (3)$$

Estos indicadores, EPBT y CPBT, se consideran las medidas más adecuadas para evaluar el beneficio energético y medioambiental obtenido del uso de sistemas renovables [10,11,12,13].

El EROI es una ratio adimensional que representa la viabilidad a largo plazo de un sistema de generación de energía considerando la energía obtenida de un sistema renovable (MJ) y la cantidad de energía invertida en dicho sistema a lo largo de toda su vida útil [14]. La fórmula para calcular esta ratio es:

$$EROI = \frac{MJ\ of\ energy\ produced\ from\ PV\ systmens\ (lifetime)}{MJ\ of\ primary\ energy\ spent\ to\ create\ PV\ systems\ (cradle\ to\ grave)} \quad (4)$$

Esta ratio también se puede calcular como la vida útil de la instalación, expresada en años, dividida entre el EPBT de dicha instalación fotovoltaica.

En la evaluación del impacto energético y medioambiental del SPV objeto de este análisis, se ha tenido en cuenta el mix de generación de electricidad de la red eléctrica española. Este mix de generación es variable y se ha visto notablemente influenciado por la tendencia creciente en el uso de las energías renovables frente a las convencionales. En los tres años de estudio del SPV del Valle Inferior, el factor de energía primaria osciló entre 6,56 y 6,90 MJ por kWh de electricidad producida. En cuanto al factor de emisión de CO_2 eq, se han estimado valores entre 0,2438 y 0,2668 kg de CO_2 eq por kWh (Fuente: REE).

2.5. Escenarios y análisis de sensibilidad

En los últimos años, la estructura de la generación en España se ha modificado notablemente en una clara apuesta por las energías renovables. En 2007, las energías renovables suponían el 20,1% del total de la energía generada en España; en 2022, esa cifra se ha incrementado hasta el 42,2% (Fuente: REE). Este cambio en la estructura de la generación provoca cambios significativos en el CPBT, por lo que se han estudiado varios escenarios de futuro en los que el porcentaje de la energía renovable sigue incrementándose con respecto al de no renovables.

También se han analizado escenarios de consumo basados en los datos disponibles de los tres años de funcionamiento del SPV y subescenarios que cuantifican y comparan los distintos impactos en los supuestos de tomar toda la energía de la red, poder vender o no excedentes y en el caso de que toda la energía consumida fuese del SPV.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de contribución

3.1.1. Contribución de componentes

En la Figura 23 se muestra el porcentaje en que cada componente del SPV contribuye al total de los distintos impactos calculados para una vida útil de 30 años. En esta figura se observa que los paneles solares son los elementos que más contribuyen en todos los impactos calculados, con porcentajes que varían entre el 72 y el 95%. Estos valores coinciden con los expuestos por otros autores [4,11] en sistemas fotovoltaicos para regadío, aunque de menor tamaño que el analizado aquí.

Los siguientes componentes que más contribuyen a los distintos impactos son las estructuras metálicas de los seguidores solares y los inversores. El resto de los componentes tienen una contribución mínima en los impactos calculados.

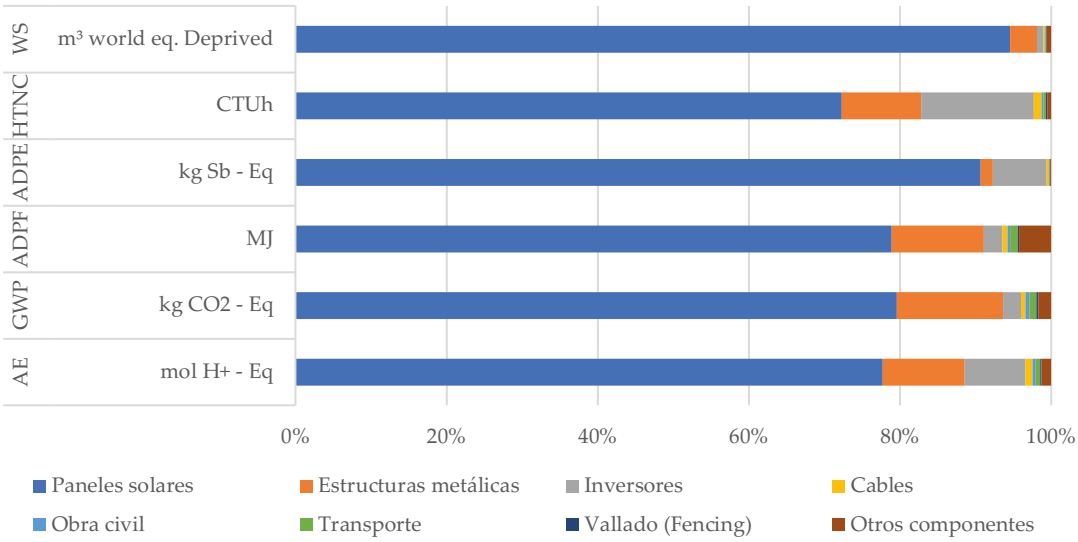


Figura 23. Impacto del SPV del Valle Inferior por componentes.

Al calcular el impacto del SPV del Valle Inferior por kW de potencia pico se obtienen valores de 55,03 kg CO_2 eq/kWp y 740,77 MJ/kWp. Estos valores son inferiores a los de los trabajos de Todde et al. [5,11], aunque estos analizaban sistemas mucho más pequeños, con potencias pico instaladas de entre 40 y 360 kWp. También la producción anual de energía de estos sistemas por kWp instalado es inferior a la del Valle Inferior, con entre 1.770 y 1.925 kWh/kWp, frente a los 1.582 o 1.213 kWh/kWp de Todde et al. [5].

3.1.2. Contribución de materiales

Si se desglosa el impacto por tipos de materiales que forman el SPV, nuevamente, los paneles solares fotovoltaicos son los que más contribuyen en casi todos los impactos calculados y, concretamente, el material de los paneles con más peso son las células fotovoltaicas de silicio. En todos los impactos, las células suponen al menos el 60% del total; tan solo en la categoría Abiotic Depletion Potencial: Elements (ADPE) suponen algo menos del 40%, siendo los metales los que más contribuyen a este tipo de impacto, con el 52,58% del total (Figura 24).

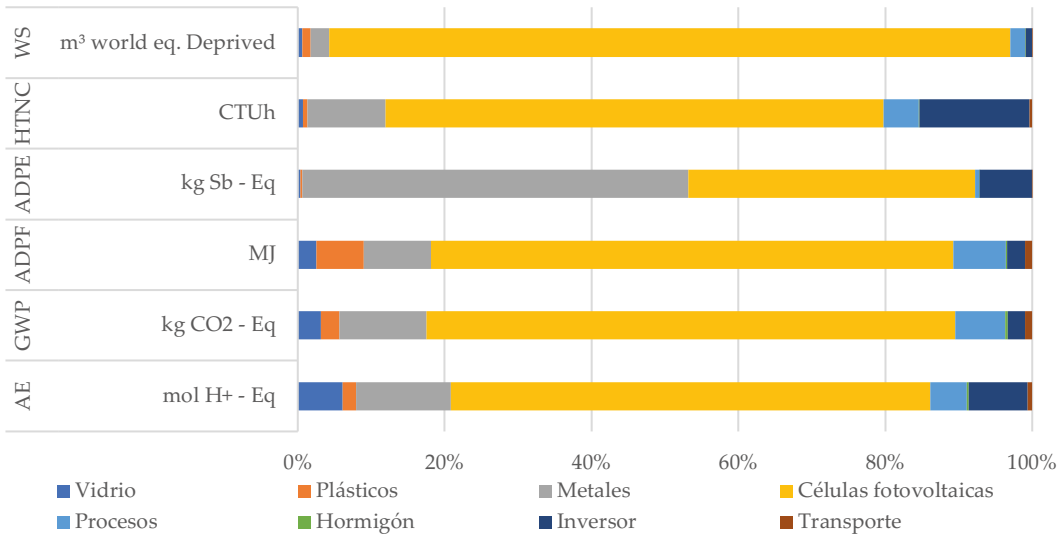


Figura 24. Impacto del SPV del Valle Inferior por materiales.

3.2. EPBT, CPBT y EROI

El resultado de los indicadores EPBT y CPBT depende de muchos factores, como son la capacidad de generación de energía, la eficiencia de los módulos, la radiación o, incluso, factores externos, como la estructura de la generación de la energía de la red. En la Tabla 12 se puede ver como en función de la cantidad de energía generada (E_{PV}) por el SPV varía el EPBT, de manera que a más energía generada menor es el tiempo de amortización de la energía consumida en la vida útil del sistema.

Tabla 12. Resultados de EPBT, CPBT y EROI obtenidos para los 3 años de funcionamiento del SPV de la C.R. Valle Inferior del Guadalquivir.

	2020	**2021**	**2022**	**Media**
E_{PV} (kWh)	10.607.173	11.533.445	10.866.781	11.002.466
GWP_{Grid} (kg CO_2 eq)	1.298.428,94	1.189.013,75	936.800,59	1.141.414,43
EPBT	3,89	3,58	3,80	3,75
CPBT	7,62	8,32	10,55	8,66
EROI	7,71	8,38	7,90	8,00

En cuanto al CPBT, este es totalmente dependiente de la estructura de la generación de la energía de la red, de manera que cuanto mayor sea el peso de las energías renovables en la generación, menor será el valor de GWP de la energía de la red (GWP_{Grid}) y, por tanto, mayor será el tiempo de amortización del carbono emitido durante la vida útil del SPV. Para el cálculo del CPBT solo se ha tenido en cuenta el impacto de la energía que se ha dejado de consumir de la red y no el de toda la energía generada por el SPV. Estos resultados se traducen en que, aproximadamente, el 87,5% de la energía generada por el sistema fotovoltaico durante su vida útil (30 años) no producirá contaminación atmosférica ni agotará los recursos, y ponen de manifiesto los beneficios obtenidos gracias a las grandes instalaciones fotovoltaicas como la del Valle Inferior.

Los resultados obtenidos en este estudio están en consonancia con los de Todde et al. [5], donde analizaba el EPBT y CPBT de tres plantas solares fotovoltaicas para regadío situadas en el sur de Europa (dos en España y una en Italia). En dicho trabajo se muestran EPBT entre 1,94 y

5,25 años, con variación en función del tamaño del SPV (menor cuanto mayor es la potencia instalada), y CPBT entre 4,62 y 9,38 años, rangos entre los que se encuentra el sistema analizado en este trabajo. Cabe destacar que las 3 plantas analizadas en el citado trabajo tenían potencias instaladas muy inferiores a las del SPV del Valle Inferior (360 kWp, 160 kWp y 40 kWp) y que ninguna estaba conectada a la red. En otros trabajos donde se analizan plantas de mayor tamaño (37,5 MWp) [10], los valores de EPBT y EROI siguen siendo similares a los obtenidos para el SPV del Valle Inferior, por lo que se puede afirmar que estos factores no dependen tanto del tamaño de la instalación como del rendimiento de los módulos para el EPBT, o de la estructura de la generación del país para el CPBT.

En cuanto al valor de EROI, según Hall et al. [15], este debería mantener al menos una proporción de 3:1 para considerarse una fuente de energía viable para la sociedad, es decir, debería tener un valor de en torno a 7,5. En la Tabla 12 se puede ver que los valores obtenidos están en consonancia con dicha proporción y que una mayor cantidad de energía generada supone un valor más elevado de esta ratio y, por tanto, más viable es el SPV.

3.3. Análisis de sensibilidad

El primer análisis de sensibilidad ha consistido en conocer cual sería el valor del CPBT en futuros escenarios en los que el mix de generación siga evolucionando con la tendencia actual de aumento de las energías renovables frente a las no renovables. En la Tabla 13 se muestran los resultados de este análisis, y en ella se puede ver que a medida que aumenta el porcentaje de energías renovables, disminuye el impacto GWP de la red y, por tanto, también se incrementa el tiempo que sería necesario para ahorrar el carbono emitido en la fase de creación del SPV de la C.R. del Valle Inferior.

Tabla 13. Resultados del análisis de sensibilidad de CPBT con distintos mix de generación de energía de la red.

Año	2010	2015	2020	Futuro 1	Futuro 2	Futuro 3
E. Hidráulica	15,51%	11,53%	13,17%	12,00%	13,00%	13,00%
E. Nuclear	21,97%	22,20%	23,96%	21,00%	19,00%	18,00%
E. Carbón	8,79%	21,37%	2,16%	1,50%	1,00%	0,50%
E. Ciclo combinado	24,77%	11,79%	18,92%	20,50%	20,00%	19,00%
E. Eólica	16,15%	19,54%	23,60%	25,00%	26,00%	27,00%
E. Solar fotovoltaica	2,38%	3,35%	6,58%	13,00%	15,00%	18,00%
E. Cogeneración	10,42%	10,23%	11,62%	7,00%	6,00%	4,50%
E. Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
Energía Renovable (%)	34,04%	34,41%	43,34%	50,00%	54,00%	58,00%
Energía No Renovable (%)	65,96%	65,59%	56,66%	50,00%	46,00%	42,00%
GWP (kg CO_2 eq / kWh)	0,4208	0,6151	0,2526	0,2251	0,2124	0,1922
CPBT (años)	4,57	3,13	7,62	8,55	9,06	10,01

En la misma Tabla 13, y a modo comparativo, se muestra cual habría sido el CPBT en los años 2010 y 2015, en los que la energía renovable utilizada para la generación de la electricidad de la red en España era mucho menor que la actual. Para todos los escenarios se ha tomado como dato de energía la no tomada de la red, es decir, la autoconsumida, en el año 2020; el de menores restricciones al regadío de los tres de estudio. En dicho año, la C.R. del Valle Inferior del Guadalquivir autoconsumió un total de 5.140.018 kWh.

Además, con la finalidad de conocer cuál ha sido el impacto de la creación de esta planta solar fotovoltaica con respecto a la situación anterior, se han calculado las diferentes categorías

de impacto en los 3 años de funcionamiento, para 4 situaciones o escenarios distintos. El primer escenario corresponde con la situación precedente, en la que no existía el SPV, y toda la energía que consumía la C.R. se tomaba de la red (Grid). El segundo escenario es aquel en el que existe el SPV, que cubre una parte de la demanda de energía, pero no está conectado a la red o no tiene la posibilidad de vender o verter excedentes (Grid + PV (no surplus)). En el tercer escenario sí que se pueden verter los excedentes a la red (Grid + PV (with surplus)). Y el último escenario es aquel en el que toda la energía que la C.R. ha consumido en los tres años procede de la generada por el SPV, una situación que se podría dar puesto que en los tres años de funcionamiento siempre se ha producido más energía de la que se ha consumido (PV).

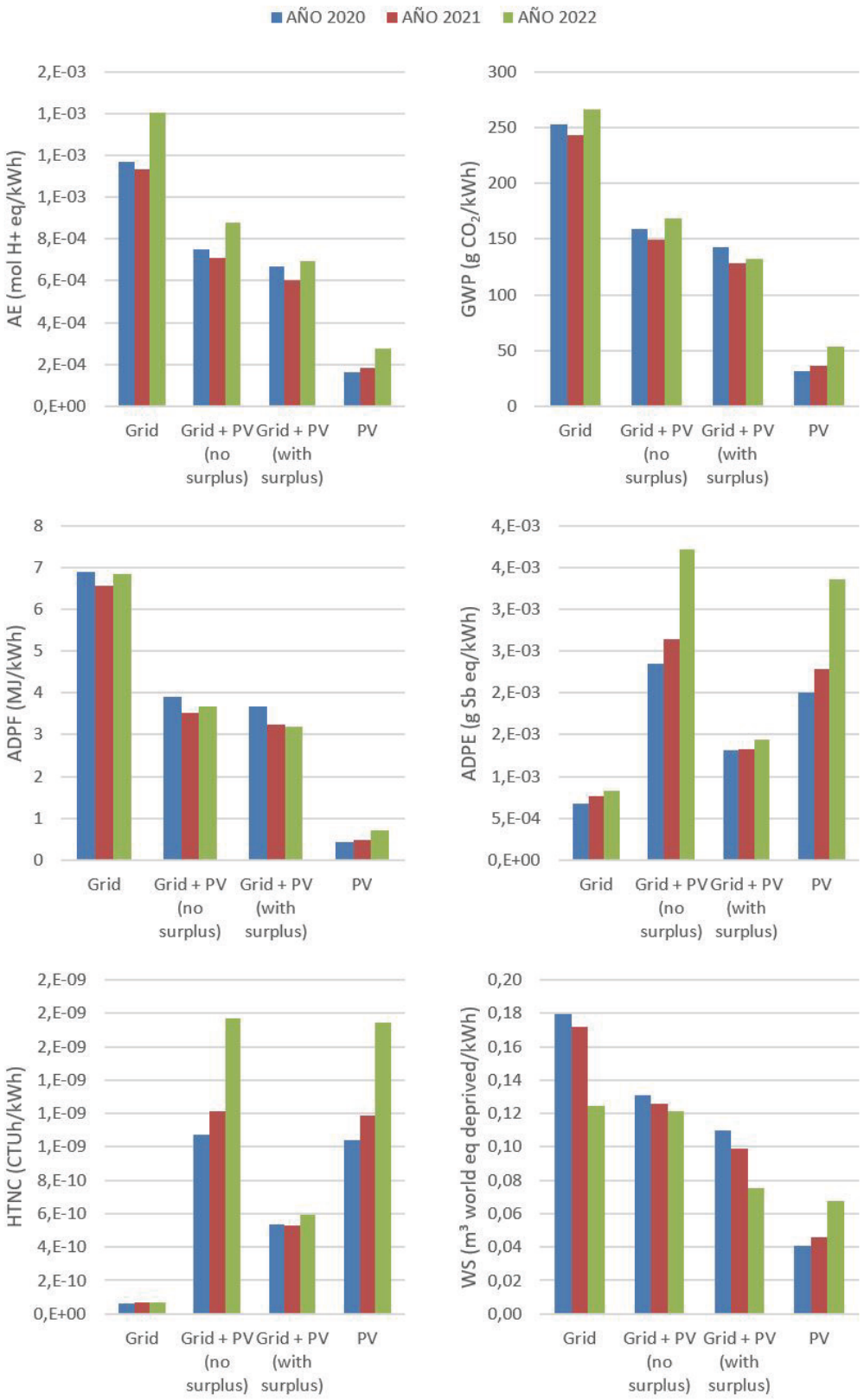


Figura 25. Impacto ambiental de las distintas categorías calculado para los 3 años de estudio y los diferentes escenarios planteados.

Del análisis de estos escenarios se concluye que la creación del SPV y el uso de la energía solar fotovoltaica supone una importante reducción en la mayoría de las categorías de impacto calculadas; y que cuanta más energía del SPV se consume, y menos se toma de la red, menor es el impacto generado. Tan solo en las categorías ADPE y HTNC el uso de la energía solar fotovoltaica no supone una disminución del impacto. Esto se debe a que las células fotovoltaicas y los metales, elementos mayoritarios en cualquier planta solar fotovoltaica, tienen asociada una elevada carga medioambiental para estas categorías.

Centrando el análisis en las categorías consideradas como más importantes, GWP y ADPF, la situación actual de combinación de autoconsumo, consumo de la red y vertido de excedentes, ha supuesto una reducción de los GEI asociados al calentamiento global del 43-50%, y la reducción del 46-53% del uso de combustibles fósiles como fuente de energía.

4. Conclusiones

Los sistemas de generación de energía basados en la energía solar fotovoltaica suponen una fuente de energía limpia y segura, cuyo uso en el regadío supone una importante reducción del impacto ambiental asociado a este tipo de actividad agraria. Este tipo de sistemas no tienen un impacto medioambiental significativo durante su funcionamiento a lo largo de su vida útil. Pero por el contrario si que existe un elevado impacto inicial, en las fases de fabricación de los distintos elementos y construcción de la planta solar, que merece ser estudiado con detalle. Por este motivo, en este trabajo se ha realizado la evaluación del ciclo de vida (ECV) de un sistema fotovoltaico (SPV) vinculado al regadío, pero en este caso, de un sistema de gran tamaño y con la capacidad de verter la energía excedente a la red.

Del análisis realizado se extrae que, a pesar de seguir consumiendo energía de la red, el impacto ambiental generado por la C.R. del Valle Inferior del Guadalquivir se ha reducido a la mitad en dos de las categorías de impacto evaluadas más importantes como son la emisión de gases efectos invernadero, relacionados con el potencial de calentamiento global, y el consumo de energía primaria derivada de combustibles fósiles. Sin embargo, del análisis llevado a cabo se ha podido extraer que, en el caso de que toda la energía consumida se hubiese tomado de la generada por el SPV, la reducción de los impactos habría sido hasta del 90% con respecto a la situación anterior a la creación de la planta solar fotovoltaica. En definitiva, el uso de la energía solar fotovoltaica en el regadío supone una reducción del impacto ambiental, en comparación con las fuentes de energía convencionales, aunque la importancia de dicha reducción estará condicionada por diversos factores, tanto internos como externos, como son la cantidad de energía que se destine autoconsumo, la posibilidad de verter excedentes a la red, o la estructura de la generación de la energía de la red en el país en que se encuentre.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo del Ministerio de Ciencia en Innovación, a través del Proyecto HOPE. Los autores agradecen al Dr. John Gallagher, de la Universidad de Dublín en el Reino Unido, por el apoyo ofrecido con la base de datos Ecoinvent.

Referencias

[1] H. Ritchie, M. Roser, and P. Rosado, "CO_2 and Greenhouse Gas Emissions," *Published online at OurWorldInData.org*, 2020. https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions (accessed May 23, 2023).

[2] W. Palz and H. Zibetta, "Energy pay-back time of photovoltaic modules," *International Journal of Solar Energy*, vol. 10, no. 3–4, pp. 211–216, Oct. 1991, doi: 10.1080/01425919108941464.

[3] E. A. Alsema, "Energy pay-back time and CO2 emissions of PV systems," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 8, no. 1, pp. 17–25, Jan. 2000, doi: 10.1002/(SICI)1099-159X(200001/02)8:1<17::AID-PIP295>3.0.CO;2-C.

[4] A. Mérida García, J. Gallagher, A. McNabola, E. Camacho Poyato, P. Montesinos Barrios, and J. A. Rodríguez Díaz, "Comparing the environmental and economic impacts of on- or off-grid solar photovoltaics with traditional energy sources for rural irrigation systems," *Renew Energy*, vol. 140, pp. 895–904, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.122.

[5] G. Todde *et al.*, "Embodied energy and environmental impact of large-power stand-alone photovoltaic irrigation systems," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.3390/en11082110.

[6] S. Wettstein, K. Muir, D. Scharfy, and M. Stucki, "The environmental mitigation potential of photovoltaic-powered irrigation in the production of South African Maize," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 10, Sep. 2017, doi: 10.3390/su9101772.

[7] M. Kumar, S. S. Chandel, and A. Kumar, "Performance analysis of a 10 MWp utility scale grid-connected canal-top photovoltaic power plant under Indian climatic conditions," *Energy*, vol. 204, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117903.

[8] IRENA and IEA-PVPS, *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*. 2016. Accessed: Dec. 13, 2022. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

[9] V. Fthenakis and M. Raugei, "Environmental life-cycle assessment of photovoltaic systems," in *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems: Modelling, Measurement and Assessment*, Elsevier Inc., 2017, pp. 209–232. doi: 10.1016/B978-1-78242-336-2.00007-0.

[10] A. H. Mohd Nordin, S. I. Sulaiman, S. Shaari, and R. F. Mustapa, "Energy and environmental impacts of a 37.57 MW dc ground-mounted large-scale photovoltaic system in Malaysia: A life-cycle approach," *J Clean Prod*, vol. 335, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130326.

[11] G. Todde *et al.*, "Energy and environmental performances of hybrid photovoltaic irrigation systems in Mediterranean intensive and super-intensive olive orchards," *Science of the Total Environment*, vol. 651, pp. 2514–2523, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.175.

[12] W. Luo *et al.*, "A comparative life-cycle assessment of photovoltaic electricity generation in Singapore by multicrystalline silicon technologies," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 174, pp. 157–162, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2017.08.040.

[13] W. Chen, J. Hong, X. Yuan, and J. Liu, "Environmental impact assessment of monocrystalline silicon solar photovoltaic cell production: A case study in China," *J Clean Prod*, vol. 112, pp. 1025–1032, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.024.

[14] K. P. Bhandari, J. M. Collier, R. J. Ellingson, and D. S. Apul, "Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47. Elsevier Ltd, pp. 133–141, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.02.057.

[15] C. A. S. Hall, S. Balogh, and D. J. R. Murphy, "What is the minimum EROI that a sustainable society must have?," *Energies (Basel)*, vol. 2, no. 1, pp. 25–47, 2009, doi: 10.3390/en20100025.

Land use by photovoltaic installations and comparative studies in agrivoltaics at three locations in Iberian Peninsula.

[1]Fátima Baptista, [2*]Miguel-Ángel Muñoz-García, [2]David Pérez-López, [2]Guillermo-Pedro Moreda-Cantero, [2]Raúl Sánchez Calvo, [1]Lisa Bunge, [3]Carmen Alonso-García, [3]Beatriz Nieto-Morone, [4]Alfonso Moriana, [4]Mireia Corell, [1]Luís Fialho,

[1] MED, Universidade de Évora, Cátedra de Energia Renováveis, Portugal
[2] ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Spain
[3] Dep. Energías Renovables, CIEMAT, Spain
[4] Dep. Agronomía, Universidad de Sevilla, Spain

[2*] Corresponding author: miguelangel.munoz@upm.es

Abstract:

In the current context of energy transition towards a model that has a lower impact on CO2 emissions [1], a circular economy system is also being sought, where emissions can be offset by the environment. To achieve these objectives, which in the case of the Iberian Peninsula are set at 2050 for both Portugal and Spain, as members of the European Union and therefore affected by the European Climate Law, where the EU commits to neutrality in carbon by 2050.

The agrivoltaic concept is taking shape all over the world and especially in Europe, but also in Asia and America, and its purpose is a combination of land use for agricultural and livestock purposes with the production of photovoltaic electricity.

This visual presentation reflects the experiments that are being initiated in three different locations under the umbrella of three projects whose results are intended to be mutually useful to advance this new technique.

Palabras clave: Photovoltaics, solar land use, energy transition

1. Introducción

After passing the deadline of the objectives of Europe 2020, with more or less luck depending on each member country and without forgetting the pandemic that came to disrupt these objectives, we face horizon: Europe 2030, in which It aims to reduce greenhouse gas emissions by 40% compared to the reference taken in 1990 and an increase in primary energy sources to cover 32% of needs.

All this is the way to 2050, where the objective is to achieve neutrality in terms of carbon footprint: that is, a society in which CO2 emissions and other greenhouse gases are offset by their absorption by other methods. .

The reality is that to achieve the objectives of any of the horizons: 20, 30 or 50, the deployment of photovoltaic energy must continue to grow, although not to infinity.

But what is agrovoltaic or agrivoltaic? This term has its origin not many years ago (around 2011, Dupraz) and has been growing exponentially. In reality, there is no closed or fully accepted conception worldwide. What is a fact is that agriculture and photovoltaics need sunlight. In addition, both need space, and for this reason they compete in the use of land and therefore affect the occupation of agricultural land, which is what we have today in this forum.

In recent years there have been many other studies with their corresponding meanings of the term agrivoltaic [2] [3]. Some of these works refer to the use of solar energy on a greenhouse roof. In this work we want to provide a joint vision with parallel experiments of different types, although all of them in open culture.

2. Materials and methods

The three pilots are located at:
- Campus de Polo de Mitra (Evora, Portugal), in charge of the Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development (MED) of the University of Évora and the Cathedra of Renewable Energies
- Campus of Ciudad Universitaria, in charge of the ETSI Agronomy of the Polytechnic University of Madrid in collaboration with CIEMAT.
- Campus of the University of Seville

Likewise, in the UPM pilot the concept of circular economy is applied, using repaired or reused solar panels to verify their performance and reliability in a second life.

2.1. Pilot at Polo de Mitra of Universidade de Evora

The Chathdra of Renewable Energies, included in the MED of the University of Evora, is the one that develops a photovoltaic pilot that is used to test pumping and will also include crops under the panels for agrivoltaic tests.

In this case, the panels are already installed, in a configuration commonly used in commercial structures. This will allow evaluating the options that have structures already in operation to become agrivoltaic systems.



Figure 1 Pilot solar agrivoltaic plant (1 axe tracking) at Polo de Mitra, Evora.



Figure 2 The pilot uses 1 axe-automatic tracking as well as monofacial as well as bifacial PV modules.

The current sensoring plan includes
Continuous monitoring:
- Soil Moisture and Temperature Profile Sensors
- PAR Full-Spectrum Quantum Sensors
- GHI, DNI, RH, Air Temperature, Pluviometer, Wind speed, Wind direction
- Global Irradiation (PV plane) + Albedometer
- Air temperature at different height levels

Periodic sampling monitoring:
- Additional soil water content profile handheld sensor
- Photosynthesis measurement handheld equipment

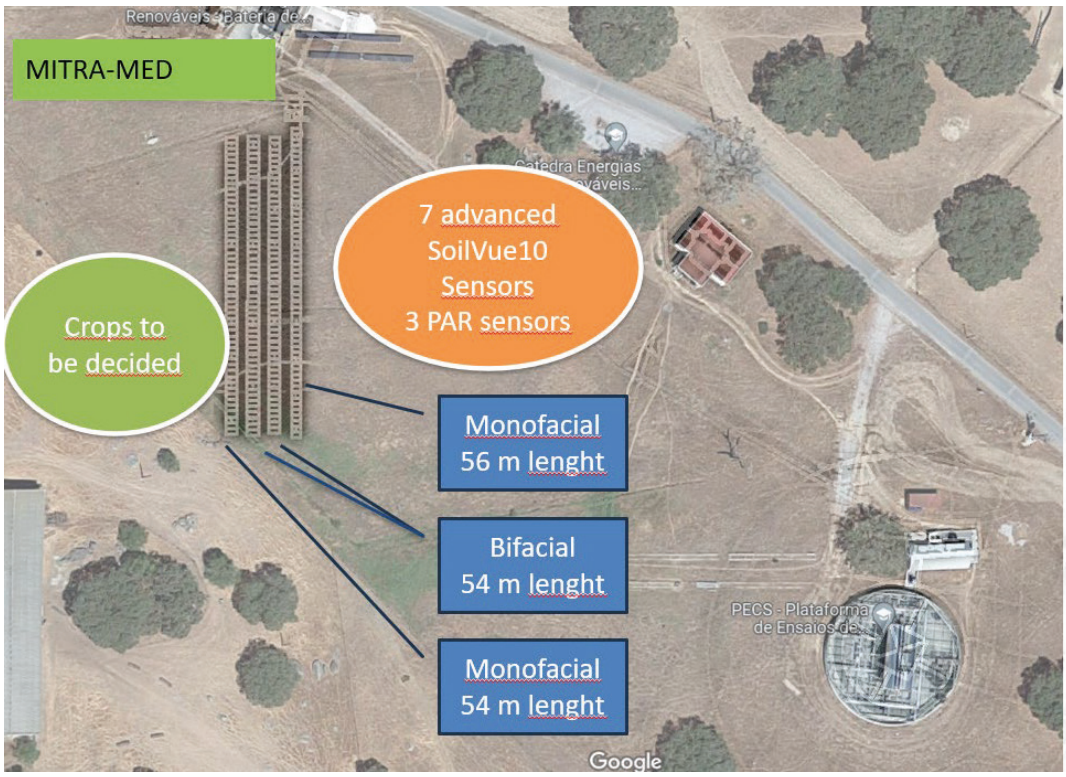


Figure 3 The plot of the agrivoltaic instalation at Universidade de Evora.

2.2. Pilots at Universidad Politécnica de Madrid and Universidad de Sevilla

The agrivoltaic installation located in the Experimentation Fields of the ETSIAAB (Higher Technical School of Agronomic, Food and Biosystems Engineering) of the Universidad Politécnia de Madrid, is made up of nine plots (Table 1) of which three will be covered by photovoltaic pergolas 3 m high from the axis to the ground. (they have manual adjustable inclination). This height allows the passage of machinery for tillage.

Table 1. Crops scheme

Block 1	Block 2	Blok 3
Open field	AGROVOLTAIC	Open field
Control	**RDI**	**RDI**
Open field	Open field	AGROVOLTAIC
RDI	**Control**	**RDI**
AGROVOLTAIC	Open field	Open field
RDI	**RDI**	**Control**

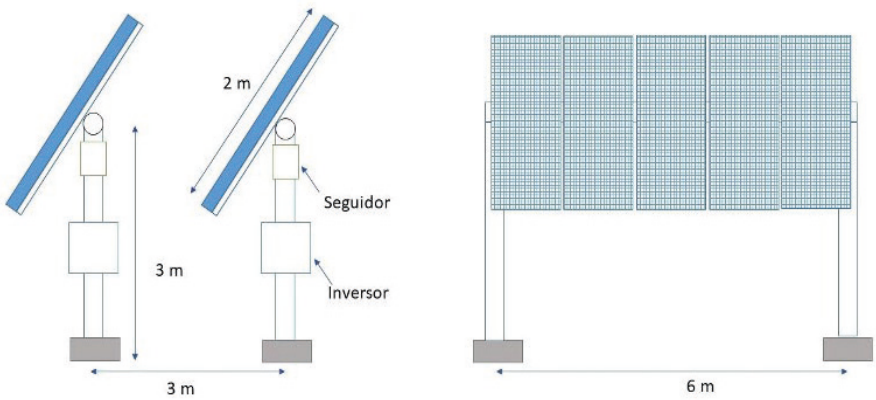


Figure 4 First version for the solar agrivoltaic pilot plant at UPM (Madrid). The one in US (Seville) will be a twin one of this.

At this moment you can see the crop installed and adapted in the figure 5. The crop rotations are reflected in the table 2.



Figure 5 Different stages for the crop cultivation at UPM

Table 2. Crops rotation

2023	Autumn (october-december)	Lettuce	Oak leaf
2024	Spring (april-june)	Tomato	Processing
	Autumn (august-december)	Green bean	Processing
2025	Spring (march-may)	Lettuce	Oak leaf
	Autumn(august-december)	Tomato	Processing

2.4. Repair and Reuse of solar photovoltaic panels at CIEMAT

In the case of CIEMAT, the collaboration aims to include the concept of circularity and for this it will experiment with repaired and reused solar panels as part of the photovoltaic structure, and analyze the projections of the photovoltaic waste generation [4].

Specific objectives:

O1 Support to Spanish institutions to implement an efficient recycling system for photovoltaic modules.

O2 Generation of knowledge about the mass of photovoltaic modules installed in Spain.

O3 Development of effective characterization techniques for photovoltaic module defects, focused on discriminating between serious defects that would lead the module to the end of its useful life and minor defects, with the possibility of repair.

O4 Development of techniques to repair defects. Creation of a guide to defects and their possible repair.

O5 Contribution to the analysis of the life cycle of photovoltaic systems, including repair and recycling options.

O6 Proof of concept of a small photovoltaic plant with repaired modules.

O7 Perception and public dissemination of the state of photovoltaic solar energy in Spain and the world, and the role of photovoltaic modules as 3R materials to be included in the circular economy.

3. Results and discussion

3.1. Results in UE pilot

Once the commercial photovoltaic structure is installed, the soil is being analyzed for its possible initial treatment and to later see its evolution over time.

The influence of commercial footing structures on land tillage is also being analysed. While driven structures are desirable, there are already many footing structures in place, so it will be of interest to see how to address this issue.

3.2. Results in UPM pilot

In the UPM pilot, the crop has been installed and the photovoltaic pergolas are awarded to be installed according to the figure

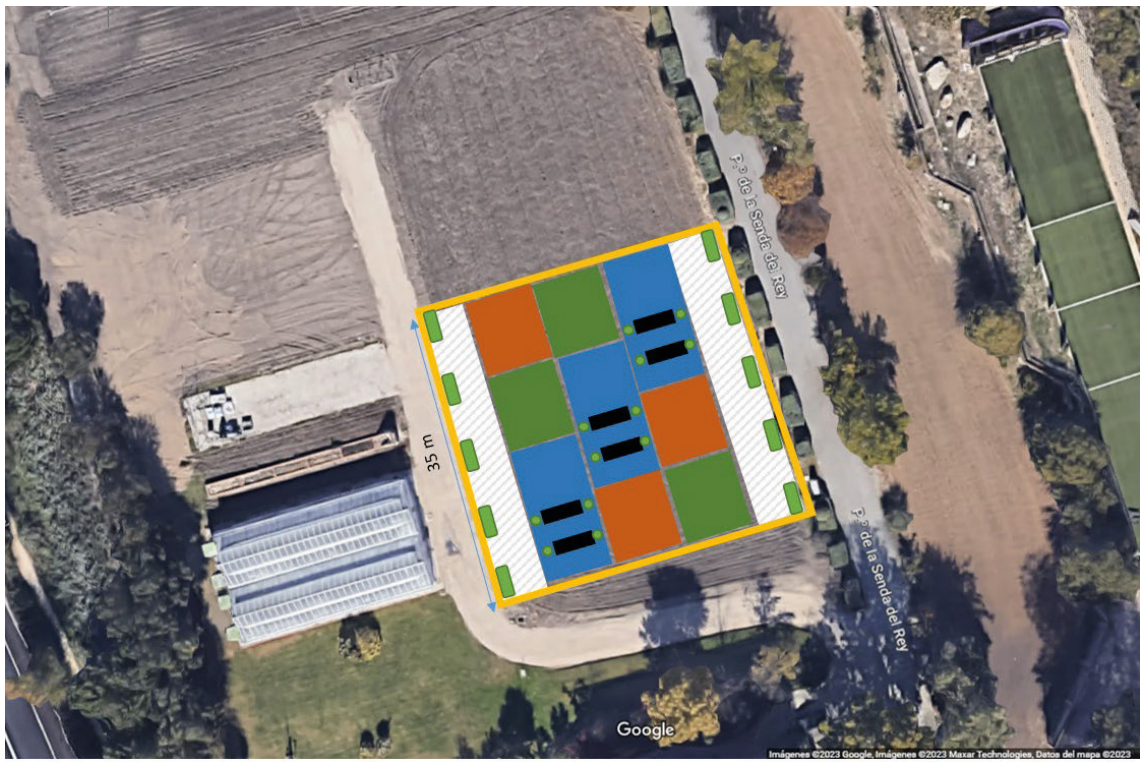


Figure 6 Final version for the land areas used for the agrivoltaic expeiment at UPM



Figure 7 Final version for the land areas used for the agrivoltaic expeiment at UPM

3.3. Results for CIEMAT collaboration

At the CIEMAT, analysis work is being carried out on recovered panels to determine if they are repairable and then test them at the UPM pilot plant.

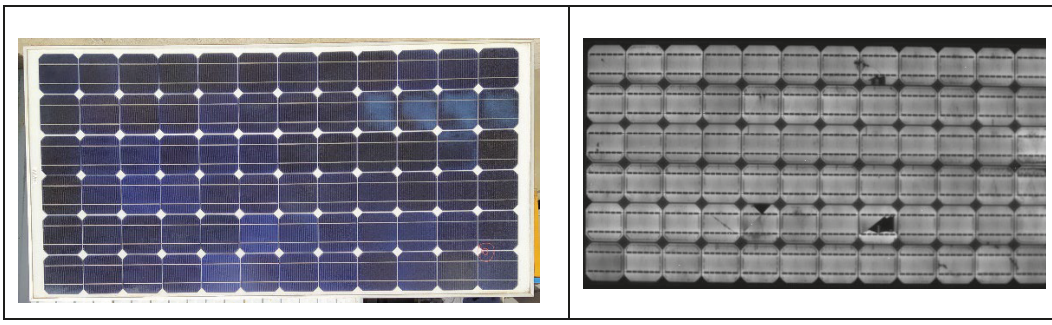


Figure 8 Electroluminiscence image at CIEMAT prior to repair a PV module

A prospective analysis on the future impact of photovoltaic waste has been carried out based on past data [5].

Table 2. Recycling situation of PV modules in Spain

Year	**Waste recovered (ton.)**	**Waste treated (ton.)**	**Waste valued (ton.)**	**Prepared for reuse/recicle (ton.)**
2017	155.13	149	134.10	120.21
2018	461.89	276	248.55	240.35
2019	226.15	150.53	117.29	104.33

Treated waste: amount of waste that has been receied at a WEEE final treatment plant and has been subjected to the corresponding treatment procedure, in accordance with RD 110/2015

Recovered quantities: quantities of material from PV panel waste, which, after having received the appropriate treatment, have been used for recovery operations, such as energy recovery, recycling and preparation for reuse.

4. Conclussions

In this phase of the tests, definitive conclusions have not yet been reached, although points of interest have been detected, such as:

- Commercial structures may be capable of adapting to agrovoltaic systems
- The repair of panels is viable, although its economic profitability must be established
- In horticultural crops, manual treatment facilitates photovoltaic structures that are not so high.

5. Acknowledgements

This work is part of the grants funded by MICIN/AEI/10.13039/501100011033.
PID2021-1227722OB-I00
PID2020-118417RB-C21

The work presented is a result of a stay at Universidad de Evora and has been co-funded by Programa Propio de Movilidad 2023 of Universidad Politécnica de Madrid in cooperation with Banco Santander

References

1. EuroStat. Share of Energy Consumption by Agriculture in Final Energy Consumption, EU, 2009 and 2019. 2021.

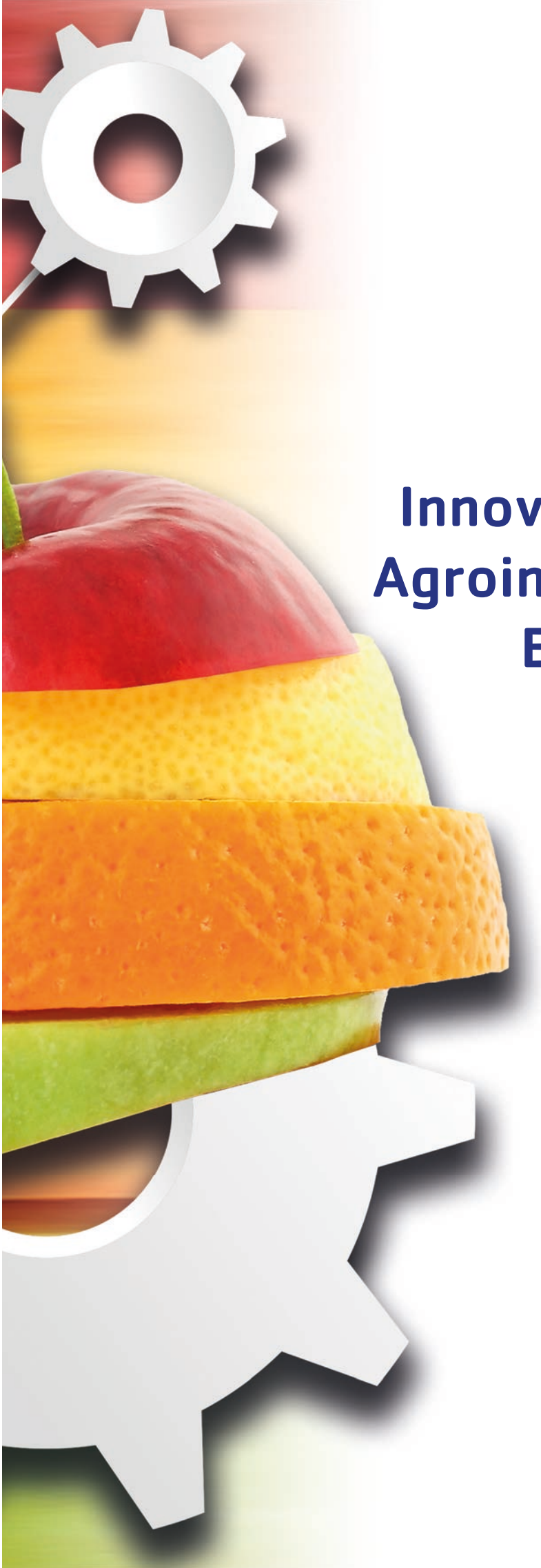
2. Bhandari, S.N.; Schlüter, S.; Kuckshinrichs, W.; Schlör, H.; Adamou, R.; Bhandari, R. Economic Feasibility of Agrivoltaic Systems in Food-Energy Nexus Context: Modelling and a Case Study in Niger. Agronomy 2021, 11, 1906.

3. Moreda, G.; Muñoz-García, M.; Alonso-García, M.; Hernández-Callejo, L. Techno-Economic Viability of Agro-Photovoltaic Irrigated Arable Lands in the EU-Med Region: A Case-Study in Southwestern Spain. Agronomy 2021, 11, 593

4. J.D. Santos, M.C. Alonso-García, N. Vela. Update of the Projection of the Photovoltaic Waste in Spain until 2050. Pro. Of the 36th EU PVSEC, 09 - 13 September 2019, Marseille, France, pp 1234-1240

5. NM M. B., AG M. C., R F. G., JD Santos, MG M. A. State and prospects of photovoltaic module waste generation in China, USA, and selected countries in Europe and South America, Sustainable Energy & Fuels





Innovación Educativa en Agroingeniería/ Inovação Educativa em Agro-engenharia



Mapeo de los ODS y sus Metas en Competencias Curriculares de asignaturas vinculadas al Medio Natural, Agrario y Forestal de la Universidad de Valladolid

F. Tomatis[1], E. Sánchez-Hernández[1], P. Martín-Ramos[1], L.M. Navas-Gracia[1], S. Hernández-Navarro[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia; francisco.tomatis@uva.es (F.T.); eva.sanchez.hernandez@uva.es (E.S.-H.); pmr@uva.es (P.M.-R.); luismanuel.navas@uva.es (L.M.N.-G.); salvador.hernandez@uva.es (S.H.-N)

Abstract: In the work presented herein, sustainable development goals (SDGs) and their targets were mapped onto 'Natural, Agricultural, and Forestry Environment subjects' curricular competencies to assess SDGs incorporation in study plans offered at the University of Valladolid. Of the 27 general competencies (G1-G27) evaluated in the ETSIIAA syllabuses, SDG 4 had the highest association while SDG 3 had the lowest. The greatest competency-target correspondences were found for targets 4.4, 4.7 (both in SDG 4), and 16.7 (SDG 16). Specificity of contents mainly determined the degree of relationship, but a bias existed due to the breadth of significant terms in the formulation of some competencies (competencies G13 and G24). Replicating this mapping in other subjects can diagnose educational degrees to align the university and faculty members with the Agenda 2030 objectives and contribute to achieving the targets through teaching.

Palabras clave: Agenda 2030; docencia universitaria; guías docentes; Objetivos de Desarrollo Sostenible; plan de estudios

1. Introducción

La declaración de Naciones Unidas "Transformando nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible" es uno de los acuerdos globales más ambiciosos y trascendentales en la historia reciente [1]. La Agenda, que entró en vigor el 1 de enero de 2016 y tiene los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como eje central (Figura 1), es una guía que pretende abordar los desafíos mundiales más acuciantes [1]. A partir de su declaración, los ODS han suscitado un gran interés por parte de gobiernos, empresas y organizaciones en la mayoría de los países [1]. Por su parte, las universidades pueden contribuir al logro de los ODS en el desarrollo de sus actividades de docencia, investigación, gestión y transferencia de conocimientos [2] e incluso están llamadas a desempeñar un papel fundamental para ello [1].



Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Las universidades son consideradas actores claves para promover el desarrollo humano sostenible [3]. En las últimas décadas, la formación para la sostenibilidad en el ámbito universitario ha cobrado una especial relevancia por su impacto social en todos los campos de conocimiento [4], y especialmente a finales del siglo pasado, cuando se impulsaron las "Ciencias Ambientales" [5], concepto que ha evolucionado al de "desarrollo sostenible" y de "sostenibilidad" [5]. Actualmente, las universidades están interpeladas directamente por el principio de integralidad de la Agenda 2030 [3] y sus compromisos se reflejan en documentos como la "Declaración de Incheon para la Educación 2030" [6] a nivel internacional o "El compromiso de las Universidades Españolas con la Agenda 2030" [3] a nivel nacional español, por citar algunos.

De este modo, las universidades ponen a disposición de la Agenda 2030 sus recursos, aptitudes, así como su espacio de influencia, al servicio de un desarrollo global sostenible no sólo respecto al ODS 4 (vinculado a la Educación de Calidad) sino a los 17 ODS [3]. Considerando que no existe una única forma de comprometerse con los ODS desde las universidades, la Universidad de Valladolid (UVa) a nivel institucional posee un plan de acción específico, integral, transversal y participativo como es "UVa 2030", además de Programas como el de "Responsabilidad Social Universitaria UVa", la "Oficina de Calidad Ambiental y Sostenibilidad UVa" e incluso la "Cátedra Agenda Urbana 2030 para el desarrollo local: Campus de Soria".

Si bien existe una conciencia cada vez mayor del papel fundamental que tienen las universidades en la implementación de los ODS (y muchas universidades buscan desempeñar activamente ese papel), existe muy poco material disponible que oriente "en la práctica" [1]. Esto sucede porque las universidades se encuentran ante el desafío de alinear sus actividades en torno a los ODS y muchas veces no saben cómo hacerlo. Esta dificultad se debe principalmente a que los ODS, con sus metas e indicadores definidos por Naciones Unidas (A.RES/71/313), están dirigidos hacia los países y estados de la comunidad internacional, y su utilización en universidades, empresas e incluso ciudades requiere de un proceso de adaptación.

En el presente estudio y dentro del enfoque integral de los ODS en las universidades [1], se procede a "conocer e identificar lo que se está haciendo" (mapeo), como *ítem* fundamental para evaluar cómo se están trabajando los ODS en el ámbito curricular [2]. Mapear es una poderosa herramienta para mostrar lo que ya está en marcha (diagnóstico), así como para identificar sinergias dentro de la universidad [2]. El objetivo y alcance en este estudio es el mapeo de los ODS y sus metas en las competencias generales, recogidas en las guías docentes (2022/23), de tres asignaturas de la UVa vinculadas a Grados y Máster de Medio Natural, Agrario y Forestal.

La utilidad del mapeo en las competencias permite saber cómo y en qué aspectos la enseñanza, y por tanto el aprendizaje, contribuyen al cumplimiento de los ODS y sus metas. Además, el mapeo resulta sumamente útil para identificar "lagunas" de enseñanza, es decir,

aquellos ODS y metas que no se encuentran representados directamente en las competencias de las guías docentes.

2. Materiales y métodos

Las tres guías docentes (curso académico 2022-2023) evaluadas, con sus respectivas competencias generales, corresponden a asignaturas de Grado (1) y Máster (2) ofrecidas por la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (Campus de Palencia). Las asignaturas analizadas son:

a) Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente, del Grado en Enología (código 42033) [7].
b) Auditoría Ambiental, del Máster en Ingeniería de Montes (código 51978) [8].
c) Política y Legislación del Medio Natural, del Máster en Ingeniería de Montes (código 51985) [9].

Cabe mencionar que el mapeo se ha realizado a modo de prueba piloto. Por tanto, la selección particular de las asignaturas ha de referirse, principalmente, a los vínculos directos de los autores del artículo con la docencia de las mismas.

El proceso de revisión ha sido llevado a cabo de forma directa y crítica. Las competencias generales de cada asignatura han sido vinculadas con los ODS y metas descritos oficialmente en la A.RES/71/313 de Naciones Unidas. Sin embargo, los indicadores no han sido considerados, ya que no están adaptados para su aplicación a escala curricular universitaria de forma directa. El total de competencias evaluadas ha sido de 259. No obstante, debido a que algunas de ellas se repiten en dos e incluso las tres asignaturas, ha sido preciso su agrupamiento, con lo que se han obtenido un total de 27 competencias (G1-G27) diferentes.

3. Resultados y discusión

En 27 competencias generales (G1-G27) mapeadas se refleja un mayor vínculo con el ODS 4 (18,5%), seguido por el ODS 16 (11,6%), y por los ODS 11 y 15 (ambos con 7,7%) (Figura 2). Las menores relaciones se encuentran con los ODS 9 (2,7%), 1 (2,3%), y 3 (0,4%).

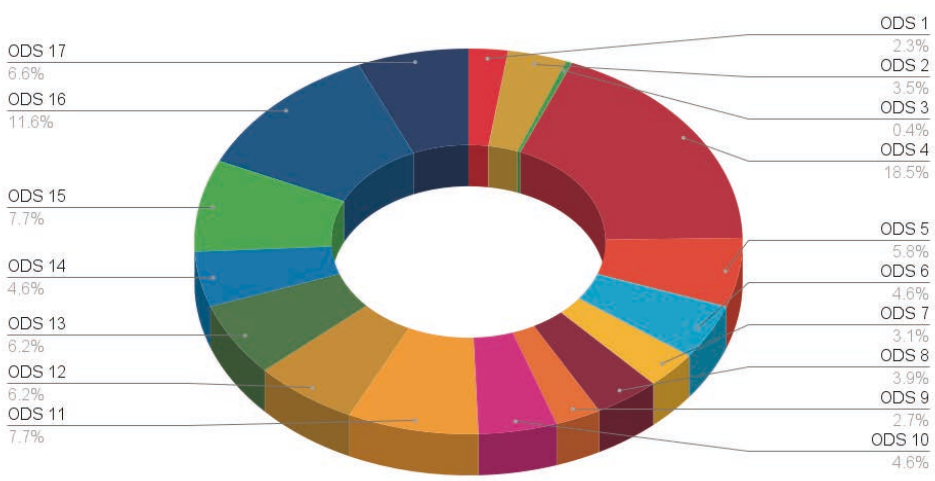


Figura 2. Mapeo de las competencias generales con cada ODS. El porcentaje indica la cantidad de veces que se han vinculado las competencias con cada ODS.

Las competencias descritas en las guías docentes analizadas reconocen la importancia de la educación para el desarrollo sostenible a través del ODS 4, que exige proporcionar "*educación de calidad, inclusiva e igualitaria y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos/as*" [1].

En este caso, se debe considerar que, si bien la educación es el centro de uno de los objetivos (ODS 4), también está estrechamente relacionada con todos los demás ODS [1].

Respecto a la relación de las competencias (G1-G27) con las metas de los ODS (Figura 3), se concluye que es la meta 4.4 "*De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de jóvenes y adultos que tienen las competencias necesarias, en particular técnicas y profesionales, para acceder al empleo, el trabajo decente y el emprendimiento*" es la que más aportes recibe. Le siguen la meta 4.7 del ODS 4 y la meta 16.7 del ODS 16.

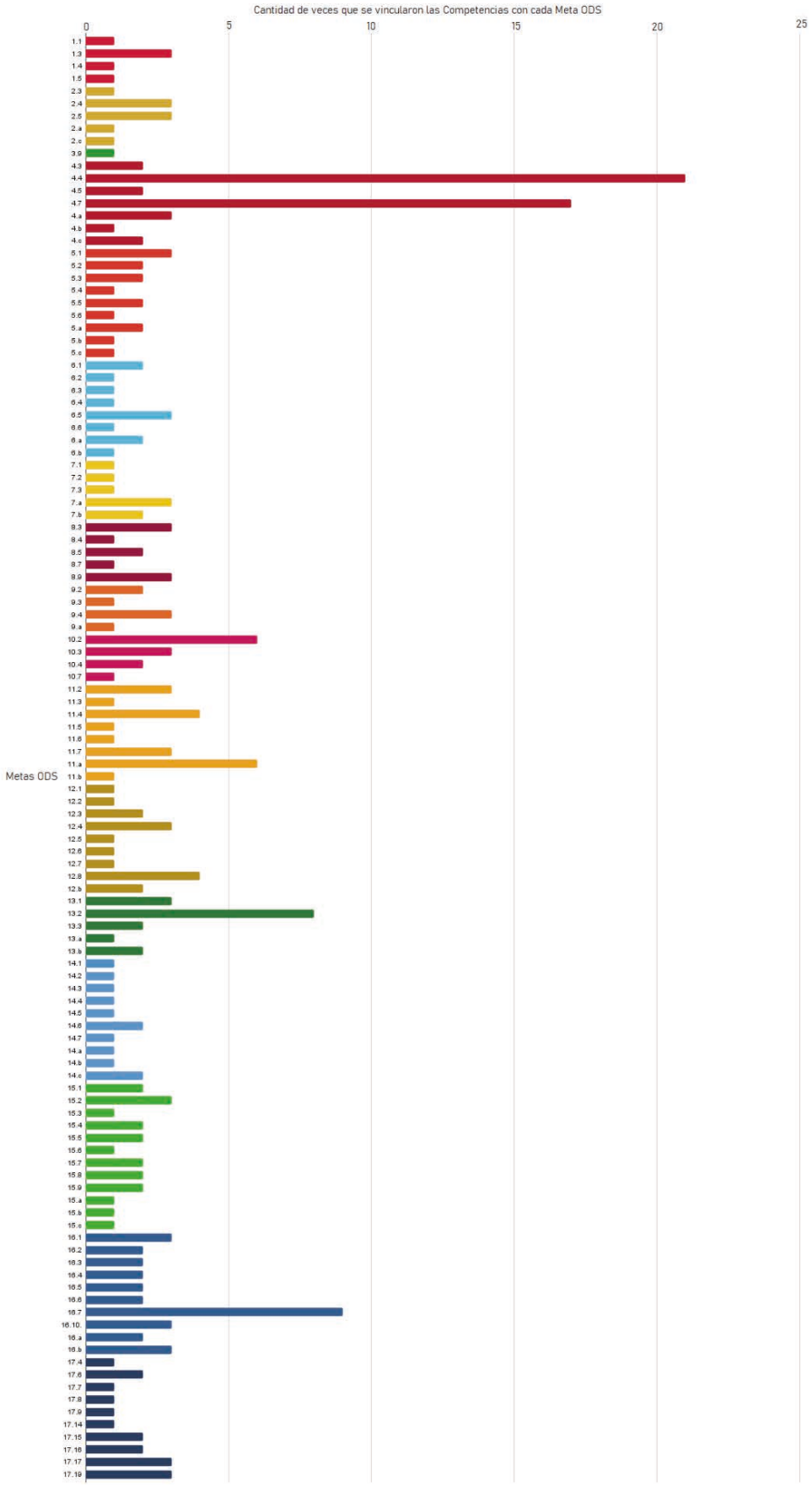

Cantidad de veces que se vincularon las Competencias con cada Meta ODS
0
5
10
15
20
25
Metas ODS
1.1
1.3
1.4
1.5
2.3
2.4
2.5
2.a
2.c
3.9
4.3
4.4
4.5
4.7
4.a
4.b
4.c
5.1
5.2
5.3
5.4
5.5
5.6
5.a
5.b
5.c
6.1
6.2
6.3
6.4
6.5
6.6
6.a
6.b
7.1
7.2
7.3
7.a
7.b
8.3
8.4
8.5
8.7
8.9
9.2
9.3
9.4
9.a
10.2
10.3
10.4
10.7
11.2
11.3
11.4
11.5
11.6
11.7
11.a
11.b
12.1
12.2
12.3
12.4
12.5
12.6
12.7
12.8
12.b
13.1
13.2
13.3
13.a
13.b
14.1
14.2
14.3
14.4
14.5
14.6
14.7
14.a
14.b
14.c
15.1
15.2
15.3
15.4
15.5
15.6
15.7
15.8
15.9
15.a
15.b
15.c
16.1
16.2
16.3
16.4
16.5
16.6
16.7
16.10.
16.a
16.b
17.4
17.6
17.7
17.8
17.9
17.14
17.15
17.16
17.17
17.19

Figura 3. Vinculación de las competencias con las metas de los ODS.

Comparando la totalidad de metas descritas en la A.RES/71/313 de Naciones Unidas y la cantidad de metas que fueron vinculadas con las competencias, se observa que: en el ODS 1 han sido vinculadas 4 metas de un total de 7; en el ODS 2, 5 de 8 metas; en el ODS 3, 1 de 13 metas; en el ODS 4, 7 de 10 metas; en el ODS 5, 9 de 9 metas; en el ODS 6, 8 de 8 metas; en el ODS 7, 5 de 5 metas; en el ODS 8, 5 de 12 metas; en el ODS 9, 4 de 8 metas; en el ODS 10, 4 de 10 metas; en el ODS 11, 8 de 10 metas; en el ODS 12, 9 de 11 metas; en el ODS 13, 5 de 5 metas; en el ODS 14, 10 de 10 metas; en el ODS 15, 12 de 12 metas; en el ODS 16, 10 de 12 metas y; en el ODS 17, 10 de 19 metas. En resumen, en los ODS 5, 6, 7, 13, 14 y 15 se han vinculado la totalidad de sus metas como mínimo en una ocasión.

Los resultados reflejan que es el ODS 4, ligado precisamente a la educación, el que posee mayor vínculo con las competencias planteadas por la docencia (Tabla 1), mientras que el ODS 3 (“*Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades*”) presenta las menores relaciones encontradas.

Tabla 1. Vínculos de las competencias evaluadas (G1 al G27) con cada uno de los ODS. El color verde representa algún vínculo existente, mientras que el color blanco representa la ausencia de vínculo encontrado en las guías docentes de las asignaturas evaluadas, a saber: (a) Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente; (b) Auditoría Ambiental; y (c) Política y Legislación del Medio Natural.

Asignatura	Competencia	ODS																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
b) y c)	G1																	
a), b) y c)	G2																	
a), b) y c)	G3																	
a), b) y c)	G4																	
a), b) y c)	G5																	
b) y c)	G6																	
b) y c)	G7																	
a), b) y c)	G8																	
a), b) y c)	G9																	
b) y c)	G10																	
b) y c)	G11																	
a), b) y c)	G12																	
b) y c)	G13																	
a), b) y c)	G14																	
b) y c)	G15																	

| | | |

muestre una mayor coherencia entre el discurso y la acción en todos los niveles universitarios (docencia, organización y gestión) [4], atraiga la demanda de educación relacionada con los ODS, aumente la reputación de las carreras, construya alianzas con nuevos socios externos e internos, y acceda a nuevas fuentes de financiación [5].

Para motivar la adopción de este tipo de herramientas por los docentes universitarios, han de promoverse cambios imprescindibles en el diseño curricular dirigidos a la adecuación de los contenidos, metodologías y prácticas que contribuyen a desplegar competencias para la sostenibilidad [10], lo que implica empoderar a la comunidad universitaria mediante el desarrollo de las habilidades, conocimientos, actitudes y valores que les permitan afrontar los desafíos para el logro de la Agenda 2030 [2]. Al objeto de crear las condiciones que permitan este cambio, la UVa ha encontrado sumamente útil conocer en qué situación se encuentran los planes de estudios en relación a los ODS mediante la realización de diagnósticos (mapeos) como el que se recoge en el presente estudio. A partir del mismo está previsto encaminar proyectos que ayuden a los docentes, investigadores y responsables de la educación a orientar sus decisiones y acciones, manifestadas en las competencias curriculares, hacia el cumplimiento de los ODS y sus metas.

4. Conclusiones

El mapeo de los ODS en los planes de estudio es una herramienta valiosa para evaluar la relación entre la enseñanza universitaria, los objetivos docentes y el cumplimiento de la Agenda 2030. Esta herramienta es una forma de abordar directamente, mediante la adaptación y localización, los objetivos planteados por la Agenda 2030 a nivel internacional hacia el nivel local, en este caso, a nivel curricular universitario.

Los resultados obtenidos demuestran que las consideraciones establecidas en la A.RES/71/313 de las Naciones Unidas pueden vincularse directamente, sin modificaciones, con las competencias establecidas en las guías docentes universitarias. Sin embargo, en el caso de los indicadores, se requieren modificaciones para su mapeo a esta escala.

El análisis de las competencias generales de las guías docentes de las tres asignaturas evaluadas revela una mayor vinculación con el ODS 4 (a cuenta de sus contenidos específicos sobre educación). Con respecto a las metas, los mayores vínculos también se encontraron con el ODS 4, específicamente con las metas 4.4 y 4.7.

Aparte de la especificidad o la idoneidad como razones en las que basar la vinculación de las competencias planteadas por los docentes con una mayor cantidad de ODS y metas, la susceptibilidad de los enunciados de las competencias a interpretaciones más amplias resulta determinante a este respecto, como es el caso de las competencias G13 y G24.

En conclusión, los resultados obtenidos acreditan la eficacia de las herramientas metodológicas utilizadas en este estudio para lograr sus objetivos. Por lo tanto, estas herramientas podrían aplicarse en otras guías docentes de la universidad e incluso generalizarse para evaluar programas de estudio completos. Es recomendable que el mapeo realizado se mantenga actualizado en el tiempo mediante la repetición del proceso durante las actualizaciones de las guías docentes, lo cual sería de gran utilidad.

Referencias

11. SDSN: Getting started with the SDGs in universities: A guide for universities, higher education institutions, and the academic sector. Sustainable Development Solutions Network: Australia, New Zealand, and Pacific Edition. Australia/Pacific, Melbourne. **2017**.
12. Segado Segado, I., Sánchez Vidal, M. E.; Hernández Aguado, S. Integración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en la UPCT: Aproximación a nivel curricular. *Cuadernos CEDE Agenda 2030*, **2020**.
13. CRUE Universidades Españolas. El compromiso de las Universidades Españolas con la Agenda 2030.

14. De Prada Pérez De Azpeitia, F. I. Infrared thermography: An amazing resource for teaching physics and chemistry. *Revista Eureka* **2016**, *13*(3), 617–627.
15. SDSN: Accelerating Education for the SDGs in Universities: A guide for universities, colleges, and tertiary and higher education institutions. Sustainable Development Solutions Network: New York. **2020**.
16. UNESCO. Declaración de Incheon y Marco de Acción para la realización del Objetivo de Desarrollo Sostenible 4. Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos. *Unescodoc*, **2016**, 1–84.
17. https://albergueweb1.uva.es/guia_docente/uploads/2022/444/42033/1/Documento.pdf
18. https://albergueweb1.uva.es/guia_docente/uploads/2022/428/51978/1/Documento.pdf
19. https://albergueweb1.uva.es/guia_docente/uploads/2022/428/51985/1/Documento.pdf
20. Geli, A. M., Collazo, L. y Mulà, I. Contexto y evolución de la sostenibilidad en el currículum de la universidad española. *Revista de Educación Ambiental y Sostenibilidad.* **2019,** *1*(1), 1102. doi: 10.25267/Rev_educ_ambient_sostenibilidad.2019.v1.i1.1102



Domotic School Garden (DSG), alimentación saludable a través de la experimentación sensorial

A. Melián Navarro[1], M.C. Martínez Arenes[2], A. Ruiz Canales[1], E. Kafetzi[3], M. Mathiantoni[3], E. Boncompagni[4], K. Kantardzhieva[5], G. Markova[5], M.Koycheva[5], M.T. Pretel Pretel[1]

[1] Centro de Investigación e Innovación Agroalimentario y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández, Ctra. Beniel km. 3.2, 03312 Orihuela (Alicante); amparo.melian@umh.es
[2] Departamento Agraria, Instituto de Educación Secundaria "El Palmeral" Avd. Doctor García Rogel, 28, 03300 Orihuela (Alicante); martinezarenes@gmail.com
[3] Primary School of Mikro Evmoiro, Xanthi, Grecia; ekafetzi@sch.gr, mathiantonikse@gmail.com
[4] Direzione Didattica "Francesca Turrini-Bufalini" San Giustino Citerna, Via de Amicis, 06016, Perugia, Italia; elisaboncompagni13@gmail.com
[5] Innovative School St Kliment Ohridski, 12 A.Ivanov Str., Chirpan 6200, Bulgaria; discovery.mlc@gmail.com

Abstract:
This paper summarizes the experience of a gamification activity to promote healthy eating through the recognition of fruit and vegetable products in European primary schools. This activity is part of the Erasmus+ Domotic School Garden (DSG) project (2020-1-ES01-KA201-082999) coordinated by the Miguel Hernández University (Spain), and its application in four Educational Centers in three European countries (Bulgaria, Greece and Italy). The project promotes educational innovation by making students participants in their own learning process.

Palabras clave: aprendizaje, Erasmus +, productos hortofrutícolas, innovación educativa

1. Introducción

En el marco de la Convocatoria de Propuestas del Programa Erasmus +, de educación, formación, juventud y deporte de la Unión y dentro de la modalidad KA2 - Cooperación para la innovación y el intercambio de buenas prácticas, KA201 - Asociaciones estratégicas para la educación escolar, la Universidad Miguel Hernández solicitó un Proyecto, Erasmus+ *Domotic School Garden* (DSG) (2020-1-ES01-KA201-082999) basado en la domotización de un huerto ecológico escolar, instalando sensores de bajo costo que controlan las condiciones ambientales. Con base en el huerto escolar como herramienta básica de trabajo, se han planteado diversas actividades para desarrollar las competencias del estudiantado en CTIMA (Ciencias, Tecnología, Ingeniería, Matemáticas y Arte) y la competencia lingüística (inglés).

En el proyecto participan seis entidades, la Universidad Miguel Hernández (UMH) como grupo coordinador con cuatro miembros, la empresa Llave Consulting con dos personas, y cuatro colegios de educación primaria de tres países europeos (con ocho profesores). Estos centros educativos son: St. Kliment Ohridski School de Bulgaria, The Primary School of Mikro Evmoiro de Grecia y el Circolo Didattico San Giustino e Citerna en Italia En las escuelas de Bulgaria y Grecia estudian un centenar de alumnos, y en las de Italia más de 400. Sus edades están comprendidas entre los 5 y los 11 años.

Con este proyecto se potencia el aprendizaje mediante la innovación, haciendo a los estudiantes partícipes del mismo mediante una propuesta activa. Que el aprendizaje sea una experiencia positiva y motivadora y se formen personas que disfruten aprendiendo.

El equipo coordinador de la UMH es multidisciplinar y pertenece a las áreas de conocimiento de Ingeniería Agroforestal (IP), Biología Vegetal, Economía Agraria y Ecología. El proyecto pretende la educación desde edades tempranas (escuela de primaria) en las temáticas citadas mediante el desarrollo de diversas actividades en el aula.

Se propusieron 5 actividades por área y se planificó su desarrollo y temporización, decidiendo que cada mes se presentara una actividad nueva del proyecto, combinando las distintas áreas incluidas en el mismo (economía, ciencia, medioambiente, tecnología).

En el caso de las correspondientes al área de Economía Circular y Sostenibilidad las actividades propuestas fueron relacionadas con: el reciclaje, el consumo de productos hortofrutícolas de proximidad, la producción ecológica vs convencional, el juego de roles (hambre cero), y acciones de compra en supermercado (alimentación saludable). En todo momento las propuestas se han tutorizado con el resto de participantes del proyecto y en especial con los de los centros educativos. Los materiales se han subido a un drive compartido, así como las instrucciones y fichas de evidencias a cumplimentar después de realizar las actividades [1]. Se ha tratado en la medida de lo posible que todas ellas tuvieran una parte de gamificación.

La actividad que se desarrolla en la presente comunicación trata de potenciar el consumo de frutas y verduras tras un contacto con los productos agroalimentarios a través de los sentidos, fomentando de manera transversal una alimentación saludable y un consumo de productos de temporada. Pero no sólo ello, también que se potencie la colaboración entre los estudiantes, la confianza en otros compañeros, reconocer emociones, atender a la diversidad, fomentar la curiosidad y verbalizar opiniones.

En concreto, la actividad se diseña para que el alumnado experimente con sus sentidos las particularidades de los productos locales y de proximidad. Se familiaricen con sus características y despierten deseos de tener una alimentación más sana y equilibrada. Las competencias CTIMA (STEAM por sus siglas en inglés) que se desarrollan con esta actividad son las siguientes: *Science and Technology* (Figura 1). Se trabaja sobre estas competencias para "integrarlas desde edades tempranas y ser más efectivas en el aprendizaje de la vida" [2]. Fomentar una actitud proactiva hacia la ciencia y el conocimiento tecnológico y conectar con los ciudadanos de todas las edades. "La educación científica debe promover las oportunidades de sumergirse y resurgir el pensamiento y la reflexión, de beneficiarse de la aventura de la indagación, del deseo de aprender y de seguir aprendiendo" [3].

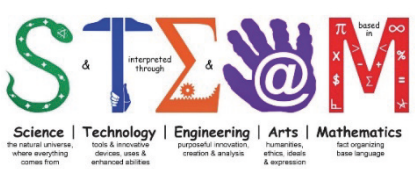


Figura 1. Competencias STEAM..

Las competencias clave europeas que se fomentan son: 1) comunicación en lengua materna, 2) comunicación en lengua extranjera, 5) aprender a aprender, 6) competencias cívicas y sociales, y 8) conciencia y expresión cultural. Y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Figura 2) que se trabajan

son el ODS 3, salud y bienestar, el ODS 4, educación de calidad, el ODS 12, producción y consumo responsable y el ODS 13, acción por el clima.



Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La formación del profesorado sobre estas problemáticas y el tratamiento de estos temas en las aulas escolares debe ser una prioridad, y su efectividad es tanto mayor cuando se realiza desde edades tempranas. De hecho, una sociedad mejor formada es también una sociedad más segura [4]. En la misma línea, la Organización de las Naciones Unidas [5] indica que la educación es una de las variables no estructurales más importantes a tener en cuenta para hacer frente a muchos desafíos y retos de la sociedad.

2. Materiales y métodos

2.1. Objetivos

Que los estudiantes de los centros educativos que participan en el proyecto Erasmus + *Domotic School Garden* financiado por la Unión Europea, proyecto (2020-1-ES01-KA201-082999), periodo 2020-2022, de Italia, Grecia y Bulgaria sean capaces de:

1.- Descubrir los productos vegetales típicos y autóctonos de la zona geográfica donde se encuentran los centros educativos.

2.- Experimentar con el olor, tacto y sabor de productos vegetales, frutas y hortalizas (Figura 3), reconociendo la importancia de los cinco sentidos y su vinculación con las emociones (sorpresa, repulsión, asombro, bueno, malo, gracioso).

3.- Diferenciar entre varios productos vegetales y reconocer sus características.

4. -Realizar un ejercicio de escritura de los distintos nombres de las frutas y verduras en lengua nativa e inglesa.

5.- Fortalecer la confianza en sus compañeros y trabajar en equipo (mediante juegos), fomentando la inclusión y el aprendizaje cooperativo.

Los materiales empleados en la actividad serán: productos hortofrutícolas, material vegetal y semillas, frutos secos, utensilios para pelar, cortar y preparar la fruta y verdura, material de escritura, platos y cubiertos biodegradables, vendas para los ojos, cámara y *tablets*.



Figura 3. Sentidos que se trabajan: olfato, gusto, tacto, vista.

2.2. Descripción de la actividad:

Las etapas de desarrollo de la actividad en los centros educativos y su temporización son las siguientes:

1.- Acopio de materiales, recolección de vegetales de la escuela DSG, y árboles del patio. Complementar con material que aportaran desde sus casas, frutas típicas del país y comentarios sobre sus características y propiedades (1 hora).

2.- Visita técnica grupal a almazaras, y centrales hortofrutícolas de la zona (conocer el producto y su manipulación y transformación (2 horas) (opcional).

3.- Preparación de las frutas y verduras para su análisis. Pelar, cortar y manipular las frutas y verduras. Conocer su textura, y olor. Probar su sabor. Explorar las diferencias a tenor de los sentidos (2 horas).

4.- Clasificar y categorizar los productos hortofrutícolas para la actividad (1 hora)

5.- Reconocer y escribir en lengua materna e inglés el nombre de cada fruta y verdura (1 hora). Escribir las indicaciones para dirección juego de rol en inglés (1 hora)

6.- Realizar la actividad de juego: "Robot y conductor". Se formarán dos grupos con los estudiantes de la clase, un grupo tendrá el rol de guía-conductor y otro el de robot. A continuación, se formarán parejas con un miembro de cada grupo. El robot tendrá los ojos vendados y seguirá las instrucciones que le dicte en inglés el conductor: seguir derecho, girar, caminar, parar, caminar hacia atrás, etc.. hasta que llegue al lugar donde están las frutas. El camino en el aula estará lleno de obstáculos, que tendrá que sortear con la ayuda de su compañero (3 horas).

Considerando que los docentes que participan en el proyecto en sus respectivos centros educativos: Escuela *St. Kliment Ohridski*, Escuela Primaria de *Mikro Evmoiro, Circolo Didattico San Giustino y Citerna,* conocen a su alumnado, y las dimensiones y las características de los centros, se

les indica que pueden adaptar la metodología y la temporización de las clases como consideren más oportuno, adaptando las sesiones para optimizar el resultado.

2.3. Acciones y proceso ejecución de la actividad

1.- Para trabajar el sentido del olfato y gusto:
Vendar los ojos del alumnado y presentarle un trozo de fruta, hortaliza o verdura (puede ser del huerto local), hacer que lo huelan y digan qué es. Después hacer que lo prueben y expresen de que se trata. Hacer esto con diferentes productos vegetales.

2.- Para trabajar el sentido del tacto:
Poner las frutas y productos hortícolas en una bolsa de papel o en una caja y hacer que la toquen sin verla, luego han de identificarla. Después sacarla de la bolsa y comprobar al verla si están en lo cierto o no. Es conveniente hacerlo con diversos productos vegetales.

3.- Para trabajar la confianza en el grupo (amigos) y el trabajo cooperativo. Confiar en los demás, escuchar la indicación de un compañero, seguir las indicaciones sin temor, sentir empatía. Al finalizar la actividad deberán expresar como se encuentran y si se han sentido cómodos con el juego.

2.4. Precauciones y dificultades de la actividad

- Considerar las posibles alergias que puedan presentar los alumnos bien sea al tacto o bien por la ingesta (contactar con tutores, profesores y familiares, pues algunos estudiantes si son pequeños pueden desconocer la información).

- Explicar bien el proceso antes de tapar los ojos puesto que algunas personas son muy sensibles a este hecho.

- Para los alumnos más pequeños o con dificultades poner frutas o verduras más conocidas y que les puedan resultar familiares.

- Atender a las medidas de seguridad y recomendaciones sanitarias o de los colegios o autoridades (Covid-19).

3. Resultados y discusión

3.1. Participación

La aceptación de la actividad ha sido muy positiva. El número total de estudiantes que han participado han sido: 40 en Grecia, 26 en Italia, y 15 en Bulgaria. De todos ellos se han presentado evidencias que se han adjuntando en el informe final del proyecto.

3.2. Criterios de evaluación de la actividad:

Evaluación cualitativa:

Se evalua el desempeño de la actividad por los estudiantes atendiendo a la participación, discusión y ejemplos sobre la vida real, lluvia de ideas, motivación expresa para aprender más sobre el tema, etc. Alimentación saludable, salud y bienestar, sensaciones positivas de la experiencia, biodiversidad.

Evaluación cuantitativa:

Se puntúa el número de respuestas correctas obtenidas (80% sobre el peso total de la actividad), corrección de las indicaciones marcadas cuando ejerce el papel de guía y robot (20%).

La evaluación contempla por tanto el desempeño en competencias sociales, trabajo cooperativo y la comunicación verbal y escrita en lengua materna e inglés.

3.3. Evidencias y resultados de la actividad

A continuación se muestran imágenes del proceso seguido en los colegio para el desarrollo de la actividad (Figuras 3 a 7).



Figura 3. Preparación actividad I (productos hortofrutícolas recolectados y preparados)

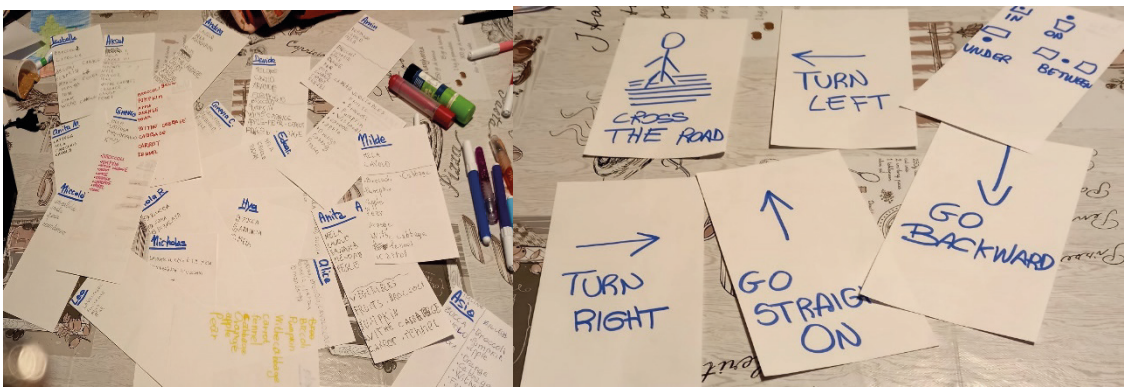


Figura 4. Preparación actividad II (indicaciones – movimiento en el aula)



Figura 5. Desarrollo actividad I (toma de contacto con los productos para su reconocimiento).



Figura 6. Desarrollo actividad II (lectura indicaciones y trabajo en equipos juego guía-robot).

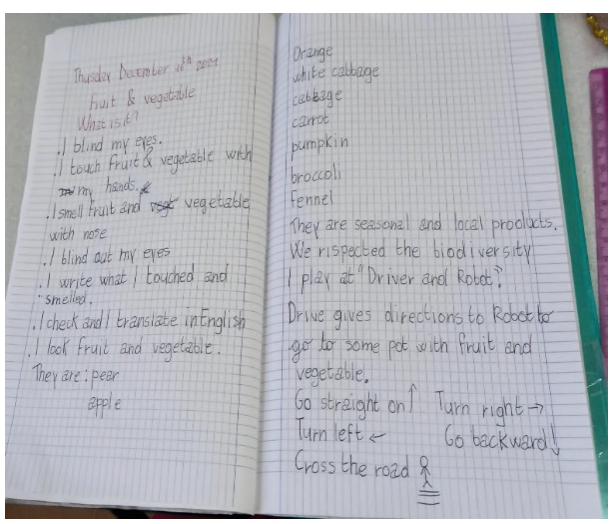


Figura 7. Anotaciones y pruebas de evaluación docentes.

4. Conclusiones

La actividad ha sido muy bien acogida en los colegios. Se ha desarrollado de acuerdo al objetivo previsto.

Los estudiantes han explorado y adquirido conocimientos y experiencia práctica en el reconocimiento de especies locales, frutas y verduras de temporada. Además, han valorado la importancia de los cinco sentidos en la percepción de los alimentos y consumo responsable. En los aspectos formativos, de relación e interactuación con otras personas, han reforzado el sentido de la cooperación, la confianza en el otro, la codificación de mensajes y el aprendizaje activo.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida por la Unión Europea al proyecto Erasmus +, 2020-1-ES01-KA201-082999.

Referencias

21. Melián A., Martínez-Arenes M.C., Pretel M.T., Ruiz A. Activities related to sustainability and circular economy within the framework of the Domotic School Garden Project En: Introduction of agromotics and ecological agricultre in primary education Domotic School Garden. Ed. Editorial TC Ediciones, Orihuela. Alicante, 2022, pp 26 – 34 (88 pp).
22. Karalar H., Sidekli S., Yıldırım B. STEM in Transition from Primary School to Middle School: Primary School Students' Attitudes. International Electronic Journal of Elementary Education, 2021, 13 (5), 687-697. Disponible en: https://creativecommons.org/ licenses/by/4.0/
23. Gértrudix F., Rivas B. Nuevas alfabetizaciones: la competencia científico-tecnológica en el ámbito educativo. Ed. Dykinson, Madrid, 2020.
24. IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013 and Climate Change 2014 (3 vols.). 2014. Disponible en: http://www.ipcc.ch.
25. ONU, Organización de las Naciones Unidas. Sustainable Development Goals. UNDP, Sustainable Development Agenda. 2015. Disponible en: https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/resources.html.

Análisis de los planes de estudios y de las materias de construcción impartidas en los grados habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola de las universidades españolas

J.M. Fuentes[1], E. Gallego[1], A.I. García[1], F. Ayuga[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agroforestal. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB). Universidad Politécnica de Madrid (España); jm.fuentes@upm.es

Abstract: Agricultural engineering studies have a long history in Spain dating back to 1855. Until the 2000s, the curricula to achieve the degree of Agricultural Engineer in the Spanish universities offered only minor differences between them. However, the degrees currently offered by Spanish universities as a result of the adaptation to the EHEA has given rise to a diversified list of designations and significant changes between curricula. This paper analyzes the degrees offered that allow the professional practice of Agricultural Technical Engineering in Spain, in compliance with the Order CIN/323/2009. The name of the studies, geographical distribution of the university centers, specializations offered and the configuration of the curriculum and the number of ECTS in courses concerning agricultural constructions and structural design in each case are analyzed, among some other issues.

Palabras clave: grados; ingeniería técnica agrícola; titulaciones; universidades españolas.

1. Introducción

La enseñanza de la ingeniería agrícola en España se remonta al año 1855, con la creación de la Escuela Central de Agricultura en la finca "La Flamenca" de Aranjuez, en la que se estableció un plan de estudios de 6 años realizado en régimen de internado y conducente a la titulación de ingeniero agrónomo [1]. Dicho sistema de escuela única perduró hasta 1875, en que la Diputación Foral de Navarra obtuvo autorización para crear la Escuela de Peritos Agrícolas y la apertura de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona en 1904, donde se otorgaban títulos de Ingeniero Agrícola posteriormente equiparados a los concedidos en las otras escuelas.

La Ley de Ordenación de las Enseñanzas Técnicas de 1957 estructuró las enseñanzas técnicas en dos niveles: grado superior y medio, pasando el último a denominarse posteriormente Ingeniería Técnica Agrícola, seguido de la especialidad cursada: Explotaciones Agropecuarias, Hortofruticultura y Jardinería, Industrias Agrarias o Mecanización y Construcciones Rurales, estableciéndose planes de estudios comunes para todas las universidades españolas. Dicho modelo ha mantenido su vigencia hasta épocas recientes. Sin embargo, en los últimos años, las universidades españolas se han visto inmersas en un proceso de reestructuración de la oferta docente con el objetivo de adaptar los estudios al Espacio Europeo de Educación Superior, utilizando como unidad de medida el ECTS (25-30 horas de trabajo del estudiante) e incorporando nuevos métodos de aprendizaje activo y sistemas de calidad para facilitar el reconocimiento internacional de los títulos [2].

De ese modo, a partir del curso académico 2010-2011 las distintas universidades españolas comenzaron a diseñar e impartir nuevas titulaciones de grado en sustitución de los antiguos títulos de Ingeniería Técnica Agrícola. Para garantizar la equivalencia de los títulos y la adquisición de las competencias necesarias, la Orden CIN/323/2009 [3] fijó los contenidos mínimos a adquirir por parte de los alumnos, así como la estructura general de los planes de estudios habilitantes para el ejercicio de la profesión regulada de Ingeniero Técnico Agrícola. La citada orden establece una duración mínima de los estudios de 240 ECTS y su estructura en un módulo de formación básica [mín. 60 ECTS], uno de formación común agrícola [mín. 60 ECTS], un tercer bloque de tecnología específica [mín. 48 ECTS] y un trabajo fin de grado [mín. 12 ECTS]. Sin embargo, la oferta de títulos surgida a raíz de esa norma es variada en cuanto a denominación de los títulos y contenidos incluidos en el plan de estudios.

En la presente comunicación se lleva a cabo un estudio comparativo de la oferta formativa en titulaciones de grado habilitantes para la profesión regulada de Ingeniero Técnico Agrícola que actualmente se imparten en las universidades españolas, al amparo de la Orden CIN/323/2009. Se analizan entre otras cuestiones, la denominación de los estudios, distribución geográfica de los centros, menciones o especialidades que se ofertan, estructura del plan de estudios y el número de créditos en materias relacionadas con la construcción y el cálculo de estructuras que se imparten en cada caso. La información ofrecida resulta de utilidad para el diseño de nuevas titulaciones o la readaptación de los *currícula* existentes.

2. Materiales y métodos

Para llevar a cabo este análisis se ha recopilado la información disponible en la página web del Registro de Universidades, Centros y Títulos (RUCT) del Ministerio de Universidades [4] correspondiente a la denominación oficial de los títulos, las menciones de cada uno de ellos, la fecha de inscripción del título en el registro y la distribución de créditos obligatorios y optativos en cada caso. Asimismo, se obtuvo el plan de estudio de cada título con el objetivo de analizar las asignaturas impartidas en cada caso, con especial atención a aquellas relacionadas con el área de construcción y cálculo de estructuras.

El listado de grados habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola que se ofertan en las universidades españolas está formado por las 36 titulaciones que se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Listado de grados habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola impartidos en universidades españolas en el curso 2022/2023.

Grado	Universidad	Fecha alta en RUCT
Ingeniería de las Explotaciones Agropecuarias	Universidad de Extremadura	30/10/2009
Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias	Universidad de Extremadura	30/10/2009
Ingeniería Hortofrutícola y Jardinería	Universidad de Extremadura	30/10/2009
Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural	Universidad de Córdoba	01/10/2010
Ingeniería Agrícola	Universidad de Huelva	01/10/2010
Ingeniería Agrícola y del Medio Rural	Universidad de La Laguna	01/10/2010
Ingeniería Agrícola	Universidad de La Rioja	01/10/2010
Ingeniería Agrícola	Universidad de Sevilla	01/10/2010
Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural	Universidad Pública de Navarra	01/10/2010
Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural	Universitat de les Illes Balears	01/10/2010
Ingeniería Agraria	Universidad de Vigo	12/11/2010
Ingeniería Agrícola	Universidad de Almería	17/12/2010
Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural	Universidad de Zaragoza	17/12/2010
Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural	Universidad Jaume I	17/12/2010
Ingeniería Agroalimentaria y Agroambiental	Universidad Miguel Hernández	17/12/2010
Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural	Universidad de Burgos	28/01/2011
Ingeniería Agrícola	Universidad de Salamanca	28/01/2011
Ingeniería Agrícola y del Medio Rural	Universidad de Valladolid	28/01/2011
Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias	Universidad de Valladolid	28/01/2011
Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural	Universitat Politècnica de València	11/02/2011
Ingeniería Alimentaria	Universidad Politécnica de Cataluña	22/07/2011
Ingeniería Agroalimentaria	Universitat de Girona	25/01/2013
Ingeniería Agraria y Alimentaria	Universitat de Lleida	25/01/2013
Ingeniería Agrícola y Agroalimentaria	Universidad de Castilla La Mancha	21/02/2014
Ingeniería Agraria y Energética	Universidad de Valladolid	21/02/2014
Ingeniería Agroalimentaria y de Sistemas Biológicos	Universidad Politécnica de Cartagena	18/07/2014
Ingeniería Agrícola y Agroalimentaria	Universidad de Santiago de Compostela	26/12/2014
Ingeniería Agraria	Universidad de León	20/02/2015
Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias	Universidad Europea del Atlántico	17/06/2016
Ingeniería Agroalimentaria	Universidad de Salamanca	19/01/2018
Ingeniería Agrícola	Universidad Politécnica de Madrid	19/01/2018
Ingeniería Alimentaria	Universidad Politécnica de Madrid	19/01/2018
Ingeniería de Bioprocesos Alimentarios	Universitat Rovira I Virgili	01/08/2018
Ingeniería Agrícola y Agroambiental	Universidad Pontificia de Comillas	05/10/2018
Ingeniería de Ciencias Agronómicas	Universitat Politècnica de Catalunya	28/06/2019
Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias	Universidad Católica de Ávila	18/10/2019

3. Resultados y discusión

3.1. Distribución geográfica, denominación de las titulaciones, menciones y sellos de calidad

La Figura 1 muestra la localización de los centros universitarios españoles en los que se imparten los 36 grados habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola. Como puede observarse, dichos centros están distribuidos por toda la geografía española y, únicamente, las comunidades autónomas de Asturias y País Vasco no disponen en la actualidad de algún centro en el que se impartan estos estudios.



Figura 1. Localización de los centros universitarios españoles en los que se imparten titulaciones de grado habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola

Por su parte, la denominación de las titulaciones es variable, registrándose 17 designaciones diferentes. "Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural" (19% de los casos), "Ingeniería Agrícola" (17% casos) e "Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias" (11% de los casos) son las opciones más repetidas (Figura 2).

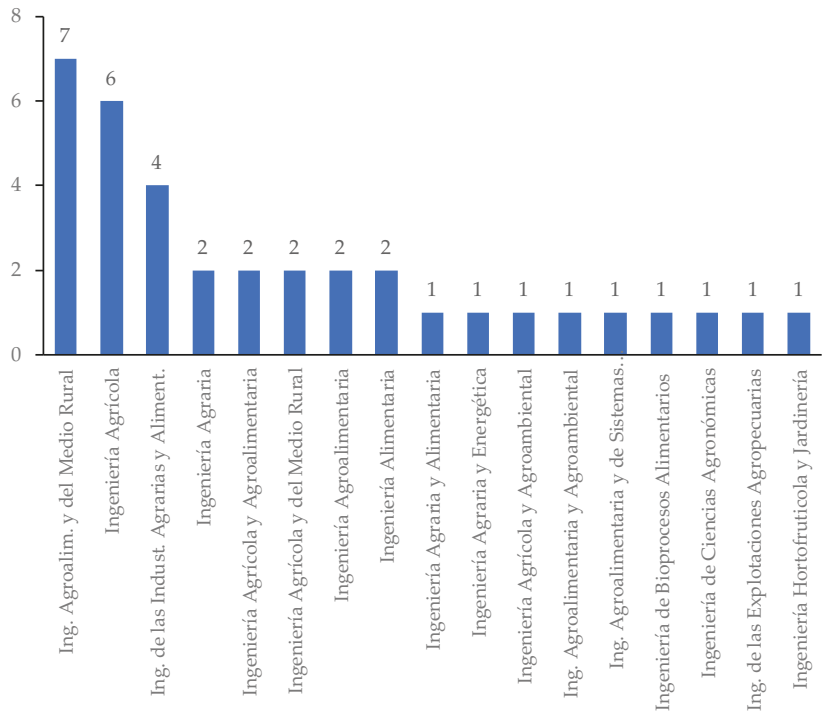


Figura 2. Denominación de las titulaciones de grado habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola

De los 4 campos de especialización o menciones (Explotaciones Agropecuarias; Industrias Agrarias y Alimentarias; Hortofruticultura y Jardinería; Mecanización y Construcciones Rurales)

a los que puede dar lugar el título de acuerdo con la orden CIN/323/2009, la mención en Industrias Agrarias y Alimentarias se oferta en 23 de las 29 universidades que ofrecen titulaciones de grado habilitantes (79,3%), mientras que la mención en Mecanización y Construcciones Agrarias tan sólo se oferta en 12 universidades (41,6%). Como puede observarse en la Figura 2, el 31% de las universidades ofertan las 4 menciones posibles del título y un 79,3% ofertan como mínimo 2 menciones. Por su parte, un 20,7% de las universidades tan solo ofrece una de las cuatro menciones posibles.

Tabla 2. Universidades españolas que ofertan las distintas menciones del grado

Mención del grado		Universidades que la ofertan
Explotaciones Agropecuarias	19	COMILLAS; UAL; UCLM; UCO; UdG; UdL; UHU; UMH; UNEX; UNILEON; UNIZAR; UPC; UPM; UPNA; UPV; US; USAL; USC; UVA
Industrias Agrarias y Alimentarias	23	UAL; UBU; UCAV; UCLM UCO; UdG; UdL; UEA; UMH; UNEX; UNILEON; UNIRIOJA; UNIZAR; UPC; UPCT; UPM; UPNA; UPV; URV; USAL; USC; UVA; UVIGO
Hortofruticultura y Jardinería	20	UAL; UCO; UdL; UHU UIB; UJI; ULL; UMH; UNEX; UNILEON; UNIRIOJA; UNIZAR; UPC; UPCT; UPM; UPNA; UPV; US; USC; UVIGO
Mecanización y Construcciones Rurales	12	UAL; UCO; UdL; UIB ULL; UMH; UNILEON; UPM; UPNA; UPV; USC; UVA

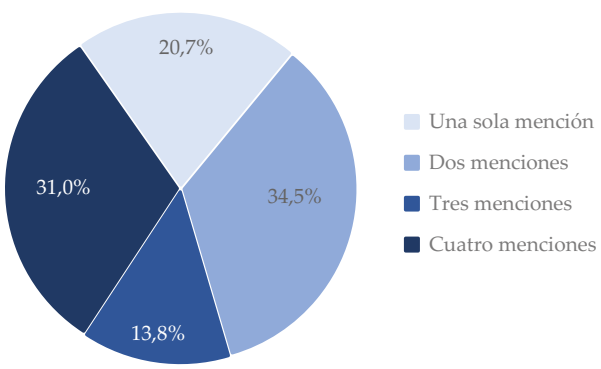


Figura 2. Especialidades o menciones que ofertan las universidades españolas con titulaciones de grado habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola

De las 29 universidades que ofertan títulos de grado habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola, 8 ofrecen la posibilidad de realizar algún doble grado que incluya dicha titulación, lo que supone un 28% del total. En la Tabla 3 se detallan las dobles titulaciones ofertadas con su carga docente, que oscila entre 297 y 378 ECTS.

Tabla 3. Oferta de dobles grados que incluyen alguna titulación habilitante para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola en las universidades españolas

Universidad	Dobles grados

Universidad de Burgos	Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural + Ingeniería de Organización Industrial (378 ECTS)
Universidad de Córdoba	Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural + Ingeniería Forestal (315 ECTS) Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural + Enología (322 ECTS)
Universidad de La Rioja	Ingeniería Agrícola + Enología (331,5 ECTS)
Universidad de Santiago de Compostela	Ingeniería Agrícola + Ingeniería Forestal y del Medio Natural (339 ECTS)
Universidad de Sevilla	Ingeniería Agrícola + Ciencias Ambientales (348 ECTS)
Universidad de Valladolid	Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias + Enología (312 ECTS) Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias + Ingeniería Agrícola y del Medio Rural (297 ECTS) Ingeniería Agrícola y del Medio Rural + Ingeniería Forestal y del Medio Natural (321 ECTS)
Universidad Pública de Navarra	Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural + Innovación de Procesos y Productos Alimentarios (324 ETCS)
Universitat Politècnica de València	Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural + Ciencia y Tecnología de los Alimentos (343,5 ECTS) Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural + Biotecnología (351 ECTS)

El 31% de las titulaciones dispone del sello de acreditación internacional EUR-ACE, otorgado por la agencia Red Europea para la Acreditación de la Educación en Ingeniería (ENAEE) en colaboración con la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación (ANECA). Dicho sello de calidad garantiza que los programas de estudios, profesorado, instalaciones y salidas profesionales cumplen con los estándares de calidad y con la adecuación a las necesidades de los sectores profesionales estipuladas por la ENAEE. Tan sólo 2 titulaciones disponen de la acreditación ABET (Tabla 4).

Tabla 4. Listado de grados habilitante para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola impartidos en las universidades españolas con acreditaciones EUR-ACE y ABET [5].

Grados con acreditación EUR-ACE	**Grados con acreditación ABET**

Grado en Ingeniería Agrícola (UAL) Grado en Ingeniería Agrícola (US) Grado en Ingeniería Agrícola (UPM) Grado en Ingeniería Agrícola y Agroalimentaria (USC) Grado en Ingeniería Agroalimentaria y de Sistemas Biológicos (UPCT) Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural (UPNA) Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural (UCO) Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural (UPV) Grado en Ingeniería Alimentaria (UPM) Grado en Ingeniería de las Explotaciones Agropecuarias (UNEX) Grado en Ingeniería Hortofrutícola y Jardinería (UNEX)	Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural (UPV) Grado en Ingeniería Alimentaria (UPM)

3.2. Estructura del plan de estudios

En la tabla 5 se muestra el número medio, mínimo y máximo de ECTS correspondientes a cada uno de los bloques de materias (básicas, obligatorias comunes a la rama agrícola, obligatorias de tecnología específica, optativas, prácticas externas obligatorias y trabajo fin de grado) que conforman el plan de estudios de los grados.

En la mayoría de los planes de estudios las asignaturas obligatorias suponen una carga docente en torno al 90%, quedando limitada la optatividad a valores comprendidos entre 12 y 30 ECTS. Un 41,6 % de los grados incluyen prácticas obligatorias en su plan de estudios, mientras el resto las contemplan como créditos optativos. La mayoría las titulaciones ha optado por asignar una carga docente de 12 ECTS al Trabajo Fin de Grado y tan solo un 11,1% de ellas le asigna una carga docente superior (entre 15 y 18 ECTS).

Tabla 5. Distribución por bloques de los ECTS que constituyen el plan de estudios.

Materias	ECTS	% sobre total
Básicas	63,4 [60-72]	26,4% [25-30%]
Comunes a la rama Agrícola (Obligatorias)	66,2 [60-85]	27,6% [25-35%]
De Tecnología Específica (Obligatorias)	67,5 [48-96]	28,1% [20-40%]
Otras materias obligatorias	15,9 [6-42]	1,8% [0-18%]
Optativas	23,3 [6-60]	9,7% [3-25%]
Prácticas Externas	2,8 [0-12]	1,1% [0-5%]
Trabajo Fin de Grado	12,6 [12-18]	5,2% [5-8%]

3.3. Número de créditos en materias de construcción y cálculo de estructuras

En la tabla 6 se muestra el número de créditos en asignatura relacionadas con la construcción y el cálculo de estructuras que de forma obligatoria cursan los alumnos en los diferentes grados habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola que se imparten en las universidades españolas.

Tabla 6. Créditos en materias de construcción y cálculo de estructuras de los grados habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola

Grado	Mención			
	E.A.	I.A.A.	H.J.	M.C
Grado en Ingeniería de las Explotaciones Agropecuarias [UNEX]	8			
Grado en Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias [UNEX]		10		
Grado en Ingeniería Hortofrutícola y Jardinería [UNEX]			7,6	
Grado en Ingeniería Alimentaria [UPC]		6		
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural [UPNA]	6	9	6	15
Grado en Ingeniería Agroalimentaria [UdG]	9	6		
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y Agroambiental [UMH]	9	15	9	24
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural [UPV]	12	12	12	12
Grado en Ingeniería Agrícola [UAL]	6	12	6	19,5
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural [UBU]		15		
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural [UCO]	7,5	10,5	6,5	22,5
Grado en Ingeniería Agrícola [UHU]	13		13	
Grado en Ingeniería Agrícola y del Medio Rural [ULL]			4	12
Grado en Ingeniería Agrícola [UNIRIOJA]		12,5	13,5	
Grado en Ingeniería Agraria [UVIGO]		12	12	
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural [UJI]			6	
Grado en Ingeniería Agrícola [USAL]	7,5			
Grado en Ingeniería Agrícola [US]	6		6	
Grado en Ingeniería Agrícola y del Medio Rural [UVA]	9			12
Grado en Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias [UVA]		12		
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural [UNIZAR]	12	12	12	
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural [UIB]			6	24
Grado en Ingeniería Agraria y Alimentaria [UdL]	8	9	9	24
Grado en Ingeniería Agrícola y Agroalimentaria [UCLM]	10,5	16,5		
Grado en Ingeniería Agroalimentaria y de Sistemas Biológicos [UPCT]		12	7,5	
Grado en Ingeniería Agraria y Energética [UVA]	8			
Grado en Ingeniería Agraria [UNILEON]	28,5	14	16,5	28,5
Grado en Ingeniería Agrícola y Agroalimentaria [USC]	13	16,5	12,5	20
Grado en Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias [UEA]		12		
Grado en Ingeniería Agrícola [UPM]	11		8	17
Grado en Ingeniería Alimentaria [UPM]		17		
Grado en Ingeniería Agroalimentaria [USAL]		11		
Grado en Ingeniería de Bioprocesos Alimentarios [URV]		9		
Graduado en Ingeniería de Ciencias Agronómicas [UPC]	6		6	
Grado en Ingeniería Agrícola y Agroambiental [COMILLAS]	12,5			
Grado en Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias [UCAV]		10		

El número medio de créditos obligatorios correspondiente a asignaturas de construcción y cálculo de estructuras que se imparten en los grados habilitantes es de 11,5 ECTS, con variaciones comprendidas entre 4 y 28 ECTS. En general, las menciones en 'Mecanización y Construcciones Rurales' y en 'Industrias Agrarias y Alimentarias' son las que presentan un número de ECTS mayor, mientras que las menciones en 'Explotaciones Agropecuarias' y 'Hortofruticultura y Jardinería' ofertan un menor número de créditos.

Tabla 7. Número medio de créditos obligatorios en materias de construcción y cálculo de estructuras de los grados habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola, según menciones

Mención	Núm. de créditos
Explotaciones Agropecuarias	10,1 [6-28,5 ECTS]
Industrias Agrarias y Alimentarias	11,8 [6-17 ECTS]
Hortofruticultura y Jardinería	9 [4-16,5 ECTS]
Mecanización y Construcciones Rurales	19,2 [12-28,5 ECTS]

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha llevado a cabo un análisis de la oferta formativa en titulaciones de grado habilitantes para la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola que se imparten en las universidades españolas. Las principales conclusiones derivadas de este estudio son las siguientes:

- El número de grados asciende a 36, impartidos en 29 universidades distribuidas a lo ancho de la geografía española.
- La denominación de las titulaciones es variable, con 17 designaciones diferentes, siendo "Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural", "Ingeniería Agrícola" e "Ingeniería de las Industrias Agrarias y Alimentarias" las opciones más repetidas.
- La mención en Industrias Agrarias y Alimentarias es la más ofertada y la mención en Mecanización y Construcciones Agrarias la menos frecuente. El 31% de las universidades ofertan las 4 menciones posibles del título y un 20,7% tan solo ofrece una de ellas.
- En la mayoría de los planes de estudios la optatividad se limita a valores comprendidos entre 12 y 30 ECTS (entre el 5 y el 12,5% de la totalidad de ECTS del plan de estudios). Un 41,6 % de los grados incluyen prácticas obligatorias en su plan de estudios, mientras el resto las contemplan como créditos optativos.
- El número medio de créditos obligatorios correspondiente a asignaturas del área de construcción y cálculo de estructuras impartidos en los grados es de 11,5 ECTS, con variaciones comprendidas entre 4 y 28,5 ECTS.

Referencias

26. Lacruz M. La Escuela Central de Agricultura de Aranjuez (1855-1868). Historia de la Educación. 2013, 12, 341–364.
27. Ayuga F., Fuentes J.M., Ramírez, A, García A.I., Aguado P. A comparative analysis of ABE Bachelor of Science programs in European and US Universities. En: Proceedings of the 2013 ASABE Annual International Meeting. 2013, Kansas City, Missouri, USA.
28. Ministerio de Ciencia e Innovación. Orden CIN/323/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Agrícola. 2009. BOE núm. 43, de 19 de febrero de 2009, 17719-17723.
29. Ministerio de Universidades. Registro de Universidades, Centros y Títulos (RUCT). https://www.educacion.gob.es/ruct/consultaestudios.action?actual=estudios. Última fecha de acceso: 24/04/2023.

ANECA. Listado de títulos con el sello EUR-ACE (actualizado a 01/12/2022). Disponible en: https://www.aneca.es/documents/20123/60561/Listado+Titulos+con+sello+EUR-ACE.pdf



Experiencia de aprendizaje en el Domotic School Garden (ERASMUS+K2). Bancos de semillas

M.T. Pretel[1], M.C. Martínez-Arenes[2], A. Melián[1], E. Kafetzi[3], M. Mathiantoni[3], K. Kantardzhieva[4], G. Markova[4], M. Koycheva[4], E. Boncompagni[5] and A. Ruiz[1]

[1] EPSO, Universidad Miguel Hernández, Ctra. Beniel km. 3.2, 03312.
[2] Departamento Agraria, Instituto de Educación Secundaria "El Palmeral" Avd. Doctor García Rogel, 28, 03300 Orihuela
[3] Primary School of Mikro Evmoiro, Xanthi, Greece, ekafetzi@sch.gr, mathiantonikse@gmail.com
[4] Innovative School St Kliment Ohridski, 12 A.Ivanov Str., Chirpan 6200, Bulgaria, discovery.mlc@gmail.com
[5] Direzione Didattica "Francesca Turrini – Bufalini" San Giustino, Citerna (Perugia – Italia), Via De Amicis, 06016, elisaboncompagni13@gmail.com

Abstract: The Erasmus+ Domotic School Garden (DSG) project (2020-1-ES01-KA201-082999), within which the learning experience with seed banks was carried out, consisted of the domotization of an ecological school garden, developing the skills of the student body in STEAM (Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics), linguistic competence (English), and integrating transversal values. This paper shows the proposal of the professors of the Miguel Hernández University on the activity "Seed Banks", and the results of the development of the activity in the different Educational Centers St. Kliment Ohridski School in Bulgaria, The Primary School of Mikro Evmoiro in Greece and Circolo Didattico San Giustino e Citerna in Italy. This learning experience has allowed teachers and students to work with an active and participatory methodology in a natural environment, encouraging the development of European skills (STEAM).

Palabras clave: Enseñanza primaria, agroecología, ODS, CTIMA, STEAM

1. Introducción

El proyecto DOMOTIC SCHOOL GARDEN (DSG) surgió a partir de la convocatoria del Diario Oficial de la Unión Europea (CONVOCATORIA DE PROPUESTAS 2020 — EAC/A02/2019 Programa Erasmus+, 2019/C 373/06). Las instituciones que formaron parte de este proyecto fueron la Universidad Miguel Hernández, la Escuela St. Kliment Ohridski en Bulgaria, una escuela primaria en el municipio rural de Chirpan, en el centro-sur de Bulgaria, en el que estudian un centenar de alumnos de entre 5 y 11 años; la Escuela Primaria de Mikro Evmoiro, situada en una zona rural cerca de la ciudad de Xanthi, con 124 alumnos, que vienen de 4 pueblos diferentes para asistir a la escuela; y el Circolo Didattico San Giustino e Citerna en Italia, compuesto por tres guarderías y cuatro escuelas primarias con unos 470 niños en total.

En el enfoque educativo CTIMA se integran los campos de la Ciencia, la Tecnología, la Ingeniería, las Matemáticas y las Artes con las competencias de la vida diaria. Este enfoque proporciona a las personas las habilidades y competencias necesarias para el mundo empresarial del siglo XXI, por lo que se recomienda integrar la educación CTIMA desde edades tempranas [1]. Si bien la definición de esas competencias no ha cambiado mucho a lo largo de los años, el apoyo al desarrollo de competencias en CTIMA se vuelve cada vez más relevante [2]. El proyecto DSG consiste en la automatización de un jardín escolar ecológico, desarrollando las habilidades del alumnado en CTIMA, competencia lingüística (inglés), e integrando valores transversales. El desarrollo de estas habilidades requiere que los conocimientos teóricos adquiridos en las clases sean puestos en práctica, en un ambiente donde el aprendizaje se desarrolle de forma natural y práctica, y donde el alumnado participe en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Dentro de las prioridades horizontales, el Proyecto busca que los alumnos comprendan de forma práctica cómo funcionan los sistemas naturales en un entorno como la huerta, y cómo se ven afectados por los

ecosistemas que se generan a su alrededor y por el clima, y su importancia en el mantenimiento de la vida en el planeta. También se analizan los riesgos derivados del cambio climático como amenaza global, que se pueden visibilizar directamente desde la gestión del huerto escolar. Según investigaciones internacionales, los estudiantes necesitan aprender sobre la ciencia y la forma de pensar científica en todos los niveles educativos, independientemente de los estudios y la profesión que vayan a ejercer [3,4]. Carlone y Johnson (2013) [5] encontraron que cuando los estudiantes tienen experiencias científicas positivas en la escuela, desarrollan sus habilidades y confianza en sí mismos, lo que contribuye a sus futuras aspiraciones en carreras científicas. Los maestros de primaria juegan un papel crucial en motivarlos a participar activamente en la ciencia [3].

Los objetivos principales que se establecieron en el DSG fueron, mejorar la motivación hacia el aprendizaje y las competencias CTIMA del profesorado y del alumnado, especialmente a las niñas; desarrollar en el alumnado el sentimiento europeo e intercambiar experiencias entre instituciones; difundir los resultados intelectuales creados y los resultados obtenidos por el Proyecto; desarrollar una mayor conciencia ambiental, especialmente hacia el cambio climático; desarrollar la inclusión social educativa; desarrollar las competencias lingüísticas (inglés), aprender a aprender y fomentar la conciencia y las expresiones culturales. Para ello, durante el desarrollo del proyecto, se les enviaban periódicamente actividades explicadas paso a paso, con todo el material necesario para que los profesores la pudieran llevar a cabo en sus respectivos colegios, con fotografías, videos, etc.

En este trabajo se muestra la experiencia de aprendizaje "Bancos de semillas", una de las primeras actividades que se propusieron para conseguir los objetivos mencionados. La propuesta de la Universidad Miguel Hernández comenzó por una introducción en la que se explicó la definición y la importancia de los bancos de germoplasma para la agricultura. Se explicó la base científica de la viabilidad de las semillas para germinar y un procedimiento correcto y sencillo para su conservación, de forma muy detallada, adaptado al nivel de los estudiantes. Posteriormente, cada Centro Educativo, con la propuesta de la UMH, llevó a cabo esta actividad incluyendo sus propias iniciativas.

2. Materiales y métodos

Se elaboró un cuestionario para los responsables del DSG en los colegios, con preguntas muy sencillas y fáciles de responder, con el fin de conocer el punto de partida de cada centro educativo para conocer la disposición espacial y material inventariable del centro educativo, la configuración del equipo responsable para llevar a cabo el Proyecto, los conocimientos previos de producción ecológica, la importancia económica y social del sector agroganadero, de la zona, y los aspectos técnicos relacionados con el manejo de estaciones meteorológicas. Los resultados del cuestionario nos permitieron conocer mejor los medios materiales y humanos de los que disponía cada colegio. Con los datos obtenidos de los tres centros, decidimos modificar algunas actividades inicialmente previstas en el Proyecto, ya que no se podrían desarrollar. Una de estas actividades fue "Elaboración de un banco de semillas".

La estructura de la actividad incluía los siguientes puntos 1.- Duración y destinatarios de la actividad, 2.- Objetivos conceptuales de esta actividad, 3.- Competencias clave Europeas, 4.- Competencias CTIMA, 5.- Descripción y fundamento de la actividad, 6.- Material necesario, 7.- Procedimiento de la actividad, 8.- Algunas ideas para desarrollar con alumnos de distintos niveles, 9.- Dificultades de esta actividad, 10.- La metodología de evaluación y 11.- Debes tener en cuenta.

Cada Centro Educativo que llevó a cabo la actividad, informó de su desarrollo, incluyendo sus propias iniciativas. Los colegios informaron sobre, las edades, el curso y el número de estudiantes que realizaron la actividad, el lugar donde se desarrolló, los objetivos y la descripción

de la actividad. Así mismo, indicaron las competencias claves europeas se habían trabajado durante el desarrollo de la actividad: comunicación en lengua materna, comunicación en lengua extranjera, competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología, competencia digital, aprender a aprender, competencia social y ciudadana, sentido de iniciativa y emprendimiento y conciencia y expresión cultural. También informaron sobre las competencias CTIMA y los ODS que se habían trabajado durante el desarrollo de la actividad. Los profesores responsables de los Centros Educativos indicaron también los materiales usados, y links a las carpetas con fotografías, videos y otros materiales generados.

3. Resultados y discusión

3.1. Propuesta de la Universidad Miguel Hernández (UMH)

Esta actividad se diseñó para desarrollarla de forma continua en los colegios. En el desarrollo de esta actividad, elaboración y mantenimiento, pueden participar todos los estudiantes, profesores, padres de estudiantes y otro personal interesado. Se puede desarrollar en el campo, en el aula y/o en un laboratorio. El material necesario es muy asequible y fácil de conseguir para todos. Se recomendó el siguiente material: frigorífico doméstico, recipientes herméticos, gel de sílice, etiquetas. Además, se recomendó abrir una carpeta en un ordenador para esta actividad "Banco de semillas", y dentro de esta carpeta, abrir subcarpetas con cada número de identificación de semilla. De esta manera, para cada nº de identificación de semilla se tendrá un lugar para incluir fotografías, recetas tradicionales, datos de siembra, cultivo y todos los datos que se puedan obtener.

El procedimiento propuesto por la UMH fue el siguiente (Figura 1): 1.- Obtención de las semillas. Para ello se pueden comprar en semilleros cercanos u obtener nuestras propias semillas (recomendado) de una forma muy sencilla. 2.- Cortar la fruta madura. 3.- Extraer las semillas. 4.- Secar muy bien con papel absorbente las semillas. Otra forma para obtener semillas es mediante la cesión de agricultores de la zona o en mercados locales. En este caso, se beben obtener todos los datos que el agricultor pueda apartar, fecha se siembra, necesidades de riego, de cultivo, fecha de recolección, parte que se consume, recetas tradicionales, etc. Es muy recomendable que cada vez que finalice un cultivo en el DSG, los estudiantes vuelvan a obtener sus propias semillas y las guarden en el banco de semillas para su uso en el siguiente curso escolar. Así los estudiantes observarán el ciclo completo de una planta (sembrarán una semilla y obtendrán una planta con frutos que contienen semillas). 5.- Una vez que se tengan las semillas, se vuelven a limpiar y se comprueba que estén bien secas. 6-. A continuación, se introducen en recipientes herméticos que contengan gel de sílice o arroz y se guardan en un frigorífico doméstico. En el recipiente se debe incluir una etiqueta con todos los datos necesarios para su identificación. 7.- Paralelamente se abrirá una carpeta en el ordenador con archivos que recojan toda la información que se considere de interés. Los códigos identificativos deben estar claros y ser idénticos en las carpetas, archivos y recipiente con semillas. Se deben recoger en dichos archivos todos los datos posibles: época de siembra, necesidades de riego, época de floración, época de fructificación, recetas tradicionales, etc. 8.- Periódicamente (cada mes aproximadamente) se vigila el gel de sílice. Cuando la tonalidad vire a azul (su color deshidratado es transparente o naranja) debe cambiarse ya que se habrá reducido su capacidad de retener la humedad. Cuando se inicie el nuevo curso académico, se puede hacer un semillero con parte de las semillas que se han guardado en el banco.

Las recomendaciones que se hicieron desde la UMH sobre esta actividad fueron que los más pequeños pueden colaborar en el diseño de etiquetas (en forma de hoja, de flor, etc. siempre que lleven la información necesaria), también pueden ayudar empaquetando semillas, haciendo fotografías y ayudando a encontrar semillas de cultivos tradicionales con ayuda de sus familiares. Los alumnos de mayor nivel y otros colaboradores interesados pueden llevar a cabo todo el

proceso guiados por el profesor o profesores. La única dificultad de esta actividad es que la semilla esté bien seca para que no germine ni se contamine, y en realizar un buen etiquetado. El mantenimiento del gel de sílice en perfectas condiciones es un factor clave. En el caso de que las semillas se obtengan por cesión de agricultores, es conveniente que se solicite al agricultor toda la información que pueda aportar, tanto del cultivo como del consumo.



Figura 1. Procedimiento para obtener semillas de un fruto maduro, secarlas y conservarlas en un banco de germoplasma.

3.2. Desarrollo de la actividad en los colegios: Burgaria, Grecia, Italia

En Grecia, esta actividad la llevaron a cabo 36 estudiantes de entre 7 y 11 años, dedicando 14 horas aproximadamente. Mayoritariamente la llevaron a cabo en el huerto. Durante la primera semana de septiembre, los estudiantes buscaron en Internet información y videos sobre la recolección de semillas y los bancos de semillas. Los profesores explicaron la importancia de la diversidad de los cultivos en el mundo y visitaron los jardines del pueblo y preguntaron a los abuelos sobre los antiguos métodos tradicionales de recolección. Además, se invitó a un agricultor orgánico a la escuela primaria de Mikro Evmoiro que también explicó las condiciones en las que se almacenan las diferentes semillas de las variedades valiosas. Finalmente, los estudiantes descubrieron algunas soluciones para ayudar a preservar la diversidad y entendieron la importancia del banco de semillas y su relación con el futuro de la vida de las próximas generaciones.

Los estudiantes mayores compartieron sus conocimientos con los estudiantes más jóvenes. Les explicaron la importancia de la conservación de semillas y qué objetos de valor se pueden guardar en una caja fuerte o en un banco. Los estudiantes mayores eligieron varios frutos maduros de los que obtuvieron semillas, se las mostraron a los más jóvenes y almacenaron todas las semillas juntas en un banco. También encontraron semillas de cultivos tradicionales con la ayuda de sus familiares y agricultores (Figura 2). Los estudiantes más jóvenes ayudaron en el diseño de etiquetas y tarjetas para las semillas y también ayudaron a empacar semillas y tomar fotos. Durante el taller, los estudiantes y profesores crearon un banco de 70 semillas diferentes, organizadas en recipientes de plástico. Para evitar la humedad en los recipientes y la formación

de moho, colocaron un pequeño paquete de arroz en una gasa para que actuó como desecante y preservó a las semillas del exceso de humedad.

Las preguntas más frecuentes que surgieron durante la discusión fueron: ¿En qué ocasiones los bancos de semillas pueden salvar a la población? ¿Qué es la biodiversidad? Cuáles son las consecuencias del cambio climático y cómo podemos prevenirlo.



Figura 2. Desarrollo de la actividad en la Escuela Primaria de Mikro Evmoiro, Grecia.

En Bulgaria, los estudiantes que participaron activamente en esta actividad fueron entre 20 y 22, con edades comprendidas entre 7 y 11 años. En primer lugar, se organizó una conferencia, junto con una observación de campo llevada a cabo por el Instituto de Cultivos de Campo de Bulgaria, un Centro de Investigación, donde se cultivan y conservan diversas variedades de trigo francesas, italianas, mexicanas entre otras. El 26 de mayo de 2021, los jóvenes investigadores de la Escuela Primaria Kliment Ohridski fueron recibidos por el Profesor Asistente Dr. Rangel Dragov y el Profesor Asistente Jefe Dr. Krasimira Taneva. Los investigadores explicaron a los niños cómo se crean los bancos de semillas, cuál es la importancia de la diversidad genética vegetal, cómo se puede utilizar la ingeniería para mejorar la información genética de los cultivos más comunes. Los expertos del Instituto de Investigación también explicaron las condiciones de almacenamiento de las diferentes semillas: temperatura, humedad, recipientes. Los alumnos vieron cómo, gracias al progreso científico, se pueden mejorar los rasgos útiles en los cultivos. Los científicos explicaron a los estudiantes cómo aumentan la tolerancia a la sequía de los cultivos, la resistencia a las heladas, mejoran su contenido nutricional y la resistencia a enfermedades y plagas. El Dr. Dragov le dio a cada estudiante un grano de trigo duro y explicó

la estructura del grano y la aplicación del cultivo. Observaron cómo se realizaba la polinización en la práctica. Los expertos del Instituto explicaron las condiciones en que se almacenan las distintas semillas de las variedades valiosas.

En segundo lugar, se llevó a cabo un taller en la Escuela para la creación de un Banco Escolar de Semillas. El profesor preguntó a los estudiantes el propósito de una caja fuerte o un banco, asociando el concento a los bancos de semillas, con los objetos de valor se pueden guardar en una caja fuerte o en un banco. Los profesores realizaron una "lluvia de ideas" entre los estudiantes sobre cómo se pueden almacenar las semillas en casa. Los estudiantes compartieron sus observaciones sobre cómo sus padres y abuelos recolectan y almacenan semillas. El profesor utilizó la información básica que los estudiantes le aportaron para explicar algunos de los métodos de almacenamiento a largo plazo. Los estudiantes participaron en una lluvia de ideas sobre especies y variedades valiosas de plantas y cultivos de la región local que se deben preservarse para las generaciones futuras. A continuación, se comenzó a desarrollar un banco de semillas en la Escuela. Los estudiantes y profesores identificaron diversas plantas (flores, árboles, hierbas, cultivos, vegetales) de las cuales recolectaron semillas y las almacenan en un banco. El Instituto de Investigación, los padres, las familias y los agricultores locales donaron semillas para el Banco del DSG. Otras semillas se compraron en el Centro Agrícola Local. Durante el taller, alumnos y los profesores del centro crearon un banco de 20 semillas diferentes, organizadas en recipientes de plástico (Figura 3). Los estudiantes colocaron un pequeño paquete de arroz en una gasa para que actúe como desecante y proteja las semillas del exceso de humedad. Adicionalmente a esta actividad, los estudiantes de Bulgaria llevaron a cabo un ejercicio de germinación. Los estudiantes probaron el grado de germinación de algunas semillas que fueron almacenadas en diferentes tiempos.

En general, en la actividad "Baco de semillas", los estudiantes de los tres Centros Educativos trabajaron las siguientes competencias clave europeas: comunicación en lengua materna y extranjera, la competencia matemática y las competencias básicas en ciencia y tecnología, la competencia digital, aprender a aprender, competencia social y ciudadana, el sentido de iniciativa y emprendimiento y la conciencia y expresión cultural.

Asimismo, se trabajaron las siguientes competencias CTIMA y ODS: sensibilizar sobre las consecuencias negativas del cambio climático y el calentamiento global, enseñar a los niños la importancia de la biodiversidad para el desarrollo sostenible de la agricultura y la economía, el papel de la ciencia y la innovación - Mayor conocimiento y competencias en la conservación de semillas y mejora genética de rasgos valiosos, sensibilizar sobre el papel vital de la tecnología, la innovación y la ingeniería en la agricultura actual, el papel de los bancos de semillas y nuevas variedades para brindar soluciones en tiempos de desastre, protegiendo el suministro de alimentos para las generaciones futuras, el valor de los tipos de vegetales y cultivos cultivados localmente. Fomentando la agricultura ecológica, las tradiciones de nuestros abuelos, preservando sus saberes agrícolas y protegiendo los cultivos con trascendencia local.



Figura 3. Desarrollo de la actividad en la Escuela St. Kliment Ohridski, Bulgaria.

En Italia, los niños llevaron a cabo una actividad de germinación. Prepararon semillas en semilleros con tierra y les aportaron agua. Los profesores de este colegio optaron por llevar a cabo la actividad de germinación, explicando a los estudiantes otra forma de preservar las semillas mediante la reproducción en los huertos, sembraron semillas de hortalizas de temporada como acelga y rábano (Figura 4).



Figura 4. Desarrollo de la actividad en el Circolo Didattico San Giustino e Citerna, Italia.

4. Conclusiones

En este trabajo se muestra un modelo de trabajo efectivo para desarrollar herramientas que permitan a los profesores de los Centros Educativos realizar proyectos científicos alrededor del manejo de un huerto ecológico escolar domotizado (DSG). La actividad "Banco de semillas" que se presenta en este trabajo es un ejemplo que facilita al alumnado su interacción y comprensión del medio ambiente. El trabajo llevado a cabo por los tres Centros Educativos socios del proyecto DSG (Escuela St. Kliment Ohridski en Bulgaria, Escuela Primaria de Mikro Evmoiro en Grecia y Circolo Didattico San Giustino e Citerna en Italia), y concretamente el que se ha llevado a cabo con la elaboración de un banco de semillas, permite trabajar a los estudiantes y a los profesores a través de una metodología activa y participativa, que invita a la investigación-acción en un entorno natural. En todos los Centros Educativos socios del Proyecto en el que se ha llevado a cabo esta actividad se motiva al alumnado para conseguir mejores competencias europeas (STEAM).

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Unión Europea la financiación del Proyecto Erasmus+ Domotic School Garden (DSG) (2020-1-ES01-KA201-082999).

Referencias

30. Karalar, H., Sidekli, S. and Yıldırım, B. STEM in Transition from Primary School to Middle School: Primary School Students' Attitudes. International Electronic Journal of Elementary Education. 2021, 13 (5): 687-697. Available in: https://creativecommons.org/ licenses/by/4.0/
31. EU. Official Journal of the European Union. Council Recommendation on key competences for lifelong learning. 2018, (2018/C 189/01). Available in: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/
32. DeWitt, J.; Osborne, J.; Archer, L.; Dillon, J.; Willis, B. and Wong, B. Young Children's Aspirations in Science: The unequivocal, the uncertain and the unthinkable. International Journal of Science Education. 2013, 35(6):1037-1063. Available in: https://doi.org/10.1080/09500693.2011.608197
33. Nantsou, T.P.; Kapotis, E.C. and Tombras, G.S. A Lab of Hands-on STEM Experiments for Primary Teachers at CERN. In: IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 21–23 2021. April 2021, Vienna, Austria. Pag 582-589.
34. Carlone, H.B. and Johnson, A. Understanding the science experiences ofsuccessful women of color: Science identityas ananalytic lens. Journal of Research in Science Teaching, 2007. 44(8):1187-1218.

Construcción de hoteles de insectos: herramienta didáctica en huertos escolares agroecológicos.

Martínez-Arenes, M.C.[1]*, Pretel, M.T.[2], Melián, A.[2], Kafetzi, E.[3], Mathiantoni, M.[3], Kantardzhieva, K.4, Markova, G.4, Koycheva, M.4, Boncompagni E.[5] and Ruiz, A.[2]

[1] Departamento Agraria, Instituto de Educación Secundaria "El Palmeral" Avda. Doctor García Rogel, 28, 03300 Orihuela mc.martinezarenes@edu.gva.es*
[2] EPSO, Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. Beniel km. 3.2, 03312. Orihuela. Spain
[3] Primary School of Mikro Evmoiro, Xanthi, Greece
[4] Innovative School St Kliment Ohridski, 12 A. Ivanov Str., Chirpan 6200, Bulgaria,
[5] Direzione Didattica "Francesca Turrini – Bufalini" San Giustino, Citerna Via De Amicis, 06016 (Perugia – Italia),

Abstract:

Erasmus+ project called Domotic School Garden (DSG) (2020-1-ES01-KA201-082999) awarded to the Miguel Hernández University, addresses a series of actions that have been carried out in schools in Bulgaria, Greece and Italy, collaborating partners of the Project. In the line of agroecology, the design, construction and placement of insect hotels in the school gardens of each school was carried out. In this way, environmental awareness was generated among the educational communities involved in the project. As a result, the insect hotels have been a key pedagogical tool through which the STEAM competences, the European Key Competences and the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda have been addressed

Palabras clave: centros educativos, agroecología, DSG, biodiversidad, hoteles de insectos.

1. Introducción

El proyecto DOMOTIC SCHOOL GARDEN 2020-ES01-KA201-082999 ha sido un proyecto concedido a la Universidad Miguel Hernández, y desarrollado por tres departamentos: Biología Aplicada, Economía Agroambiental, Ingeniería Agroforestal y como colaborador externo el Departamento de Agraria del Instituto de Educación Secundaria "El Palmeral" de Orihuela.

Los socios europeos implicados en el mismo fueron: la Escuela St. Kliment Ohridski en Bulgaria, una escuela primaria en el municipio rural de Chirpan, en el centro-sur de Bulgaria, en el que estudian un centenar de alumnos de entre 5 y 11 años; la Escuela Primaria de Mikro Evmoiro, situada en una zona rural cerca de la ciudad de Xanthi, con 124 alumnos, que vienen de 4 pueblos diferentes para asistir a la escuela; y el Circolo Didattico San Giustino e Citerna en Italia, compuesto por tres guarderías y cuatro escuelas primarias con unos 470 niños en total.

El desarrollo completo de este proyecto supuso la puesta en marcha de actividades de carácter transversal y adicional a los contenidos teórico-prácticos determinados en las programaciones docentes de cada centro educativo. Por tanto, le otorgaron un valor añadido al proceso de enseñanza-aprendizaje que llevan a cabo en los colegios. Los bloques temáticos en los que se dividieron las actividades diseñadas por el equipo de profesores de la Universidad Miguel Hernández fueron: biología, economía, ingeniería y agroecología. Así fueron planteándose acciones de las cuatro disciplinas mencionadas con carácter periódico para que el alumnado de

los colegios miembros del proyecto Domotic School Garden (DSG) desarrollaran según su calendario lectivo.

Como punto de partida conviene mencionar que los huertos escolares son espacios pedagógicos vivos que permiten aplicar la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS) promovida por las Naciones Unidas en 2005 en la educación reglada como no reglada. La EDS Se define como aquella que permite que cada ser humano adquiera los conocimientos, las competencias, las actitudes y los valores necesarios para forjar un futuro sostenible. Entre los retos prioritarios que se deben abordar se incluye la conservación de la biodiversidad. [1]. Fomentar una mayor conciencia ambiental en las comunidades educativas participantes en el proyecto fue una de las prioridades de las propuestas didácticas diseñadas desde la perspectiva agroecológica, incentivando entre el estudiantado la importancia de la conservación de la biodiversidad en el DSG.

Por tanto, se facilitó un guion para la construcción de hoteles de insectos, que, aunque son espacios artificiales, permiten incrementar la presencia de insectos que favorecen la polinización en los cultivos y regulan la presencia de las plagas en los huertos escolares. Los hoteles de insectos tratan de imitar a la naturaleza, son una sustitución los hábitats naturales, tales como los lindes de vegetación seca, las galerías excavadas en los árboles o piedras que se encuentran en las parcelas, sin embargo, son una herramienta didáctica muy interesante para la estimular la comprensión del alumnado [2].

El DSG es un espacio de convivencia escolar donde se fortalecen los valores de solidaridad y sostenibilidad. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (ODS) suponen una verdadera oportunidad para crear un mundo más justo, equitativo y sostenible, tanto a nivel local como a escala global. Los centros escolares son conscientes de ello y cada vez son más quienes impulsan esta agenda de transformación, sostenibilidad y ciudadanía global desde el enfoque de la educación en derechos de infancia [3]. Adicionalmente, durante el diseño y construcción de los mismos, fueron abordados de manera transversal, aquellos (ODS) enfocados a la sensibilización del alumnado por el respeto al entorno y la justicia social.

Las competencias clave son aquellas que todas las personas precisan para su realización y desarrollo personal, su empleabilidad, integración social, estilo de vida sostenible, éxito en la vida en sociedades pacíficas, modo de vida saludable y ciudadanía activa. Estas se desarrollan con una perspectiva de aprendizaje permanente, desde la primera infancia hasta la vida adulta, y mediante el aprendizaje formal, el no formal y el informal en todos los contextos, incluidos la familia, el centro educativo, el lugar de trabajo, el entorno y otras comunidades. [4].

El aprendizaje y la práctica STEAM ayudan a desarrollar habilidades y a preparar a la juventud para un mercado de trabajo que demanda no solo mayor conocimiento en ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas, sino, además, la capacidad de utilizarlo con sentido, contexto y creatividad. La educación STEAM se sitúa a nivel internacional en las apuestas de los países avanzados, como una estrategia de éxito para fomentar la ciencia, la tecnología y la innovación entre las nuevas generaciones. [5]. Se desarrollarán aquellas competencias STEAM más apropiadas para cada actividad didáctica planteada desde el equipo de la Universidad Miguel Hernández.

2. Materiales y métodos

Previo al planteamiento de la elaboración de los hoteles de insectos, se planteó otra actividad denominada Actividad 0: Collage (Figura 1), a través de la cual, se podría conocer el entorno de los centros educativos y la determinar la idoneidad de la ubicación y el diseño más apropiado de los hoteles de insectos (Figura 2).

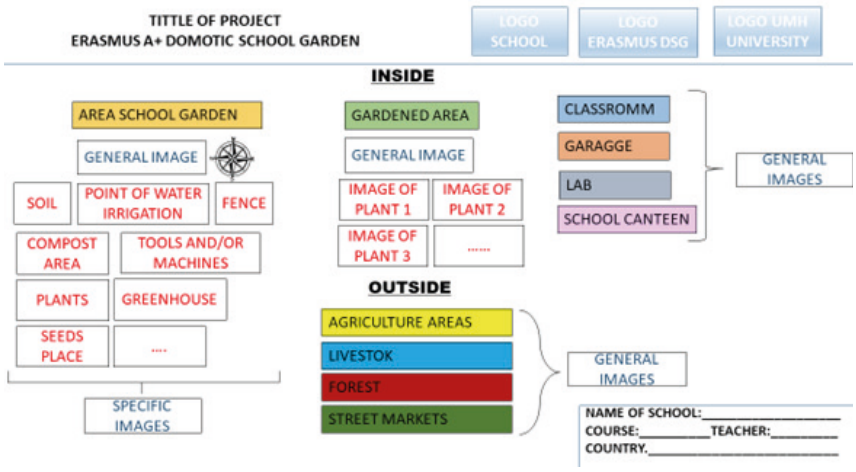


Figura 1. Esquema general de la actividad del collage propuesta por la UMH



Figura 2. Ejemplo de collage desarrollado por la Escuela St. Kliment Ohridski (Bulgaria)

Tras la obtención de la información pertinente a través de los collages elaborados por los centros educativos se elaboró una guía didáctica de la actividad "Hoteles de Insectos" con los siguientes contenidos: 1.- La duración y posibles destinatarios, 2.- los objetivos conceptuales a alcanzar, 3.- las competencias clave europeas y las competencias STEAM susceptibles de ser abordadas, 4.- la descripción y fundamentos de la actividad, 5.- material necesario a emplear 6.- Procedimiento a seguir para su construcción. 7.- Procedimiento de la actividad 8.- Algunas ideas para desarrollar con alumnos de distintos niveles, 9.- Dificultades de esta actividad, 10.- La metodología de evaluación y 11.- Recomendaciones.

En el punto 8. Procedimiento a seguir para su construcción se marcaron las siguientes pautas:

1.- ESTRUCTURA BÁSICA (Figura 3): La caja de madera es un material ideal para estructuras básicas, en cualquier caso, si no tienes puedes utilizar cartones de leche, o botella grande de agua



Figura 3. Materiales para la estructura básica

2.- DISEÑO DE LAS DISTINTOS COMPARTIMENTOS (Figura 4): Diferentes piezas de madera para formar varios tramos en la estructura básica, silicona u otro tipo de cola o grapas o grapas para fijarlos.

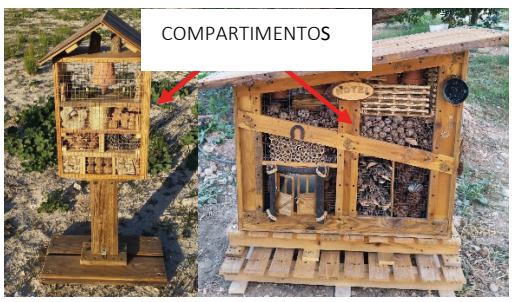


Figura 4. Muestra de los distintos compartimentos de los hoteles de insectos

3.- RELLENAR LOS ESPACIOS (Figura 5): Materiales reciclados como cañas de bambú, hojas secas, palos o paja, piedras y tejas, piñas, macetas viejas, algunos cartones, ramitas, restos de madera, recortes de hierba seca, etc.



Figura 5. Materiales empleados para rellenar los compartimentos

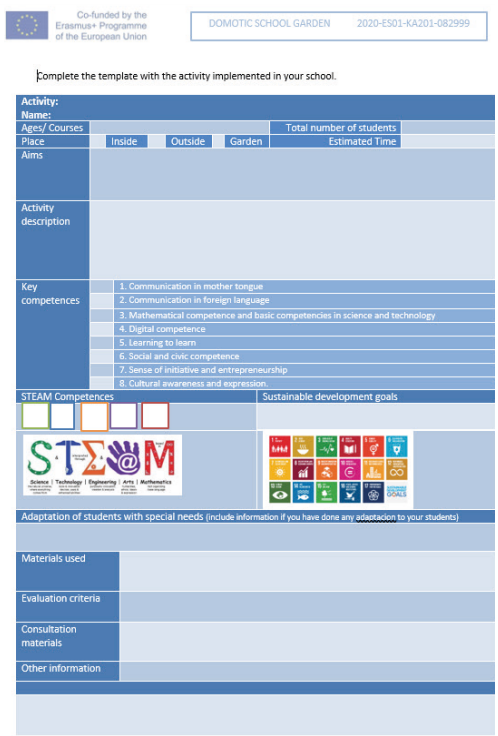
4.- DISEÑO DEL TEJADO (Figura 6): Utilizando piezas planas de madera y dándoles una inclinación para evitar que se dañen con la lluvia. Es posible que necesite algunos clavos o silicona para dar estabilidad a la estructura creada.

El proceso de la actividad se marcó en tres pasos: en primer lugar, la escoger una estructura básica fuerte, estable y resistente al agua, en cuyo caso podría ser facilitada por el propio alumnado. En segundo lugar, se debería diseñar diferentes compartimentos de diversos tamaños, la idea es proporcionar todo tipo de rincones y grietas, grietas, túneles y camas acogedoras. Y finalmente se realizaría el tejado, utilizando materiales impermeabilizantes o pintándolo con pintura especial para madera.



Figura 6. Distintos tipos de hoteles de insectos

Por otra parte, con la finalidad de recopilar toda la información del desarrollo de la actividad se elaboró una ficha **(Figura 7)** que debía ser implementada por cada profesor responsable. Los contenidos que figuraban en dicha plantilla son: 1.- número de la actividad y nombre, 2.- numero de estudiantes que la han desarrollado y sus edades, 3.- Objetivos prácticos y didácticos, 4.- Descripción de la actividad 5.- Competencias clave verdaderamente abordadas, 6.- Competencias STEAM desarrolladas, 7.- Objetivos de Desarrollo Sostenible llevados a cabo en la ejecución de la actividad, 8.- Adaptaciones curriculares para alumnado con necesidades especiales , 9.- Materiales empleados, 10.- criterios de evaluación, 11.- Materiales bibliográficos consultados y 12.- Otra información de interés**.** Los profesores responsables de los Centros educativos adjuntaron el material gráfico y las referencias web correspondientes a la actividad y la plantilla debidamente cumplimentada.



Co-funded by the Erasmus+ Programme of the European Union

DOMOTIC SCHOOL GARDEN 2020-ES01-KA201-082999

Complete the template with the activity implemented in your school.

Activity: Name:					
Ages/ Courses				Total number of students	
Place	Inside	Outside	Garden	Estimated Time	
Aims					
Activity description					
Key competences	1. Communication in mother tongue				
	2. Communication in foreign language				
	3. Mathematical competence and basic competencies in science and technology				
	4. Digital competence				
	5. Learning to learn				
	6. Social and civic competence				
	7. Sense of initiative and entrepreneurship				
	8. Cultural awareness and expression.				
STEAM Competences				Sustainable development goals	
Adaptation of students with special needs (include information if you have done any adaptación to your students)					
Materials used					
Evaluation criteria					
Consultation materials					
Other information					

Figura 7. Plantilla elaborada por La llave consulting para la obtención de resultados de las actividades desarrolladas en el proyecto DSG

3. Resultados y discusión

De entre los colegios participantes del proyecto, Grecia e Italia desarrollaron íntegramente la actividad (Figuras 8 y 9), en el caso de Bulgaria, al tratarse de alumnado de más corta edad, la actividad no fue llevada a cabo. El alcance total de alumnado fue de 55 alumnos, y 17 del Circolo Didattico San Giustino e Citerna en Italia y 38 de la Escuela Primaria de Mikro Evmoiro, en Grecia, cuyas edades estaban comprendidas desde 8 a 12 años, lo que supuso una adaptación de la actividad por parte del profesorado para cada etapa educativa.



Figura 8: Desarrollo de la actividad en la Escuela Primaria de Mikro Evmoiro (Grecia)



Figura 9. Hotel de insectos elaborado por la Escuela Primaria de Mikro Evmoiro (Grecia)

En cuanto a los objetivos que se pretendían alcanzar según la guia didáctica figuraban: 1.- Confeccionar un hotel de insectos para mejorar el nivel de biodiversidad en el lugar del DSG, 2.- Enseñar el significado de cuidar nuestro planeta y el medio ambiente y 3.- Conocer la importancia de los insectos polinizadores en la huerta orgánica. En ambos centros educativos donde se desarrolló la actividad se cumplió con los objetivos previstos. En el caso del colegio de Grecia, tras concluir la actividad del hotel de insectos, el alumnado más joven visitó el Parque Nacional de nord-este de Grecia (Figura 10) para ampliar información sobre la importancia de la conservación de la biodiversidad y observar las aves en sus hábitats naturales.



Figura 10. Visita de los estudiantes del colegio de Grecia a un Parque Nacional de su región.

Por lo que respecta a las competencias clave europeas alcanzadas, en ambos centros educativos fueron: 1. comunicación en la lengua materna; 2. comunicación en lenguas extranjeras 5. aprender a aprender; 6. competencias sociales y cívicas; 7. sentido de la iniciativa y espíritu de empresa, algo que concuerda con las competencias clave europeas propuestas en la guia didáctica facilitada a los docentes. Los contenidos teórico-prácticos a tratar a la hora de confeccionar los hoteles de insectos relacionados con las competencias STEAM en Grecia fueron: las ciencias y las artes mientras que en el colegio de Italia unicamente consideran que se desarrolló la competencia de la Ingeniería.

A continuación se muestra una figura (Figura 11))con los 17 Objetivos de Desarrolllo Sostenible. A priori, desde la guia didáctica no se les indicó qué ODS era recomendable que abordasen, más bien se dejó autonomía para que el docente responsable de la actividad focalizase la actividad hacia el entendimiento y la consecución de aquellos que estimase más apropiados, en función de la edad del alumando, la acción concreta llevada a cabo (diseño del hotel de insectos, construcción, búsqueda de material de relleno de los compartimentos, instalación en el DSG, observación de presencia de insectos en el entorno, etc..). Los ODS abordados en la Escuela Primaria de Mikro Evmoiro, (Grecia) quedan marcados en el figura con el símbolo: ● mientras que los ODS alcanzados por el centro educativo de Circolo Didattico San Giustino e Citerna en Italia quedan identificados con el símbolo: ■



Figura 11. ODS alcanzados por la escuela Mikro Evmoiro (Grecia) y por la escuela Circolo Didattico San Giustino (Italia)

En el caso de Grecia, los docentes pusieron más interés en estimular la conciencia medioambiental de su alumnado, dando mayor importancia a los ODS relacionados con la conservación del suelo, del agua, de las plantas y animales. En el colegio de Italia, los docentes aplicaron los ODS de manera transversal a lo largo del desarrollo de la actividad y se estimó más conveniente darle un enfoque más social, escogiendo los ODS relacionados con el fin de la pobreza, hambre cero, salud y bienestar, educación de calidad, igualdad de género y energía asequible y no contaminante. Los materiales empleados en ambos casos fueron reciclados, de procedencia natural, desde botellas o envases a cajas de madera de mayor tamaño que se les daba otro uso. Y en ambos centros educativos, también coincidió el método de trabajo escogido: cooperativo en grupo.

4.- Conclusiones

La implantación de hoteles de insectos en los huertos escolares es una actividad que permite desarrollar habilidades entre el alumnado como: la creatividad a la hora de determinar el diseño, el ingenio en su construcción, la cooperación, sentido de la responsabilidad, y además, permite concienciar al estudiantado sobre la dinámica natural de las especies beneficiosas que pueden habitar en los espacios agrícolas no degradados, en definitiva, generar conciencia medioambiental sobre la importancia de conservar la biodiversidad.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Unión Europea la financiación del Proyecto Erasmus+ Domotic School Garden (DSG) (2020-1-ES01-KA201-082999) así como a las Comunidades Educativas que han participado en el Proyecto. Con profesionales de la enseñanza comprometidos, es possible alcanzar los ODS de la Agenda 2030. Sirva este caso como ejemplo.

Referencias

1. Egea-Fernández, J.M, Egea-Sánchez, J.M and Guerrero, M. Huertos escolares como recurso para la educación agroecológica. el caso de la Región de Murcia. 2018, Dpto. de Biología Vegetal (Botánica), Facultad de Biología, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, 30100 Murcia.

2. Quintano J. Insectos que ayudan al huerto y vergel ecológicos. Conocer, atraer, alojar, conservar, 2022 La Fertilidad de la Tierra. Pág. 164 ISBN 978-84-121830-6-1

3. Aridane H. Técnico de Educación en Derechos de Infancia y Ciudadanía Globa lUNICEF. Educa. Buenas Prácticas. Cultivar la Agenda 2030 desde el huerto escolar .2021 Availabel in: https://www.unicef.es/educa/buenas-practicas/cultivar-agenda-2030-huerto-escolar

4. EU. Official Journal of the European Union. Council Recommendation on key competences for lifelong learning. 2018, (2018/C 189/01). Available in: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/

5. Ondula. Recomendaciones europeas sobre las competencias tecnológicas STEAM. Educación digital crítica. 2018. Available in: https://ondula.org/recomendaciones-europeas-sobre-las-competencias-tecnologicas-steam/

Experiencia de aprendizaje en el Domotic School Garden (ERASMUS+K2). Estación Agrometeorológica y actividades asociadas.

A. Ruiz-Canales[1], M.T. Pretel[1], M.C. Martínez-Arenes[2], A. Melián[1], Cuevas, C[3], Haya, B[3], E. Kafetzi[4], M. Mathiantoni[4], K. Kantardzhieva[5], G. Markova[5], M. Koycheva[5] and E. Boncompagni[6]

[1] EPSO, CIAGRO. Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. Beniel km. 3.2, 03312 Orihuela (Alicante).
[2] Departamento Agraria, Instituto de Educación Secundaria "El Palmeral" Avd. Doctor García Rogel, 28, 03300 Orihuela.
[3] La Llave Consulting. C/ Blasco Ibañez, 56 1 B. 02004 (Albacete).
[4] Primary School of Mikro Evmoiro, Xanthi, Greece, ekafetzi@sch.gr, mathiantonikse@gmail.com
[5] Innovative School St Kliment Ohridski, 12 A.Ivanov Str., Chirpan 6200, Bulgaria, discovery.mlc@gmail.com
[6] Direzione Didattica "Francesca Turrini – Bufalini" San Giustino, Citerna (Perugia – Italia), Via De Amicis, 06016, elisaboncompagni13@gmail.com

Abstract: El uso de hardware y software de estaciones agroclimáticas puede emplearse en la enseñanza de agricultura y materias relacionadas con la misma para alumnos de enseñanza primaria. Estas estaciones incluyen sensores para medir variables climáticas como la temperatura, la humedad, la luz solar y la precipitación, entre otras. El hardware de la estación, junto con el software y el material docente, deben ser empleados conjuntamente para proporcionar a los estudiantes una experiencia de aprendizaje completa. Las actividades docentes y el material relacionado con la estación agrometeorológica del proyecto "Domotic School Garden" financiado por ERASMUS + con el código 2020-ES01-KA201-082999, combina múltiples disciplinas y tecnologías (domótica, meteorología, informática,…) para mejorar la enseñanza de la agricultura en escuelas primarias. Este proyecto trató de fomentar el interés de los estudiantes por la ciencia, la tecnología, la ingeniería, las matemáticas y materias relacionadas a través del montaje y uso de una estación agrometeorológica con recogida de datos en la nube, junto con un material docente relacionado con la misma. Los estudiantes pudieron aprender acerca de los factores climáticos y cómo afectan a las plantas y al suelo, así como también sobre la tecnología y el software utilizados para medir y visualizar los datos. Con un enfoque en el aprendizaje práctico y la colaboración internacional, los estudiantes pudieron avanzar en el conocimiento del hardware y software aplicados a la agricultura, junto con otras materias relacionadas con Ciencias, Tecnología, Ingeniería, Matemáticas y Arte (CTIMA).

Palabras clave: Enseñanza primaria, agromótica, sensores, plataforma Micro:bit, CTIMA

1. Introducción

El proyecto "Domotic School Garden" es un proyecto financiado por el programa Erasmus+ de la Unión Europea, que tuvo como objetivo el desarrollo de Ciencias, Tecnología, Ingeniería, Matemáticas y Arte (CTIMA) en estudiantes. Una de las finalidades de este proyecto fue la automatización de un huerto escolar y el desarrollo de actividades asociadas. Dicho proyecto

incluye el código 2020-1-ES01-KA201-082999 E10208718 y fue financiado por la Unión Europea a través del programa Erasmus+ para la Cooperación para la Innovación y el Intercambio de Buenas Prácticas en educación escolar, vocacional y de adultos (KA201) entre 2020 y 2022.

A través del desarrollo de un huerto escolar inteligente, que incluye una estación agrometeorológica automatizada y un sistema de sensores para controlar el entorno del huerto, se busca enseñar a los estudiantes sobre la importancia de la agricultura urbana sostenible y la automatización del hogar. Los objetivos más importantes de este proyecto son los siguientes:

1) Reducir el fracaso escolar de los alumnos: El proyecto busca involucrar a los estudiantes en un aprendizaje más activo y práctico, lo que puede aumentar su motivación y reducir el fracaso escolar.

2) Motivar al alumnado hacia el aprendizaje de las CTIMA. Las CTIMA (Ciencias, Tecnología, Ingeniería, Matemáticas y Arte) son áreas de conocimiento que cada vez tienen más relevancia en el mundo actual y el proyecto busca motivar a los estudiantes a aprender y desarrollar habilidades en estas áreas.

3) Incorporar la innovación en las instituciones educativas. La creación de una estación agroclimática utilizando una plataforma docente como Micro:bit puede ser una forma innovadora de enseñar y aprender en las instituciones educativas.

4) Impulsar la formación del profesorado y mejorar su capacidad de autoformación en CTIMA: El proyecto busca también capacitar al profesorado para que pueda enseñar y guiar a los estudiantes en la creación de la estación agroclimática, mejorando así su capacidad de autoformación en CTIMA.

5) Buscar nuevas metodologías de enseñanza-aprendizaje y hacer partícipes a los alumnos en el proceso. El proyecto busca involucrar a los estudiantes en un aprendizaje más práctico y participativo, permitiéndoles ser parte del proceso de construcción y programación de la estación agroclimática.

6) Atender a la diversidad de los estudiantes. La creación de una estación agroclimática utilizando una plataforma docente puede ser una forma de enseñar que permita atender a la diversidad de los estudiantes, adaptándose a sus distintos niveles y estilos de aprendizaje. También se tienen en cuanta a alumnos con ciertas discapacidades para poder realizar actividades cómodas para ellos y estar incluidos en el proyecto.

7) Colaborar con otras instituciones europeas y compartir experiencias: El proyecto busca establecer colaboraciones con otras instituciones europeas para compartir experiencias y conocimientos en el uso de plataformas y la programación para la creación de estaciones agroclimáticas.

8) Reducir el sesgo de la ruralidad: La creación de una estación agroclimática puede ser especialmente relevante para las zonas rurales, permitiendo acercar la tecnología y el aprendizaje en CTIMA a estas zonas.

9) Acercar a los alumnos a problemas ambientales globales, como el cambio climático: La creación de una estación agroclimática puede permitir a los estudiantes conocer más sobre los problemas ambientales globales, como el cambio climático, y cómo éstos afectan al sector agropecuario.

10) Desarrollar los valores de manera transversal en el currículo: La creación de la estación agroclimática puede ser una forma de desarrollar valores como la responsabilidad, el trabajo en equipo y el compromiso de manera transversal en el currículo.

11) Desarrollo de habilidades: La programación es una habilidad valiosa en el mundo actual y su enseñanza a través de la creación de una estación agroclimática puede ayudar a los alumnos a desarrollar habilidades en lógica, pensamiento crítico y resolución de problemas, además de aprender sobre el uso de sensores y tecnologías asociadas.

En esta comunicación se muestran las actividades desarrolladas alrededor de la estación meteorológica y el hardware y software asociados, dentro del proyecto global "Domotic School Garden". La propuesta de la Universidad Miguel Hernández incluye dos producciones intelectuales. En primer lugar, se ha creado una estación agroclimática con un sistema de hardware y software, Intellectual Ouput (IO1) diseñado específicamente para su uso en colegios y que fue utilizado por los estudiantes de los centros asociados. Además, este sistema es exportable y puede ser implementado en cualquier otro centro educativo que desee utilizarlo en sus aulas y huertos. Esta producción intelectual (IO1) cubre la necesidad de reforzar las competencias básicas tecnológicas en robótica y programación en los colegios. Se ha logrado a través de la creación de un material que permite a los estudiantes construir un nodo con sensores mediante componentes electrónicos básicos, de fácil acceso y bajo coste.

En segundo lugar, se ha creado una Guía Pedagógica (IO2) para proporcionar al profesorado las herramientas necesarias para llevar a cabo proyectos de manejo de huertos escolares ecológicos y la instalación de huertos domotizados de bajo costo. La Guía incluye el software desarrollado y actividades didácticas con ejemplos prácticos para facilitar la interacción de los estudiantes con el medio ambiente a través del huerto.

Las entidades que han promovido esta iniciativa han sido las siguientes. La Universidad Miguel Hernández (España), Consultoría Lallave Consulting (España), Escuela St. Kliment Ohridski (Bulgaria), La escuela primaria de Mikro Evmoiro (Grecia), Circolo Didattico San Giustino e Citerna (Italia). La empresa Telenatura EBT (España) ha participado en el asesoramiento tecnológico. Todas ellas participaron en el proyecto Erasmus + Domotic School Garden 2020-ES01-KA201-082999 (DSG).

2. Materiales y métodos

Las actividades relacionadas con la estación agrometeorológica desarrolladas en el proyecto DSG fueron las siguientes: 1) ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL JARDÍN Y LOS SENSORES AGRÍCOLAS; 2) TUTORIAL RÁPIDO DE LA PLATAFORMA BBC MICROBIT; 3) CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN. Estas tres actividades fueron las que se plantearon definitivamente.

Respecto al IO1, se muestra en la figura 1 un detalle de la estación agrometeorológica que se empleó para el desarrollo de las actividades docentes asociadas. Esta estación fue desarrollada por el equipo técnico de la UMH, en colaboración con la empresa TELENATURA EBT, S.L. Una vez diseñada y construidas las piezas, se enviaron a cada uno de los colegios de Bulgaria, Grecia e Italia. En los centros receptores fueron montadas siguiendo las instrucciones que se les enviaron.



a) b)

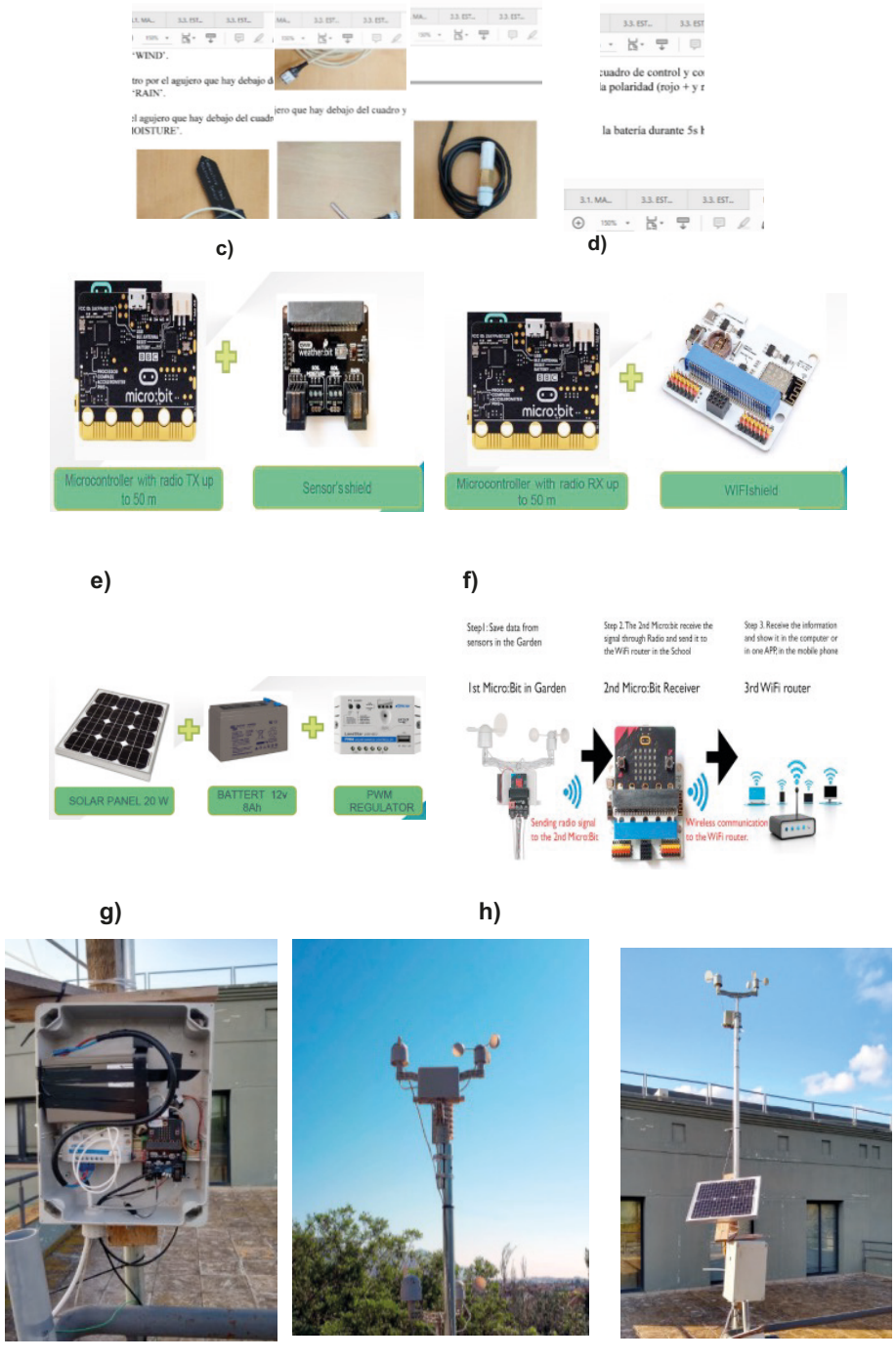


Figura 1. Diversos aspectos de la estación agrometeorológica del proyecto DSG e instrucciones de montaje. a) Instalación de soporte de sensores; b) Instalación de soporte de panel fotovoltaico; c) Algunos sensores empleados (humedad del suelo, temperatura y humedad relativa; d) Instalación del cuadro de control; e) Estación en campo; f) Unidad receptora; g) Instalación de suministro de energía; h) Diagrama principal de la estación agrometeorológica; i) Estación agrometeorológica montada en la UMH.

Cada una de las actividades asociadas a la estación agrometeorológica e integradas en la IO2 incluyeron los siguientes puntos: 1.- Duración y destinatarios de la actividad; 2.- Objetivos conceptuales de la actividad; 3.- Competencias clave europeas; 4.- Competencias CTIMA; 5.-

Descripción y fundamento de la actividad; 6.- Material necesario; 7.- Procedimiento de la actividad; 8.- Algunas ideas para desarrollar con alumnos de distintos niveles; 9.- Dificultades de esta actividad; 10.- La metodología de evaluación y 11.- Debes tener en cuenta.

Cada Centro Educativo que llevó a cabo la actividad, informó de su desarrollo, incluyendo sus propias iniciativas. Los colegios informaron sobre, las edades, el curso y el número de estudiantes que realizaron la actividad, el lugar donde se desarrolló, los objetivos y la descripción de la actividad. Así mismo, indicaron las competencias claves europeas se habían trabajado durante el desarrollo de la actividad: comunicación en lengua materna, comunicación en lengua extranjera, competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología, competencia digital, aprender a aprender, competencia social y ciudadana, sentido de iniciativa y emprendimiento y conciencia y expresión cultural. También informaron sobre las competencias CTIMA y los ODS que se habían trabajado durante el desarrollo de la actividad. Los profesores responsables de los Centros Educativos indicaron también los materiales usados, y links a las carpetas con fotografías, videos y otros materiales generados.

3. Resultados y discusión

3.1. Propuesta de la Universidad Miguel Hernández (UMH)

Las actividades relacionadas fueron 1) ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL JARDÍN Y LOS SENSORES AGRÍCOLAS; 2) TUTORIAL RÁPIDO DE LA PLATAFORMA BBC MICROBIT; 3) CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.

Estas actividades se diseñaron para desarrollarse de forma continua en los colegios. En el desarrollo de las actividades, elaboración y mantenimiento, pueden participar todos los estudiantes, profesores, padres de estudiantes y otro personal interesado. Se pueden desarrollar en el campo, en el aula y/o en un laboratorio. El material necesario, aparte de la estación agrometeorológica previamente descrita, incluye sensores didácticos relacionados con la materia impartida. Se muestran en la figura 2 los sensores didácticos que fueron adquiridos por la UMH y distribuidos a los Centros Educativos colaboradores de Bulgaria, Grecia e Italia. Son de la marca DFRobot que es un producto de la marca española de la plataforma BBC MicroBit (https://microbit.org). Esta plataforma se basa en una tarjeta controladora de código abierto, la Micro:Bit, desarrollada y presentada por el servicio público de radio y televisión del Reino Unido, la BBC, en 2015 y comercializada finalmente a principios del año 2016. Su desarrollo viene de la mano de un conjunto de empresas que colaboran en el proyecto aportando conocimientos, tecnología y financiación, como son entre otros: Departamentos de enseñanza e investigación técnica de la BBC; ARM Holdings, multinacional de diseño de semiconductores y software; NXP Semiconductor (antigua división de semiconductores de Philips); Nordic Semiconductor, especializada en sistemas de comunicación de bajo consumo; Barclays, multinacional británica de servicios bancarios y financieros; Element 14, división de la distribuidora Farnell de productos electrónicos; Lancaster University, universidad pública en la ciudad inglesa de Lancaster; Microsoft, multinacional americana de desarrollo de software; Samsung, multinacional surcoreana con múltiples áreas de negocio, entre otros.



Figura 2. Material de enseñanza de DFRobot: Natural Science(V1.0).

La primera actividad, ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL JARDÍN Y LOS SENSORES AGRÍCOLAS, tiene como objetivo partir de la base de los conceptos básicos en sensórica. Se incluye el concepto de sensor [1-3]. Además, se presenta la diferencia entre señal analógica y digital. Posteriormente se tiene en cuenta la gestión de una señal y la activación de sensores. Además, se presenta con algunos ejemplos el uso de software de programación para la configuración de un sensor. Para ello se utiliza la plataforma de aprendizaje BBC Micro: bit, citada previamente. Es un sistema completo de recopilación y gestión de datos de sensores. Finalmente, en cada centro se desarrollaron unas aplicaciones específicas en DSG sobre sensores agrícolas. En esta actividad se incluye el conocimiento de un sensor, su uso y el software de programación. La plataforma de aprendizaje BBC Micro:bit es el enlace para aprender estos conceptos.

La segunda actividad, TUTORIAL RÁPIDO DE LA PLATAFORMA BBC MICROBIT, pretende se iniciarse con la plataforma BBC Micro :bit [4]. La plataforma BBC Micro: bit se emplea como un sistema completo de recopilación y gestión de datos de sensores. Finalmente, en cada centro se desarrollaron las primeras aplicaciones de esta plataforma. Se pretende utilizar el material didáctico inicial de la plataforma BBC Micro :bit en un huerto escolar. Este propósito fue la introducción para el uso de la estación meteorológica DSG en diferentes prácticas agronómicas locales. Igualmente, fue utilizado por alumnos y profesores de escuela, así como por los responsables de pequeños huertos. También la plataforma de aprendizaje BBC Micro:bit fue el enlace para aprender estos conceptos.

La última actividad, CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN, parte de los datos obtenidos con la estación agrometeorológica en un huerto escolar de diferente procedencia (comercial, de una red de estaciones meteorológicas, construidas a partir de sensores, entre otros). Incluye el procedimiento de cálculo de la evapotranspiración de referencia por medio Penman-Monteith y sus aplicaciones para su aplicación en la determinación de la dosis de riego [5]. Todo ello, mediante el uso de la estación meteorológica DSG en diferentes prácticas agronómicas locales. Además, será utilizado por alumnos y profesores de la escuela, así como por los responsables de pequeños huertos. Incluye esta actividad una breve introducción sobre el concepto de evapotranspiración y su aplicación.

3.2. Desarrollo de la actividad en los colegios: Bulgaria, Grecia, Italia

En Bulgaria se impartieron las actividades relacionadas con la plataforma BBC Microbit (ver detalle en figura 3).

En Grecia, además del desarrollo y prácticas con la estación agrometeorológica citada, se desarrollaron actividades adicionales relacionadas con las estaciones agrometeorológicas. El Centro Educativo se conectó remotamente con el Centro Científico BEYOND (Earth Observation and Satellite Remote Sensing) de Grecia. La acción "beyondEDU-tecnología espacial y currículo de teledetección", introduce a los alumnos de primaria en el mundo tecnológico de la

teledetección satelital, ofrece conocimientos y estímulos en torno a temas innovadores no incluidos en los libros de texto y vincula la educación obligatoria con los desarrollos modernos en tecnología satelital que se espera que influir en la vida cotidiana de los ciudadanos en el futuro. Les informaron sobre las aplicaciones de los satélites, que están en materias escolares como Geografía.

Se incluye también la estación meteorológica escolar en facebook de un socio externo (VS-22): https://www.facebook.com/vasilis.aggelopoulos.568.

En Italia, la estación meteorológica se instaló en el jardín del complejo Cospaia. La estación mide varias variables ambientales usando sensores, las envía a una base de datos en la nube donde se grafican los datos para tener una imagen en línea de la situación. Se incluyen los datos en la siguiente dirección web (www.thingspeak.com/channels/1656642)

La estación meteorológica instalada en el jardín del colegio Cospaia.

La estación meteorológica recoge diferentes variables ambientales. Se envía a una base de datos en una nube. Estos datos se recogen en un gráfico para gestionar online los diferentes suelos y conocer la diferente biodiversidad para una alimentación saludable.

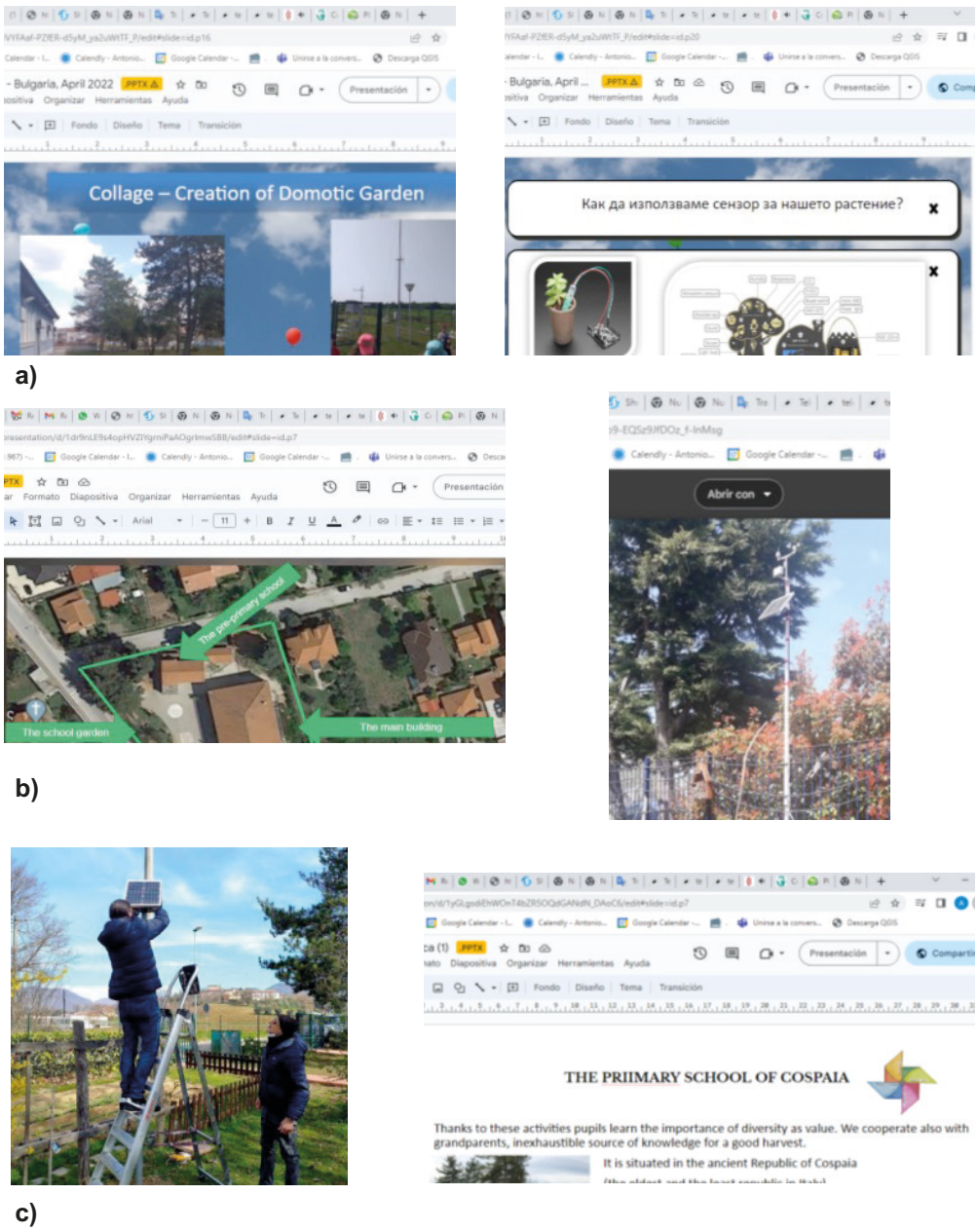


Figura 3. a) Trabajo en aula con los sensores y la plataforma BBC Microbit en el Centro Educativo de Bulgaria; b)Localización del huerto escolar y estación agrometeorológica en Mikro Evmoiro en Grecia; c) Instalación de la estación agrometeorológica en el Centro Educativo de Italia y algunos detalles del huerto escolar.

4. Conclusiones

En este trabajo se muestra un modelo de trabajo efectivo para desarrollar herramientas que permitan a los profesores de los Centros Educativos realizar proyectos científicos alrededor del manejo de un huerto ecológico escolar domotizado (DSG). Las actividades "ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EL JARDÍN Y LOS SENSORES AGRÍCOLAS; TUTORIAL RÁPIDO DE LA PLATAFORMA BBC MICROBIT; CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN." que se presentan en esta comunicación son un ejemplo que facilita al alumnado su interacción y comprensión del medio ambiente.

Se han detallado las características de una estación agrometeorológica adaptada a colegios y que fue utilizada por los estudiantes de los centros asociados.

El trabajo llevado a cabo por los tres Centros Educativos socios del proyecto DSG (Escuela St. Kliment Ohridski en Bulgaria, Escuela Primaria de Mikro Evmoiro en Grecia y Circolo Didattico San Giustino e Citerna en Italia).

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Unión Europea la financiación del Proyecto Erasmus+ Domotic School Garden (DSG) (2020-1-ES01-KA201-082999).

Adicionalmente, los autores de esta comunicación agradecen el apoyo tecnológico prestado por la empresa TELENATURA EBT, S.L. (https://www.telenaturaebt.es).

Referencias

1. Aranda, D., Tapia, A., & Millan, P. (2022). Calibración y caracterización de sensores capacitivos de bajo coste para la monitorización de humedad de suelo. En XLIII Jornadas de Automática: Libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logroño (La Rioja) (2022.a ed., pp. 479-485). Servizo de Publicacións da UDC. https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0479
2. Chen, M. K., Li, W. B., & Kan, J. M. (2014). Remote Multi-layer Soil Temperature Monitoring System Based on GPRS. 164(2).
3. Fezari, M., & Al Dahoud, A. (2019). Exploring One-wire Temperature sensor «DS18B20» with Microcontrollers.
4. Halfacree, G. (2017). The Official BBC micro:bit User Guide. John Wiley & Sons.





Mecanización y Seguridad y Salud en el Trabajo/ Mecanização e Saúde e Segurança no Trabalho

¿Afectan las boquillas de pulverización hidráulica a la eficacia de *Beauveria bassiana*?.

R. Beltrán-Martí, C. Garcerá, D. Pitarch, A. Fonte, J. Cuquerella, I. Carrillo, P. Chueca.

Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Ctra. CV-315 km. 10,5. 46113 Moncada, Valencia (Spain); chueca_pat@gva.es

Abstract: Entomopathogenic fungi are potential biocontrol agent for pest control due to their mode of action and low toxic risk. However, their performance in the field could be limited by abiotic factors and application technology. The aim of this study was to evaluate the effect of nozzle type on *Beauveria bassiana* Vuillemin conidia viability and their infectivity over *Ceratitis capitata* Wiedemann. For that, different type of nozzles at 1 MPa were tested: (1) hollow cone, extra-fine droplets class (ATR-brown and ATR-orange); (2) Flat, fine droplets class (XR110-yellow); (3) hollow cone, coarse and extra-coarse droplets class (TVI-orange and TVI-yellow). The viability was assessed through the conidia germination percentage of mixture having passed through each nozzle. To assess infectivity, medfly adults placed in Petri dishes were sprayed and mortality was evaluated. Also, quantitative, and qualitative characterization of the spray deposition with each nozzle was performed. Results showed that ATR-orange XR110-yellow and ATR80-brown significantly reduced the germination percentage respect to control, but all of them reached 90%. XR110-yellow nozzle produced the highest mortality percentage of *C. capitata* but with no significant differences respect the two TVI, and ATR-orange. Significantly lower mortality percentage was found with ATR-brown. Higher infectivity was observed in the nozzles that produce higher deposition and or large impacts. In conclusion, hydraulic nozzles affect the performance of *B. bassiana* based product and it is important to consider them in the setting up of the sprayer when enthomopathogenic fungus based products are going to be used.

Palabras clave: Hongos entomopatógenos, tamaño de impacto, caudal, biopesticidas, tecnología de pulverización.

1. Introducción

La productividad de los cultivos se ve continuamente amenazada por plagas y enfermedades. Debido a los riesgos para la biodiversidad y la salud humana, se buscan alternativas a los plaguicidas químicos en la agricultura. La estrategia "The Farm To Fork" del Pacto Verde Europeo tiene como objetivo reducir el uso de plaguicidas químicos de síntesis en un 50% para 2030 [1]. Los hongos entomopatógenos (HE) son buenos candidatos para el control biológico de plagas y la producción ecológica [2]. Pueden infectar insectos penetrando a través de su cutícula y se consideran de bajo riesgo para el medio ambiente y la salud humana. Además, son fáciles de producir en masa y su ciclo de reproducción es rápido [3,4].

A pesar de su potencial, los HE pueden mostrar una pérdida de eficacia en condiciones de campo. Una de las razones es la pérdida de capacidad de desarrollo debido a factores abióticos no apropiados [5]. Otra razón podría ser el uso de tecnología de aplicación no adecuada [6]. La aplicación de los hongos entomopatógenos en campo mediante pulverización suele llevarse a cabo con los mismos equipos que se emplean para las aplicaciones convencionales de

fitosanitarios químicos de síntesis. De entre estos equipos, los pulverizadores hidráulicos son los que destacan por su uso. Generalmente están equipados con diferentes componentes (depósito o tanque, bomba, válvulas, filtros, tuberías y boquillas). La bomba aspira la mezcla del caldo y la impulsa con presión por las tuberías hasta la boquilla, donde se produce la rotura del chorro, generado pequeñas gotas que son pulverizadas sobre el cultivo. La mezcla circula por todos los componentes del sistema de pulverización a una presión que puede variar, en función de la aplicación, de 3 a 30 bares. Todo este proceso podría generar tensiones físicas o daños mecánicos a los organismos vivos contenidos en el biopesticida [7].

Actualmente existen pocos trabajos que estudien cómo afecta la tecnología de aplicación al funcionamiento de los productos basados en hongos entomopatógenos. Beltrán-Martí et al. [8] demostraron que existía una reducción significativa de la viabilidad de los conidios de *B. bassiana* que habían circulado a través de la bomba hidráulica de diafragma, así como a través de la de pistones, respecto a los conidios que no habían pasado. Sin embargo no encontraron efecto en su infectividad sobre la plaga de estudio. Prithiva et al., [9] compararon en condiciones de campo diferentes equipos para la aplicación de la cepa Bb 112 de *B. bassiana* contra *Aphis gossypii* en tomate y observaron que con el pulverizador de gotas controladas (CDA) hubo mayor reducción de plaga que con el pulverizador de ultra bajo volumen (ULV) y el pulverizador manual de mochila. Ru et al. [10] observaron que el caudal y el diámetro de la boquilla de un pulverizador aéreo con boquillas rotatorias de caja no tuvieron un efecto significativo sobre la tasa de germinación de *B. bassiana*, sin embargo, el incremento de la velocidad de rotación (rpm) la redujo significativamente. Gouli et al. [11] pulverizaron hojas de crisantemo con conidios de *B. bassiana* utilizando una boquilla de abanico plano, ángulo de pulverización de 20º y presión de 0.27 MPa, y determinaron que la distribución más uniforme de los conidios se obtenía cuando la distancia de pulverización era próxima e intermedia (25 y 50 cm). Xiao et al. [12] estudiaron el efecto de la aplicación de *B. bassiana* con boquillas de abanico plano (AI, TJ y XR) a diferentes caudales sobre la viabilidad y la distribución del tamaño de gota. En cuanto a la viabilidad, no observaron un efecto significativo en la densidad de colonias de *B. bassiana* entre los diferentes parámetros, pero si observaron que el caudal y el tipo de boquillas tenía un efecto significativo sobre la distribución del tamaño de las gotas y la deposición de la pulverización.

En este trabajo el objetivo fue estudiar el efecto de tres tipos de boquillas de pulverización hidráulica sobre la eficacia de un producto comercial a base de HE. Para ello se evaluó la viabilidad de los conidios después de pasar a través de las boquillas, así como su infectividad sobre individuos adultos de *Ceratitis capitata* (Wiedemman) Diptera: Tephritidae. Además, la deposición de cada boquilla se caracterizó cuantitativa y cualitativamente.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño experimental

Se realizó el ensayo en condiciones de laboratorio. El factor de estudio fue la boquilla a 5 variantes (Tabla 1). En todos los casos la presión de trabajo en la boquilla fue de 1 MPa.

Tabla 1. Boquilla, presión de trabajo y caudal nominal de las boquillas utilizadas en el estudio.

Boquilla	Presión (MPa)	Caudal nominal (L/min)
ATR80-Marrón	1	0.67
ATR80-Naranja		1.39
XR110-Amarilla		1.44
TVI80-Naranja		0.73
TVI80-Amarilla		1.46

Las variables respuesta para evaluar el posible daño a los conidios fueron: su viabilidad medida a través del porcentaje de germinación conidial, y su infectividad sobre individuos en fase adulta de *C. capitata*, medida como el porcentaje de mortalidad. Se realizaron 5 repeticiones.

Las variables respuesta para caracterizar la pulverización de cada boquilla fueron, cuantitativamente, el perfil vertical de pulverización, es decir, la cantidad de caldo recogido a diferentes alturas (ml) y, cualitativamente, el recubrimiento, la densidad de los impactos y su tamaño sobre papeles hidrosensibles. Se realizaron 3 repeticiones.

2.2. Producto a base de hongos entomopatógenos

Todos los estudios se realizaron con un producto comercial a base de *B. bassiana* (Botanigard 22 WP. *B. bassiana* 22% p/p cepa GHA, 4,4x10^{10} conidios/g (Laverlam International Corporation, Butte, MT, EE.UU.) a la concentración máxima indicada en la etiqueta (125 g/hl), por lo tanto, la concentración de conidios en la mezcla era 5,5x10^{6} conidios/ml.

2.3. Sistema de pulverización y aplicación.

Las aplicaciones se llevaron a cabo en una cabina de pulverización de grandes dimensiones que dispone de un carro automático de velocidad regulable sobre el que se coloca el sistema de pulverización. En este caso, dicho sistema consistió en una barra con un portaboquillas sobre la que se colocó la boquilla correspondiente pulverizando de manera horizontal. Este sistema está conectado a un equipo formado por: un tanque de PVC de 100 L, una bomba hidráulica de pistones (COMET YA 65, Reggio, Italia., 3 pistones, caudal máximo de 55 L/min, capacidad de trabajo de 650 R.P.M. y una presión máxima de 5 MPa), y un filtro de aspiración y un filtro de impulsión de 32 mesh en ambos casos. La elección de la bomba hidráulica de pistones se basó en los resultados de Beltrán-Martí et al. [9], quienes demostraron su idoneidad para pulverizar *B. bassiana* con un bajo incremento de temperatura.

Para cada repetición, se preparó un volumen de mezcla de 50 L de agua con 62,5 g del producto a base de HE y 2,5 ml de Tween® 80 (0,005%) (SIGMA-ALDRICH, Merck KGaA, 64271 Darmstadt Alemania). La mezcla estuvo en constante agitación dentro del tanque Una vez se realizaba la aplicación se cambiaba la boquilla. El orden de las boquillas fue totalmente aleatorio.

La temperatura de la mezcla se monitorizó durante toda la aplicación con un termómetro de sonda (Mini Termómetro Digital LCD, 80348, OcioDual, Alicante, España) colocado en el interior del tanque y en contacto con la mezcla.

La aplicación consistió en pulverizar con la boquilla correspondiente a una distancia de 25 cm y a una velocidad de 2 km/h sobre el objetivo, que era diferente en función de la variable a evaluar y que se encontraba situado en la mitad del recorrido. La boquilla se situaba a 75 cm de altura.

2. 5. Caracterización de la deposición de las boquillas

Para medir el perfil vertical de la pulverización, es decir, la cantidad de caldo recogido por altura (ml) se diseñó un banco de pruebas de pequeñas dimensiones que consistía en una barra vertical con tres colectores a tres alturas (95cm (alto), 75cm (medio) y 55cm (bajo) del suelo respecto a la mitad de cada colector), haciendo coincidir el colector central con la altura de la boquilla que estaba a 75 cm. El tamaño de cada colector era de 20x20 cm. Se realizaron un total de 10 pases para cada boquilla y repetición, con el fin de recoger el suficiente volumen de mezcla para ser medido.

Para medir el recubrimiento, la densidad de impactos y su tamaño para cada una de las boquilla, en este caso se realizó un pase y se pulverizó sobre un papel hidrosensible (Syngenta International AG, Basel, Switzerland) colocado en un poste a 75 cm de altura. Una vez realizada la pulverización, el papel hidrosensible se fotografiaba con una cámara digital Canon EOS 700D (Canon Inc., Tokyo Japan). La imagen de cada papel fue analizada utilizando el software Matrox Inspector (versión 2.2, MatroxTM, Dorval, Canada) obteniéndose las variables objeto de estudio.

2. 6. Evaluación de la viabilidad de los conidios.

Para evaluar la viabilidad de los conidios pulverizados, se recogieron muestras de caldo directamente de cada una de las boquillas, de las cuales se submuestrearon 50 µl que se esparcieron con un asa de siembra tipo Digralsky sobre la superficie de una placa Petri de 5 cm de diámetro preparada con medio Agar Extracto de Malta (SIGMA-ALDRICH CHEMIE GmdbH, Riedstr. 2 D-89555 Steinheim). Las placas Petri se envolvieron con papel de plata para proporcionar oscuridad y se incubaron durante 18 horas a 24 ºC y 65% HR. Tras la incubación, se añadió una gota de azul de lactofenol (LABKEM, 08339 Vilassar de Dalt, Barcelona, España) para detener la germinación y teñir las estructuras fúngicas. Las submuestras se inspeccionaron al microscopio con un aumento de 200x, y se evaluaron tantos campos como fuera necesario hasta contar 100 esporas. Se realizó un control de la germinación de *B. bassiana*, midiendo la germinación de una mezcla con conidios que no habían pasado por ninguna boquilla. A partir de ellas, se registró el número total de conidios germinados y no germinados, y se calculó el porcentaje de germinación. Se consideró que los conidios habían germinado si el tubo germinativo era más largo que la anchura de los conidios.

2. 7. Evaluación de la infectividad de los conidios.

Para evaluar la infectividad de los conidios de *B. bassiana* que habían pasado por las boquillas, se pulverizaron 30 individuos adultos de *C. capitata* de 1 a 3 días de edad proporcionados por TRAGSA (Empresa de Transformación Agraria, S.A., S.M.E., M.P.) que se alojaban en dos placas Petri de 9 cm de diámetro cubiertas con una malla, 15 adultos por placa. Dichas placas se colocaron verticalmente sobre una barra y a una altura de 75 cm. Tras la pulverización, los individuos se anestesiaron con frío y se transfirieron a una jaula de plástico (80 x 80 x 60 mm) con la parte superior de malla, con alimento (mezcla de azúcar y extracto hidrolizado de levadura 4:1) y agua ad libitum. Las jaulas se colocaron en una cámara a 25 ± 2°C de temperatura, una humedad relativa del 60-70% y un fotoperiodo de 14:10 (L:D). En el estudio se consideró un control negativo en el que las moscas no fueron tratadas. La mortalidad de las moscas se siguió diariamente durante 8 días, anotando cada día el número de moscas muertas por jaula y calculando el porcentaje de mortalidad de las muertas acumuladas respecto a la población inicial.

2. 8. Análisis estadístico

Para el tratamiento de los datos obtenidos en cuanto al porcentaje de germinación conidial, mortalidad y los obtenidos en el perfil vertical, se realizaron ANOVAs simples utilizando como

factor la boquilla utilizada. En el caso del perfil vertical de pulverización, los análisis se llevaron a cabo por altura. Las diferencias significativas se basaron en el test LSD.

Para el tratamiento de datos de la caracterización de la distribución, se realizó un ANOVA simple utilizando como variables respuesta el número de impactos/cm^2 y el % de recubrimiento. El tamaño de los impactos en mm^2 se analizó mediante una gráfica de Box and Whiskers. En todos los casos se cumplían las condiciones de normalidad y homocedasticidad de los datos. Todas las pruebas se realizaron con un nivel de confianza del 95% y se llevaron a cabo con el programa Statgraphics 18 - X64.

3. Resultados

3.1. Caracterización de la deposición de las boquillas

El perfil de pulverización vertical de las boquillas en las diferentes posiciones se muestra en la Figura 1. Como se puede observar, el perfil vertical de las boquillas de mayor caudal (XR110-Amarilla, TVI80-Amarilla y ATR80-Naranja) es similar y dan lugar a la mayor cantidad de caldo depositado en las tres alturas. En la posición del medio, dichas boquillas presentaron una cantidad de caldo depositado significativamente mayor que las de menor caudal: TVI80-Naranja y ATR80-Marrón, así como una cantidad de caldo mucho mayor que en las alturas superior e inferior, haciendo que el perfil de pulverización sea más o menos simétrico y presente forma puntiaguda. Las boquillas de menor caudal también presentaron diferencias significativas entre ellas para las diferentes posiciones. La ATR-Marrón fue la que menor caldo depositó en la zona media y baja del perfil de pulverización, siendo la cantidad de caldo depositado similar en las tres alturas, mostrando un perfil prácticamente recto y vertical. Por su parte la boquilla TVI80-Naranja dio lugar a un perfil de pulverización asimétrico. En la zona superior la cantidad de caldo depositado fue menor, le siguió la zona baja y por último la zona central, presentando una forma curva en forma de panza ligera. En el colector del medio, que coincide en altura con las placas dónde se pulverizaron los individuos, la cantidad de conidios depositados fue: 1.22×10^5, 1.45×10^5, 2.89×10^5, 3.03×10^5 y 3.09×10^5 conidios/cm2 para las boquillas ATR80-Marrón, TVI80-Naranja, XR110-Amarilla, ATR80-Naranja y TVI-Amarilla respectivamente.

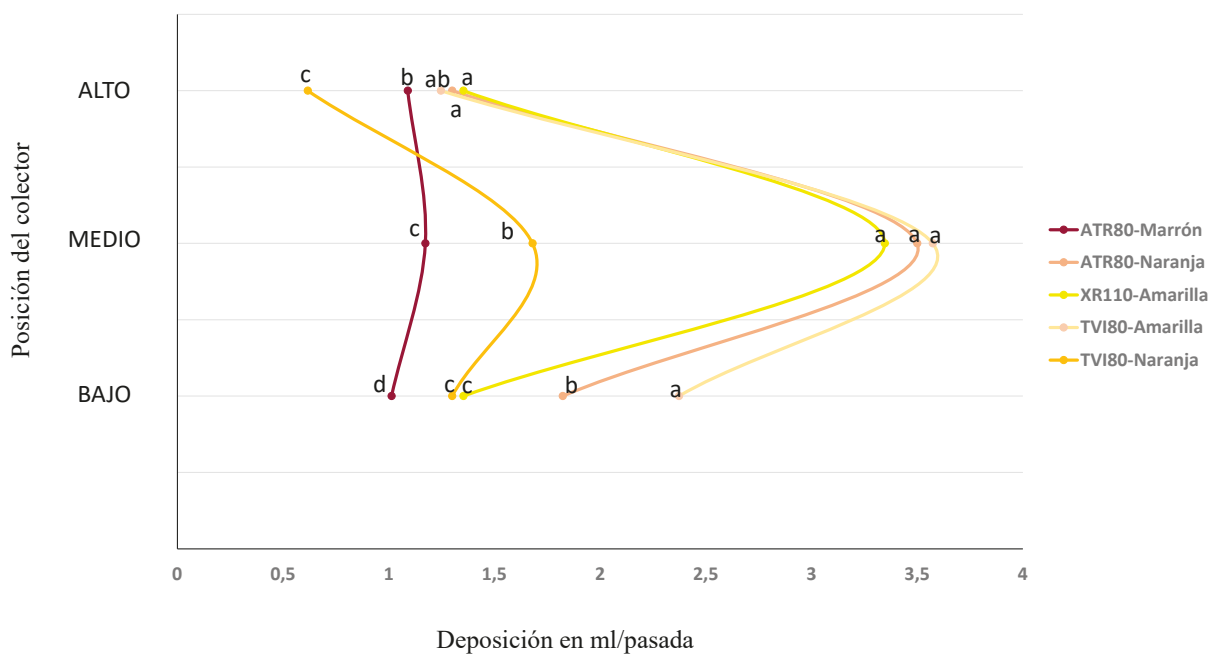


Figura 1: Perfil de pulverización de cada boquilla probada en tres alturas. Las letras minúsculas indican diferencias significativas obtenidas para cada una de las alturas mediante el test LSD de múltiples rangos, con un intervalo de confianza del 95%.

Los resultados de la caracterización de la deposición cualitativa mostraron diferencias significativas en las tres variables medidas (Tabla 2). En cuanto al porcentaje de recubrimiento, la boquilla ATR80-Naranja fue la que significativamente más recubrimiento presentó, alcanzando un valor de 94.94%, aunque todas se diferenciaron significativamente del resto. De manera similar también se encontraron diferencias significativas respecto a la densidad de impactos entre la mayoría de las boquillas excepto entre la ATR80-Naranja y la TVI80-Amarilla. Por el contrario, los resultados para el tamaño de los impactos solo mostraron diferencias significativas entre la boquilla ATR80-Naranja respecto al resto.

Tabla 2: Promedio del porcentaje de recubrimiento, de la densidad de los impactos y del area de los impactossobre papel hidrosensible de la pulverización para cada una de las boquillas estudiadas. Las letras minúsculas indican diferencias significativas obtenidas mediante el test LSD de múltiples rangos, con un intervalo de confianza del 95%.

Boquilla	Recubrimiento (%)	Densidad (impactos/cm²)	Area impactos (mm²)
	Promedio ± SE	Promedio ± SE	Promedio ± SE
ATR80-Marrón	54.72 ± 1.19d	41.75 ± 3.28a	1.31 ± 0.16b
ATR80-Naranja	94.94 ± 0.52a	0.78 ± 0.11d	121.56 ± 67.79a
XR110-Amarilla	66.65 ± 2.45c	19.43 ± 4.78c	3.43 ± 1.33b
TVI80-Naranja	49.7 ± 0.51e	32 ± 0.6b	1.54 ± 0.17b
TVI80-Amarilla	75.09 ± 1.14b	7.94 ± 2.5d	9.46 ± 5.31b

3.2. Evaluación de la viabilidad de los conidios de B. bassiana.

Todas las boquillas produjeron una reducción de la germinación de los conidios de *B. bassiana* respecto al control, pero solo presentaron una reducción significativa las dos boquillas ATR80 y la boquilla XR110 ($p<0.005$) (Figura 2). La germinación de los conidios con las boquillas TVI80 no presentaron diferencias significativas respecto a las demás boquillas. La mayor reducción de la germinación respecto al control se produjo en los conidios que habían pasado por la boquilla ATR80-Naranja, con una disminución del 3.15 ± 0.92%, seguida por la XR110-Amarilla y la ATR80-Marrón con una reducción del 3.1 ± 0.57% y 2.61 ± 0.82% respectivamente.

3.2. Evaluación de la infectividad de los conidios de B. bassiana.

El porcentaje de mortalidad en las aplicaciones de *B. bassiana* con las distintas boquillas fue significativamente mayor en comparación con el tratamietno control de moscas no tratadas ($p<0.005$) (Figura 2). La pulverización producida por la boquilla XR110-Amarilla fue la que obtuvo mayor porcentaje de mortalidad siendo superior al 95% y diferente significativamente al resto de boquillas. Le siguieron las boquillas TVI-Amarilla, la ATR80-Naranja y TVI80-Naranja que produjeron un porcentaje de mortalidad entre el 82-85%, mientras que la pulverización realizada con la boquilla ATR80-Marrón produjo el menor porcentaje de mortalidad, en torno al 70%, aunque no significativamente diferente a las tres boquillas intermedias (Figura 2).

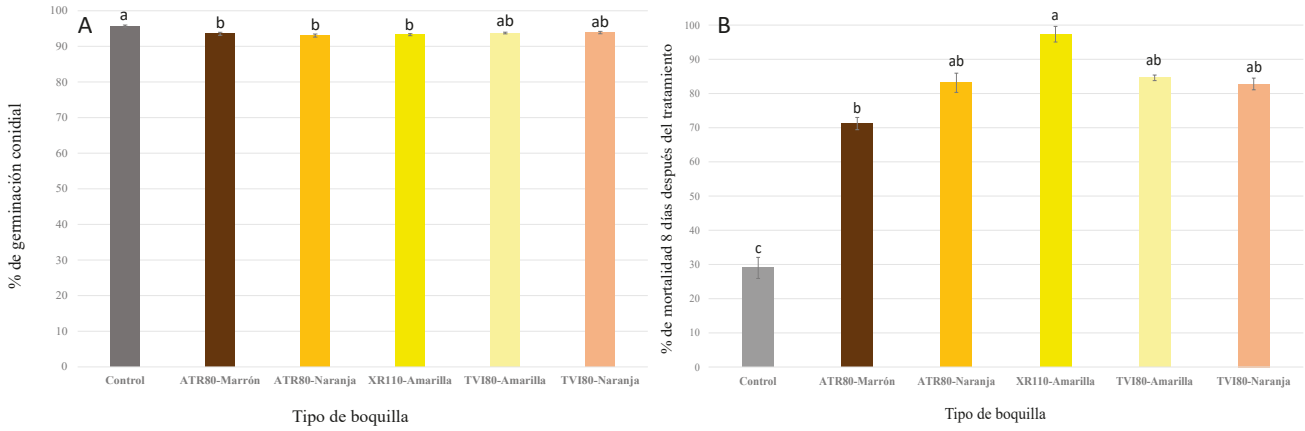


Figura 2: A. Promedio del porcentaje de germinación de los conidios de *B. bassiana* (± SE) tras pasar por cada una de las boquillas estudiadas. B. Promedio del porcentaje de mortalidad de los individuos de *C. capitata* (± SE) pulverizados con *B. bassiana* para cada una de las boquillas. Las letras minúsculas indican diferencias significativas obtenidas mediante el test LSD de múltiples rangos, con un intervalo de confianza del 95%.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio indican la importancia de la elección del tipo de boquilla para la distribución de productos a base de hongos entomopatógenos. En el estudio se ha observado que las boquillas evaluadas han reducido el porcentaje de germinación de los conidios, pero la cantidad de conidios viables es tan alta que no se observa una correlación con la infectividad. De hecho, con la boquilla XR110-Amarilla se produce la mayor reducción del porcentaje de germinación y presenta el mayor porcentaje de mortalidad. Parece haber cierta relación entre la cantidad de conidios/cm^2 y la mortalidad, requiriendo al menos un mínimo de dosis de conidio para que no afecte a la eficacia, puesto que la boquilla ATR80-Marrón, que es la que menor depósito consigue en la zona central donde se pulverizaban las moscas, es la que presenta una mortalidad de moscas significativamente inferior. La otra boquilla con caudal similar, la TVI80-Naranja, produce un depósito superior en la zona central, y en función de los resultados obtenidos, podríamos decir que suficiente para controlar la plaga, dado que la mortalidad conseguida en *C. capitata* no es significativamente mayor a la del resto de boquillas de mayor caudal y depósito. Es necesario profundizar en la investigación para explicar el hecho de que la boquilla XR110-Amarilla es la que mayor eficacia de control de *C. capitata* ha presentado.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del Proyecto FUNGITECH (PID2019-106336RR-I00) y la Generalitat Valenciana - Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (GVA-IVIA) a través del proyecto 52204C y fondos del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Roberto Beltrán-Martí agradece al INIA la beca FPI-INIA (PRE2020-096256), parcialmente apoyada por fondos FSE de la Unión Europea. Cruz Garcerá es beneficiaria de un contrato

postdoctoral DOC-INIA financiado por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Agroalimentaria (ref. DR2015-0318).

Los autores agradecen al Grupo Tragsa la colaboración en el suministro de moscas adultas y al Departamento de Entomología Agrícola de la Universidad de Córdoba su apoyo.

References

1. CUE. (Consejo de la Unión Europea y Consejo Europeo). 2022b. De la granja a la mesa. Disponible online: https://www.consilium.europa.eu/es/policies/from-farm-to-fork/ (consultado el 23/12/2022).
2. Sinha, K. K., Choudhary, A. K., & Kumari, P. 2016: Entomopathogenic fungi. In: Ecofriendly pest management for food security. 475-505. Academic Press. Cambridge, Massachusetts, United States.
3. Beris, E. I., Papachristos, D. P., Fytrou, A., Antonatos, S. A., & Kontodimas, D. C. 2013: Pathogenicity of three entomopathogenic fungi on pupae and adults of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). J Pest Sci. 86(2): 275-284.
4. Zimmermann, G. (2007). Review on safety of the entomopathogenic fungi *Beauveria bassiana* and *Beauveria brongniartii*. Biocontrol Science and Technology, 17(6), 553-596.
5. Jaronski, S. T. (2010). Ecological factors in the inundative use of fungal entomopathogens. BioControl, 55(1), 159-185.
6. Bateman, R. (1999). Delivery systems and protocols for biopesticides. In Biopesticides: use and delivery (pp. 509-528). Humana Press.
7. Fife, J. P., Ozkan, H. E., Derksen, R. C., & Grewal, P. S. (2007). Effects of pumping on entomopathogenic nematodes and temperature increase within a spray system. Applied Engineering in Agriculture, 23(4), 405-412.
8. Beltrán-Martí R., Garcerá C., Cuquerella J., Catalá L., Izquierdo H., Garrido-Jurado I., & Chueca P. (2022) Do hydraulic pumps of sprayers influence the performance *of Beauveria bassiana* (Balsamo) Vullemin as biocontrol agent?. Congreso Nacional de Entomología Aplicada. Málaga. 4-7 de Octubre.
9. Prithiva, J. N., Ganapathy, N., Jeyarani, S., & Ramaraju, K. (2019). Study on efficacy of Beauveria bassiana (Bb 112) formulations and validation of delivery equipments against Aphis gossypii on tomato. Journal of Applied Horticulture, 21(3), 231-236.Ramoska, W. A. (1984). The influence of relative humidity on Beauveria bassiana infectivity and replication in the chinch bug, Blissus leucopterus. Journal of Invertebrate Pathology, 43(3), 389-394.
10. Ru, Y., Liu, Y., Qu, R., & Patel, M. K. (2020). Experimental study on spraying performance of biological pesticides in aerial rotary cage nozzle. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 13(6), 1-6.
11. Gouli, V., Kassa, A., Skinner, M., & Parker, B. L. (2011). Fungal conidia distribution on chrysanthemum: varying spray parameters. Archives of Phytopathology and Plant Protection, 44(6), 567-574.
12. Xiao, L., Zhu, H., Wallhead, M., Horst, L., Ling, P., & Krause, C. R. (2018). Characterization of biological pesticide deliveries through hydraulic nozzles. Transactions of the ASABE, 61(3), 897-908.

Análisis de la siniestralidad por vuelco de tractor en el período 2017-2021

C. Jarén, G. Casuso, J.M. Mangado, A. López, P. Arnal, S. Arazuri

Departamento de Ingeniería, IsFOOD, Universidad Pública de Navarra; cjaren@unavarra.es

Resumen: A pesar de los avances que se dan en el ámbito de la seguridad laboral en el sector agrario, los accidentes se siguen produciendo sin que mejore la situación. Los accidentes más graves, por el elevado número de muertos todos los años, son los debidos al vuelco del tractor. En el presente trabajo se ha llevado a cabo el análisis de la influencia de distintas variables continuas y discretas (tamaño de explotación, pendiente, superficie agrícola utilizada (SAU)/número de explotaciones y tipo de cultivo) sobre 63 accidentes graves y mortales sucedidos en España a causa del vuelco. Han destacado las relaciones de los accidentes con las variables pendiente, tamaño y tipo de cultivo, siendo las provincias con mayor tasa de accidentalidad aquellas con explotaciones más pequeñas, situadas en terrenos más escarpados y con cultivos leñosos. Las variables con mayor relación entre sí han sido la pendiente y el tamaño, a su vez con cierta conexión con el tipo de cultivo.

Palabras clave: Accidentes, análisis espacial, factores de riesgo, Kruskall-Wallis, ROPS.

Abstract: Despite the progress that has been made in the field of occupational safety in the agricultural sector, accidents continue to occur without any improvement in the situation. The most serious accidents, due to the high number of fatalities each year, are those caused by tractor rollover. In this study, the influence of different continuous and discrete variables (farm size, slope, utilised agricultural area (UAA)/number of farms and type of crop) on 63 serious and fatal rollover accidents in Spain was analysed. The relationships of the accidents with the variables slope, size and type of crop were highlighted, with the provinces with the highest accident rates being those with the smallest farms, located on steeper terrain and with woody crops. The variables most closely related to each other were slope and size, in turn with some connection to the type of crop

Keywords: Accidents, spatial analysis, risk factors, Kruskall-Wallis, ROPS.

1. Introducción

Desde que en 1995 se promulgó la Ley 31/1995 (BOE nº269/1995), de Prevención de Riesgos Laborales, se ha observado una disminución importante de la siniestralidad laboral en todos los sectores. Sin embargo, en el sector agrario esta disminución no ha sido del calado de otros sectores y, por ejemplo, los índices de mortalidad se mantienen en el tiempo. Tal es así, que el sector agrario ha sido calificado por el Observatorio Estatal de Condiciones de Trabajo (OECT) como prioritario para el desarrollo de políticas preventivas eficientes que permitan reducir la siniestralidad en el sector en base al índice de accidentes graves y mortales ajustado por la población afiliada [1]. Los índices de incidencia en el sector agrario se sitúan casi todos los años por encima del índice de incidencia general. En el 2022 se situó en 4 140,9 frente al general que fue de 2 852,1. La clasificación por sectores en 2022, en función de la incidencia de sus accidentes de trabajo mortales, la encabeza el sector agrario, con 16,98, superando incluso al sector de la construcción [2], lo que supuso que los accidentes mortales en el sector agrario repuntaron el pasado año un 82,7%, con 95 fallecidos, 43 más que en 2021.

Si nos centramos en los accidentes mortales, la principal causa de muerte son los accidentes con el tractor, suponiendo prácticamente la mitad de las muertes según algunos estudios como el realizado en Illinois, EEUU [3]. A su vez, la mayoría de los accidentes mortales son debido al vuelco del tractor [4]. Según el informe de la Fundación MAPFRE sobre siniestralidad laboral en el sector agrario, el 75% de los fallecidos (880/1 172) se debieron al vuelco del tractor. Los factores que pueden provocar el vuelco del tractor son muchos y muy diversos. Aunque también es verdad que en muchos de los accidentes analizados se observa más de una causa. La mayor parte de los accidentes que terminan siendo mortales, se dan en tractores que carecen de estructuras de protección o las tienen inutilizadas [4]. Una vez que se produce el vuelco, la principal defensa del tractor para evitar que este ruede y aplaste al tractorista es la estructura de seguridad al vuelco o *Roll Over Protective Structures* (ROPS). El porcentaje de muertes disminuye considerablemente cuando los tractores que vuelcan cuentan con una estructura de protección homologada. El uso conjunto de ROPS y cinturón de seguridad podría salvar muchas vidas en el campo.

Otras características de los tractores que afectan claramente a una mayor siniestralidad son la potencia y la antigüedad de estos. Estos dos factores son muy significativos a la hora de comparar las diferencias de siniestralidad entre territorios. Así, la alta accidentalidad en Navarra se podría explicar por un parque de tractores que en su mayoría superan los 110 kW y muchos cambios de titularidad de tractores con más de 20 años de antigüedad. Sin embargo, en Cantabria o La Rioja los tractores que se adquieren son de menor edad y de potencias más reducidas. Los tractores modernos disponen de elevadas medidas de seguridad [6]. Sin embargo, el parque móvil de tractores en España se caracteriza por tener una edad media superior a los 20 años y carecer de ROPS [6].

Entre los factores que están presentes en los accidentes mortales con tractor están las características de la parcela y las salidas de vía en carretera y caminos realizando tareas de transporte y remolque [5]. La mayoría de los accidentes se dan cuando el agricultor se traslada de una zona a otra, caminos, carreteras y en terrenos más bajos [4]. Las parcelas más extensas, con pendientes menos pronunciadas y con un cultivo extensivo permiten unas condiciones más favorables para el trabajo y el agricultor tiene menor probabilidad de sufrir un accidente [6]. Otro de los factores es la diversidad de labores de la explotación, en los lugares de trabajo donde se realizan labores mixtas, la probabilidad de sufrir un accidente aumenta [7].

El momento en el que se produce más accidentes está relacionado con la época del año en la que la intensidad de trabajo es mayor, es decir a mediados de año, en verano; siendo más baja a principios y finales de año, en invierno [8]. El día con mayor número de accidentes es el jueves, aunque sin diferencias significativas entre los días laborales. Los días con menos, los fines de semana, aunque se producen más de los esperados en días no laborales [4].

Respecto a la culpabilidad de que sucedieran los accidentes, una investigación realizada en 2021 en Brasil sobre 60 accidentes, reveló que la mayoría de los accidentes procedían de un acto inseguro por parte del usuario. Es decir, teniendo conocimiento de técnicas de prevención y seguridad en el trabajo no las aplicaron, siendo muchos menos los casos en los que era fallo de la máquina y no error humano [9].

La nueva PAC ha incluido la ''condicionalidad social'' de las subvenciones, con un listado de normativa referente a la seguridad y salud en el trabajo. Su incumplimiento supondrá una reducción de la ayuda del 3% hasta el 100% como se recoge en el Artículo 9 de la Ley 30/2022 (BOE 1048/2022), de 23 de diciembre, por la que se regulan el sistema de gestión de la Política Agrícola Común y otras materias conexas.

Aunque han sido muchos los investigadores que han hecho y siguen haciendo análisis de la siniestralidad para encontrar sus causas y poder tomar las medidas oportunas, hay que seguir profundizando en ello para poder atajar esta lacra. Por eeso, en este trabajo nos proponemos analizar la influencia de otros factores como son: 1) la pendiente, 2) el tipo de cultivo, 3) la

formación del jefe de la explotación y 4) el tamaño de la explotación por provincias de los accidentes graves y mortales en el sector agrario.

2. Materiales y métodos

Los datos con los que se ha realizado el estudio se han obtenido a partir de las informaciones sobre accidentes graves y mortales con el tractor agrícola publicada en diferentes medios de comunicación entre los años 2017 y 2021. No se ha recurrido a los datos oficiales de siniestralidad laboral por incluir solo los accidentes laborales según la ley 31/1995, en la que quedan fuera muchos de los accidentes que se producen en este sector [4]. De esta misma fuente de información se ha obtenido el dato de la localización del accidente. El resto de variables analizadas (tipo de cultivo predominante, formación, tamaño de la explotación, superficie agrícola utilizada (SAU) y nº explotaciones) se han extraído del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2022) y se ha realizado su análisis por provincias. Por último, la información espacial, el mapa de provincias georreferenciado y el modelo digital del terreno (MDT) se ha obtenido del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, 2023). La pendiente, por su parte, se ha obtenido mediante el uso de herramientas SIG (sistemas de información geográfica) con el programa "QGIS 3.16 Hannover", con el que también se han generado todos los mapas.

Para el análisis de los datos, se ha procedido primero a filtrarlos de la base de datos original. Para las variables continuas (pendiente, formación, y SAU/nº de explotaciones) se han realizado regresiones lineales en Excel y calculado los coeficientes de correlación de cada una de ellas. Las variables discretas han sido analizadas con R Commander, el cual se ha utilizado para llevar a cabo la prueba de Kruskal-Wallis, ya que los datos no seguían una distribución normal. También se ha estudiado si existía correlación entre las variables independientes y, entre la que había, se ha realizado una regresión lineal múltiple.

3. Resultados y discusión

El número de accidentes graves o mortales con el tractor analizados ha sido de 62 con el resultado de muertes y uno grave. En la Figura 1 podemos ver los resultados de la relación entre el número de accidentes con el porcentaje de jefes de explotación que cuentan con formación y su distribución por provincias. Se puede observar como a medida que aumente la formación disminuye ligeramente el número de accidentes. En la derecha, podemos observar cómo provincias como las de Jaén, La Coruña y Lugo tienen un mayor número de accidentes y un bajo porcentaje de formación, mientras que regiones con mayores porcentajes de formación como Barcelona, Gerona, Álava y Huesca no han sufrido ningún accidente estos últimos cinco años, salvo en Barcelona con uno. Se ven excepciones como Zaragoza con un 7,7% de formados y tres accidentes y Málaga con 2,23% y cero accidentes. A pesar de ello, sí que se observa una pequeña tendencia a disminuir, con un coeficiente de correlación de -0,245, una cifra no muy significativa, pero teniendo en cuenta el tipo de datos que se analizan y el número, se puede considerar que sí influye la variable y presenta una tendencia a tener en cuenta.

La pendiente ha sido la variable continua con el valor absoluto de coeficiente de correlación más bajo, siendo únicamente de 0,09. En la Figura 2 se advierte una ligera tendencia al aumento conforme aumenta la pendiente, pero es demasiado leve como para poder considerarla significativa. En el mapa de la derecha se puede comprobar cómo hay provincias con cero accidentados y pendientes elevadas como Vizcaya y Cantabria, mientras que Badajoz, Murcia y Zaragoza tienen poca pendiente y tres accidentados cada una de ellas. Por otro lado, las tres provincias de mayor pendiente, que son Santa Cruz de Tenerife, Asturias y Guipúzcoa, tienen dos accidentes cada una de ellas y las tres más llanas, Valladolid, Palencia y Toledo no han tenido accidentes.

La variable continua SAU/nº de explotaciones se analizará conjuntamente con la variable discreta tamaño, ya que en ambas se pretende observar si una mayor atomización de las explotaciones está relacionada con un mayor número de accidentes. Esta ha sido la variable que ha presentado mayor grado de correlación, con un coeficiente de -0,4. En la Figura 3 se observa una tendencia notable a disminuir en zonas con explotaciones más extensas. En el mapa de la derecha se puede ver cómo regiones con mayor atomización de explotaciones, como las cuatro provincias gallegas y Valencia, presentan unas cifras de accidentados muy elevadas, en comparación con la zona de Castilla y León y Guadalajara que tendrían unas explotaciones más extensas y el número de accidentados es prácticamente nulo.

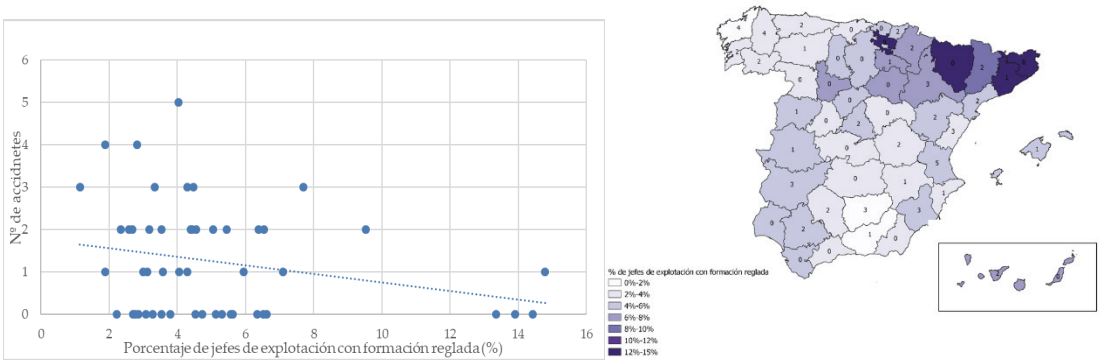


Figura 1. Izda. Regresión lineal entre el nº de accidentes y el porcentaje de jefes de explotación con formación reglada. Dcha. Mapa de clasificación de las provincias en función del porcentaje de jefes de explotación con formación reglada.

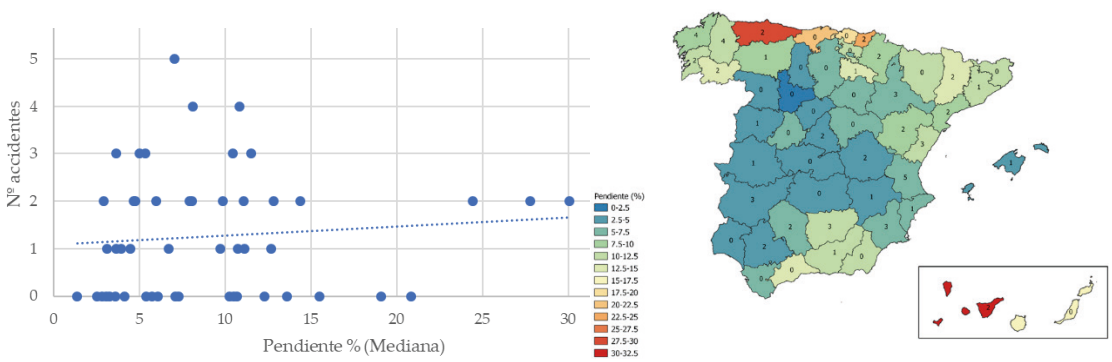


Figura 2. Izda. Regresión lineal entre el nº de accidentes y la mediana de la pendiente. Dcha. Mapa de clasificación de las provincias en función de la mediana de la pendiente.

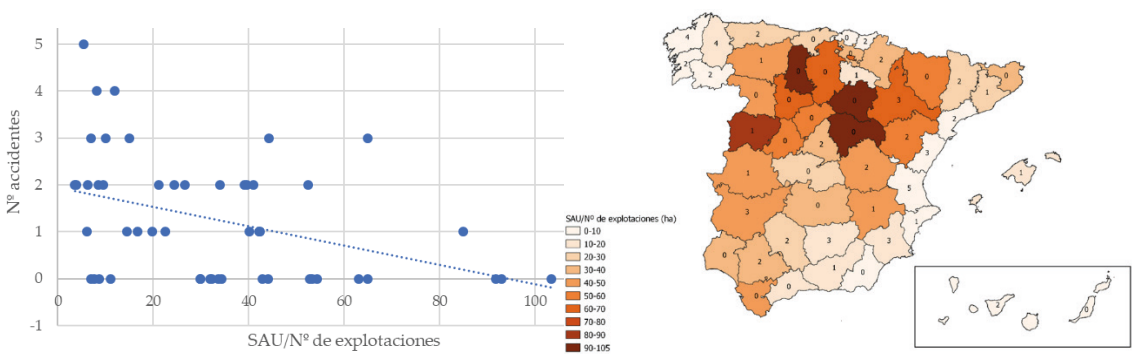


Figura 3. Izda**.** Regresión lineal entre el nº de accidentes y SAU/nº de explotaciones de cada provincia. Dcha. Mapa de clasificación de las provincias según SAU/nº de explotaciones.

Respecto al tamaño, presenta un p-valor de 0,051, por lo que se rechaza la hipótesis nula, verificando una vez más lo observado en el análisis del SAU/nº de explotaciones. La zona de

Castilla y León donde se presentan explotaciones más extensas, el número de accidentes es muy bajo, mientras que la zona del Levante y Galicia con explotaciones predominantes de menos de 2 hectáreas junto a las de entre 2 y 10 ha, tienen las cifras más elevadas de accidentalidad (Figura 4). Las provincias con explotaciones de entre 10 y 50 ha, tienen valores similares a los que presentan aquellas que se encuentran en el rango de 2 a 10 ha. Siendo los valores brutos de 24 accidentes sobre 19 provincias que presentan estas características.

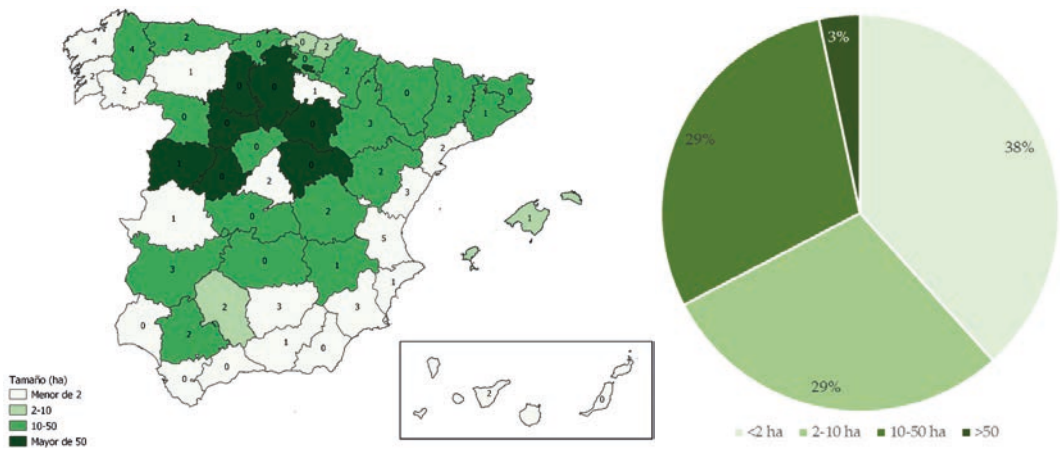


Figura 4. Mapa de clasificación de las provincias en función del tamaño predominante en las explotaciones de cada provincia y porcentaje de accidentes para cada tramo de tamaño.

La variable tipo de cultivo ha dado un p-valor de 0,1, para un nivel de significación del 0,05, por lo que no hay relación entre variables. Sin embargo, atendiendo a lo comentado con anterioridad en cuanto al número de datos con los que se trabaja y analizando de manera visual el mapa de la Figura 5, sí que se observa una cierta relación entre la variable explicada y la explicativa, aunque quizás por el número de datos no sea estadísticamente significativa al 95%. Se observa que los cultivos leñosos son los más peligrosos, seguidos de los pastos y, por último, de las tierras arables, debido principalmente a que se sitúan en parcelas más peligrosas para el trabajo con el tractor.

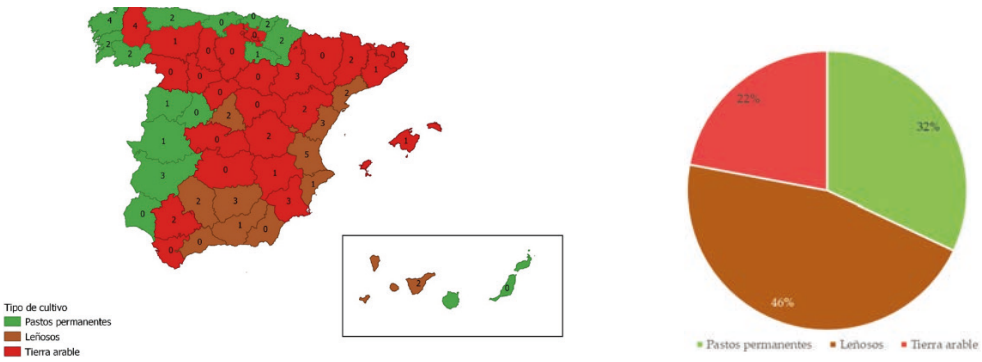


Figura 5. Mapa de clasificación de las provincias en función del tipo de cultivo que ocupa mayor SAU y diagrama sectorial de las tasas de accidentes para cada tipo de cultivo.

La correlación más significante encontrada entre las variables ha sido entre la pendiente y el tamaño. El análisis de regresión lineal múltiple, entre el número de accidentes en función de la pendiente y la SAU/nº explotaciones ha tenido como resultado un coeficiente de correlación múltiple de 0,42, junto a un R^2 ajustado de 0,17. Serían valores que no permitirían confirmar una relación entre ambas variables. Sin embargo, si observamos la gráfica de la Figura 6 se comprueba cómo a mayor superficie por explotación menor es la pendiente, con un coeficiente de correlación de -0,49, por lo que se puede concluir que las zonas con explotaciones más extensas tienen una menor pendiente y, por lo tanto, esas regiones reúnen dos características que reducen el grado de accidentalidad.

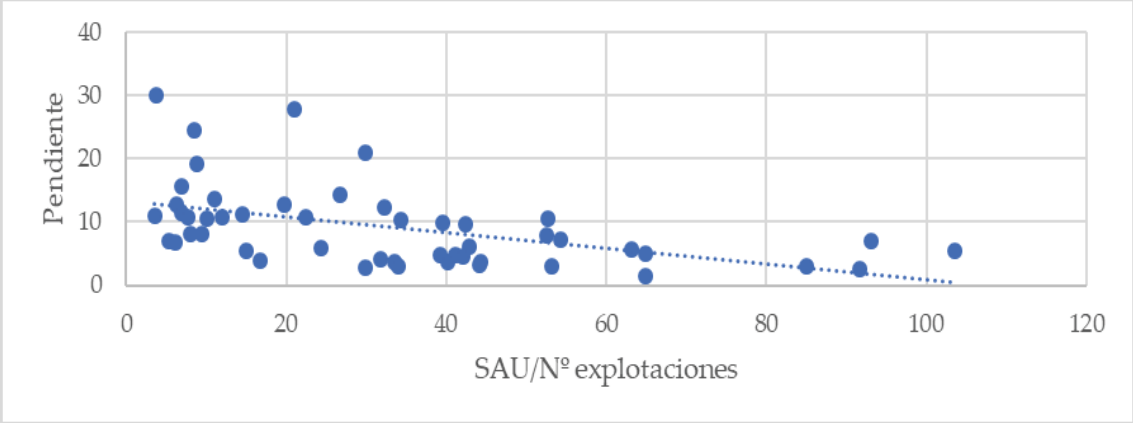


Figura 6. Regresión lineal entre las variables pendiente y SAU/nº de explotaciones.

4. Conclusiones

La formación ha tenido una leve influencia en el nº de accidentes, siendo notable la diferencia entre las regiones con agricultores con mayor formación y regiones con agricultores con menor formación. A pesar de ello, el nivel de formación general sigue siendo bajo. Se podrían asociar las zonas de mayor formación con las que disponen de más recursos.

La pendiente no ha tenido la influencia esperada en los análisis estadísticos, pero observando los mapas realizados en QGIS y las causas de los accidentes, se ha podido concluir que sí que es un factor del que depende el número de accidentes.

El tamaño se ha analizado en forma de variable discreta y continua, obteniendo resultados similares en ambas, lo más remarcable ha sido la gran diferencia entre las provincias con mayor atomización y las más extensas, siendo estas últimas las que menos accidentes han presentado.

El tipo de cultivo ha sido una variable con influencia, siendo los leñosos los cultivos más peligrosos, seguidos de los pastos y por último las tierras arables.

Las únicas dos variables independientes que han presentado algún tipo de correlación han sido la pendiente y el tamaño, dejando como conclusión que los cultivos extensivos en parcelas de gran superficie y poca pendiente son las más seguras.

Referencias

5. Valero, E. y Abril, I. Diagnóstico de la prevención de riesgos laborales en el sector Agrario. Seguridad y Salud en el trabajo. 2016, 87, 18-25.
6. CCOO. Análisis de las estadísticas de accidentes de trabajo y enfermedades profesionales en España en 2022. 2023, 49 pp.
7. Li, S., Guy Roger, A., Robert, A., y Issa, S.F. Farm fatal injury trends in Illinois from 1999 to 2019. Journal of Agricultural Safety and Health. 2022, 28(2): 99-108.
8. Arnal, P.V. Análisis de la información sobre accidentes en el sector agrario recogida en los medios de comunicación en el decenio 2004 a 2013.Tesis Doctoral. UPNA. 2017
9. Mapfre. Siniestralidad, mortalidad agrícola, vuelcos de tractores e incendios en cosechadoras 2010-2019. Fundación MAPFRE. 2020.
10. Jarén, C., Ibarrola, A., Mangado, T., Adin, A., Arnal, P., López-Maestresalas, A., Ríos, A., & Arazuri, S. Fatal Tractor Accidents in the Agricultural Sector in Spain during the Past Decade. Agronomy. 2022, *12*(7), 1694.
11. Wysokiński, M. Accidents in agriculture as a socioeconomic problem. Logistyki. 2015, 2, 824-830.
12. Angioloni, S., & Jack, C. Farm fatalities in Northern Ireland agriculture: What fifty years of data tell us. Economics & Human Biology. 2022, 46, 101122.
13. De Oliveira Guinot, K., et al. Diagnóstico de acidentes de trabalho com tratores agrícolas no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Tecno-Lógica. 2021, *25*(2), 300-304.

Estado actual de la protección frente al vuelco de quad

R. Cano[1]

[1] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). Sevilla
rafael.cano@insst.mites.gob.es

Abstract: This paper deals with quad rollover during agricultural operations, the injuries that it may cause to the operator and the state-of-the-art options to minimize such injuries. The approach to this issue is presented from a legal point of view, considering European regulations and directives applicable to the placing on the market of products, as well as from a technical standardization point of view in terms of the safety specifications to be considered in the design of the quad. It is also important to highlight the requirements of occupational health and safety legislation regarding the rollover of mobile equipment. In addition, it describes the administrative procedure followed so far with a view to seeking the most appropriate solution through the channels provided for in the framework of the European Union and the stages to be developed in the future. The option adopted in Australia and the European approach in view of the existing legislation are presented, arriving at a solution consisting of a rollover protection system incorporated in the quad and individual protection worn by the operator.

Palabras clave: agricultura, seguridad, vehículo, máquina, aplastamiento

1. Introducción

Cada vez está más extendido el uso del quad para realizar tareas agrícolas debido a que su versatilidad y polivalencia hacen que sea muy útil (figura 1).



Figura 1. Usos del quad en agricultura

2. Accidentalidad

El vuelco de quad puede ocasionar lesiones graves al operador, o incluso la muerte, cuando es lanzado fuera del asiento e impacta contra el suelo o cuando es atrapado bajo el quad. Los datos de las autoridades franceses y alemanas indican que se produce anualmente una muerte y varias decenas de heridos de diversa consideración debido al vuelco de quad.

3. Planteamiento legal y normalización técnica

Para abordar el problema de la protección frente al vuelco debe realizarse un planteamiento general basado en la legislación vigente y en el progreso técnico actual.

En primer lugar, los aspectos referidos a reglamentos, directivas y normas armonizadas que se aplican a la comercialización o puesta en el mercado de estos productos y también habría que tomar en consideración la fase de utilización, en particular la legislación de seguridad y salud en el trabajo. Y a esto hay que aportar el progreso técnico, es decir, nuevas opciones del estado del arte para la protección frente al vuelco. Finalmente, una vez resuelto lo anterior, debería plantearse el equipamiento de la protección en equipos en uso, lo que en terminología inglesa se conoce como retrofitting, y en concreto, las posibilidades de equipamiento en España.

Es conveniente efectuar este planteamiento con vistas a ordenar las ideas debido a la diversidad de reglamentos, directivas y normas armonizadas, junto con el progreso técnico, que confluyen en el mismo asunto. Así, tendremos finalmente un esquema de partida para conocimiento del sector (usuarios, fabricantes y autoridades).

Y con este esquema de partida facilitar la reflexión y el debate sobre este tema con el fin de llegar a la adopción de aquellas medidas que se estimen más convenientes, compaginando la legislación y el progreso técnico. Y si finalmente estas medidas se adoptan, llevarlas a la práctica para hacer una prevención efectiva.

El primer punto de este planteamiento está referido a la comercialización de los equipos nuevos. Cuando el quad se trata como vehículo puede tener dos opciones de homologación dependiendo del uso previsto por el fabricante. Puede ser el Reglamento 167 [1], en cuyo caso el quad es un tractor (quad-tractor) o el Reglamento 168 [2], el quad es un cuatriciclo (quad-cuatriciclo). Pero también existe una tercera vía de comercialización que es la Directiva 2006/42/CE, de máquinas [3], transpuesta al derecho español mediante el Real Decreto 1644/2008 [4], y sería un quad-máquina. Cuando se habla de reglamentos de homologación se hace referencia a vehículos, que pueden circular por la vía pública. En el caso de aplicar la Directiva de máquinas el quad no podría circular por vía pública. En estas tres disposiciones legales de comercialización el legislador ha establecido un conjunto de requisitos para la protección frente al vuelco.

Si se consulta el anexo I de la Directiva de máquinas, puede encontrarse que la pérdida de estabilidad de las máquinas móviles se considera en el requisito esencial de seguridad y salud 3.4.3 con el título "Vuelco o inclinación". Según este requisito esencial: "si existe riesgo de vuelco o inclinación, la máquina debe estar provista de una estructura de protección adecuada que proporcione al operador un volumen límite de deformación adecuado".

A su vez, la Guía europea para la aplicación de la Directiva de máquinas [5], que desarrolla el texto del RESS 3.4.3, contiene en primer lugar unas definiciones que permiten entender cómo la Directiva de máquinas aborda la protección frente al vuelco, distinguiendo las situaciones de inclinación o de vuelco. Para la Directiva de máquinas la inclinación es un giro de la máquina no superior a 90°, es decir, no superior a un cuarto de vuelta. El vuelco es un giro de la máquina de 180°, es decir, la máquina queda boca abajo. En estas circunstancias la Guía europea indica que el operador puede ser lanzado fuera de la máquina o aplastado por la propia máquina y por tanto es necesaria la adopción de medidas de protección.

Tras las definiciones de vuelco y de inclinación, la Guía europea establece las medidas que pueden adoptarse y menciona dos tipos de estructuras de protección. Las estructuras tipo TOPS que son aquellas que impiden que la máquina gire más de 90°, y las estructuras tipo ROPS que son las que protegen en caso de giro de 180°, es decir, en caso de vuelco.

También recoge la Guía europea que, tanto si se utiliza las TOPS como las ROPS, el operador debe permanecer retenido en el puesto de conducción. Para nuestro ámbito este requisito significa que debe existir un cinturón de seguridad que actúe como medio de retención.

La Guía europea comenta algunos temas de carácter técnico. En primer lugar, indica que si las TOPS o las ROPS se comercializan como componentes independientes son consideradas componentes de seguridad, estando incluidas en el anexo V de la Directiva de máquinas que proporciona un listado de tales componentes de seguridad. En segundo lugar, menciona que las estructuras de tipo TOPS no están incluidas en el anexo IV de la Directiva de máquinas y por tanto estas estructuras son autocertificadas por el fabricante y, en cambio, las ROPS están incluidas en dicho anexo IV y por ello la certificación requiere la intervención de un organismo notificado. En resumen, tanto TOPS como ROPS están sujetas a marcado CE desde el punto de vista de la Directiva de máquinas.

Retomando el texto del RESS 3.4.3 "Vuelco e inclinación" para comentar la siguiente frase: "la máquina debe estar provista de estructura de protección adecuada, salvo si ello incrementa el riesgo". Para conocer con más detalle su significado es preciso consultar la Guía europea dónde menciona casos en los que la estructura de protección podría incrementar el riesgo de vuelco e inclinación haciendo referencia en concreto a aquellas estructuras que se instalan en máquinas de masa pequeña y lo razona diciendo que esta estructura, en unión con la máquina, podría elevar de forma significativa la posición del centro de gravedad del conjunto máquina-estructura respecto a la posición del centro de gravedad si solo se considera la máquina. Mayor altura del centro de gravedad significa más proximidad de la fuerza resultante aplicada a la línea de estabilidad del vuelco. Esa es la justificación empleada para las máquinas de masa pequeña, por la cual se está diciendo que podría incrementar el riesgo de vuelco si se instalara una estructura de protección, sea la que fuera.

También puede añadirse otro comentario, en este sentido, que se refiere al valor límite de masa de la máquina debajo del cual no se acepta la instalación de estructuras de tipo ROPS. Es el límite de los 400 kg, un valor que el legislador decidió a partir de un estudio en el que se analizó el comportamiento de estas estructuras en máquinas cuya masa estaba comprendida entre 330 kg y 600 kg. El legislador eligió el valor de 400 kg para establecer ese límite. Por debajo de ese límite las estructuras tipo ROPS no pueden ser certificadas.

En cuanto al RESS 3.4.3, pero también en relación con la estabilidad de la máquina móvil, hay otro requisito esencial que es aplicable. Se trata del RESS 3.2.2 con el título de "Asientos" que establece lo siguiente: "Cuando exista un riesgo de proyección del operador fuera de su asiento, si la máquina vuelca o se inclina, y esto pueda provocar el impacto del operador contra el suelo o su aplastamiento bajo la máquina, el asiento debe disponer de un dispositivo de retención que mantenga al operador en su asiento". Este dispositivo de retención en nuestro caso es el cinturón de seguridad y añade también la frase: "Dicho dispositivo de retención no deberá instalarse si incrementa el riesgo de vuelco o inclinación".

Al consultar, de nuevo, la Guía europea para profundizar en el concepto de cinturón de seguridad y de su uso, se encuentran descritos casos en los que puede ser impracticable instalar cinturón de seguridad, por ejemplo, en las máquinas que aplican conducción activa, que sería el caso del quad que nos ocupa. El quad no lleva cinturón de seguridad porque entorpecería la conducción activa.

En relación con la normalización técnica debe citarse la norma EN 15997 [6] (norma armonizada del ámbito de la Directiva de máquinas, que especifica los requisitos de seguridad y métodos de ensayo que dan la presunción de conformidad con los requisitos esenciales de seguridad y salud de dicha Directiva) en la que el riesgo de vuelco se aborda de forma incompleta.

Esta es la situación en cuanto a la aplicación de la Directiva de máquinas.

La homologación de vehículos agrícolas y forestales según el Reglamento 167/2013, es aplicable a los tractores. Esta homologación basa la protección frente al vuelco en la utilización de estructuras de tipo ROPS y ya se ha comentado que se homologan sin ROPS aquellos tractores cuya masa sea 400 kg o inferior. En resumen, la protección frente al vuelco se basa en estructuras

ROPS, no considerándose en este Reglamento la posibilidad de homologación de una estructura TOPS.

Finalmente, según el Reglamento 168/2013, aplicable a la homologación de cuatriciclos, sólo los vehículos de asientos yuxtapuestos disponen de ROPS y cinturón de seguridad (subcategoría L7e-B2). Tampoco se contempla en este reglamento la posibilidad de homologación de una estructura de tipo TOPS.

Lo anterior está referido a la homologación del quad como vehículo o a su certificación como máquina.

En cuanto a la legislación de seguridad y salud, se exige ROPS o TOPS con sistema de retención y debe tenerse presente que el origen de esta exigencia es proporcionar el sistema de protección más eficaz, es decir, la combinación de una estructura de protección y un sistema de retención. Pero no todos los equipos móviles, sean certificados u homologados, van a cumplir estos requisitos establecidos en el apartado 2.1d del anexo I del Real Decreto 1215/1997 [7]. En concreto, son los equipos de masa pequeña (tractores y máquinas de menos de 400 kg) y los equipos que requieren conducción activa.

4. Progreso técnico

El segundo punto del planteamiento general es el progreso técnico que ofrece opciones nuevas y no tan nuevas del estado del arte. En particular, diferentes sistemas que pretenden la protección frente al vuelco de quad. Podemos nombrar los OPD (dispositivos de protección del operador), también conocidos como CPD (dispositivos de protección contra el aplastamiento). Dentro de estos dispositivos están el Lifeguard (un arco flexible, figura 2), el Quadbar (dos barras paralelas conformando una horquilla, figura 3) y el Flexiquadbar (una sola barra dotada de un punto de flexión, figura 4). Todos estos productos son utilizados en Australia. También puede citarse el Safety Arch (arco de seguridad, figura 5) que lleva muchos años empleándose en Israel y que se cataloga como ROPS. En Europa disponemos del AR-Quad (figura 6), de fabricación española, comercializado como TOPS, que consiste en una estructura que permanece plegada cuando está en situación de reposo y que en caso de que el ángulo de inclinación alcance un valor crítico se despliega de forma automática para proporcionar protección al operador. Se trata de dispositivos y estructuras que ahora mismo están en el mercado, fuera de la Unión Europea y dentro de ella, porque cumplen determinados requisitos de seguridad para poderlos comercializar.


Figura 2. Lifeguard


Figura 3. Quadbar

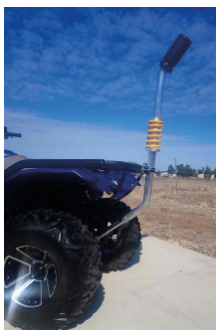

Figura 4. Flexiquadbar



Figura 5. Safety Arch



Figura 6. AR-Quad

A continuación, se expone la solución adoptada en Australia para mejorar la protección del conductor de quad en caso de vuelco. El primer paso es exigir que el diseño del quad cumpla la norma EN 15997. A continuación, se exigen requisitos mínimos de estabilidad estática lateral, hacia delante y hacia atrás (quad colocado sobre una plataforma giratoria y medición del ángulo para el que el quad se separa de la plataforma, obteniéndose el ángulo de giro lateral, hacia delante y hacia atrás) y la instalación de un CPD en el quad. En cuanto al operador se exige que lleve puesto un casco de protección. Todo ello va acompañado finalmente de una etiqueta de advertencias (figura 7) y de la información de los resultados de los ensayos de estabilidad estática (figura 8). Estos valores permiten la comparación entre modelos de quad. Los modelos cuyos ángulos son mayores presentan mayor estabilidad estática.



Figura 7. Advertencias



Figura 8. Estabilidad estática

En cuanto a la protección de la cabeza, existe la posibilidad de utilizar un casco ligero que cumple la norma NZS 8600 (casco para operador de quad, figura 9) siempre que se cumplan determinadas restricciones de uso, por ejemplo, el límite de velocidad del quad.



Figura 9. Casco ligero

Los dispositivos CPD están diseñados para evitar que el conductor quede inmovilizado debido a que el quad le cae encima al volcar. La altura del CPD es un aspecto importante para considerar en el diseño ya que debe impedir que el dispositivo impacte contra un obstáculo situado por encima de la cabeza del conductor y tenga lugar un vuelco hacia atrás. Para ello, se limita esa altura o se coloca un punto de flexión en la barra.

En Europa, se comercializan el Lifeguard y el AR-quad, ambos con su correspondiente marcado CE. Por tanto, cumplen los requisitos exigidos por la Directiva de máquinas. En el caso del quad, la estructura tipo ROPS no es practicable porque no se cumple el requisito de masa (400 kg) y el cinturón de seguridad tampoco por impedir la conducción activa. Sin embargo, la estructura tipo TOPS o la estructura de despliegue automático podrían considerarse como soluciones alternativas.

5. Procedimiento administrativo

Tras analizar la situación en cuanto a sus aspectos legales y de normalización técnica, así como en lo que respecta al estado del arte, debe iniciarse un procedimiento para la inclusión, si procede, de las modificaciones que se estimen pertinentes en directivas, reglamentos y normas armonizadas. Es el paso lógico para que las nuevas formas de protección sean consideradas en la legislación.

El procedimiento fue iniciado en el seno del Grupo Especializado de Maquinaria Agrícola de ADCO (cooperación administrativa para la vigilancia del mercado en el ámbito de la Directiva de máquinas). España (a través del INSST) presentó un documento exponiendo el problema, proponiendo la revisión de la norma armonizada EN 15997 y adjuntando los detalles técnicos de cada una de las opciones que en estos momentos están disponibles. En una segunda etapa, se preparó un documento reducido que incluía únicamente los aspectos de tipo legal, excluyendo los detalles técnicos. Los representantes de Francia (Ministerio de Agricultura) aportaron un análisis de los accidentes en su país, llegando finalmente a un documento conjunto franco-español que se presentó al Grupo Especializado y constituyó la posición final de dicho Grupo. Por su parte, Francia decidió utilizar el mecanismo de la objeción formal a la norma EN 15997, que fue presentada en la reunión del Grupo de Trabajo sobre Máquinas. A favor de esta objeción formal votaron Francia, España, Alemania e Irlanda, mientras que el resto de los Estados Miembros se abstuvieron. En estos momentos la decisión final está en manos de la Comisión Europea.

6. Conclusiones

Tras el proceso ejecutado hasta ahora se ha conseguido tener un conocimiento detallado del riesgo de vuelco de quad, de las lesiones que puede ocasionar al operador y de las opciones para afrontar este problema. El siguiente paso será plantear el debate técnico en el Comité Europeo de Normalización para decidir los cambios que los expertos consideren oportunos en la norma EN 15997 con el fin de establecer especificaciones técnicas para los sistemas de protección. Esto puede hacerse mediante la revisión sistemática de esta norma o una revisión de urgencia si la objeción formal fuera acordada. Dependiendo de las decisiones que se adopten, las actuaciones podrán afectar a la comercialización de nuevos tipos de quad y las autoridades nacionales deberán decidir, en su caso, el procedimiento a seguir para equipar los quad en uso con un sistema de protección frente al vuelco.

Referencias

14. Reglamento (UE) nº 167/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de febrero de 2013, relativo a la homologación de los vehículos agrícolas o forestales, y a la vigilancia del mercado de dichos vehículos.
15. Reglamento (UE) nº 168/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2013, relativo a la homologación de los vehículos de dos o tres ruedas y los cuatriciclos, y a la vigilancia del mercado de dichos vehículos.
16. Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2006, relativa a las máquinas.
17. Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.
18. Guide to the application of the Machinery Directive 2006/42/EC. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.
19. EN 15997 Vehículos todo terreno (ATV - Quads). Requisitos de seguridad y métodos de ensayo.
20. Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.

Registro de accidentes de tractores y maquinaria agrícola y forestal

T. Ruiz[1], R. Cano[1]

[1] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). Sevilla
tamara.ruiz@insst.mites.gob.es
rafael.cano@insst.mites.gob.es

Abstract: The agricultural sector has high accident rates, whereas many of these accidents are related to tractors and the agricultural and forestry machinery used. However, the current reporting system of accidents at work does not provide sufficiently detailed information to make it possible to propose and implement more specific and effective preventive actions aimed at reducing the accident rate.
The National Institute for Safety and Health at Work has developed a methodology for recording data from accidents involving tractors or agricultural and forestry machinery, consisting of a form and an application guide, based on the standard EN 16831:2016. The implementation of this form, and the subsequent analysis of the recorded accident data, would provide more detailed information concerning which type of equipment is most often implicated in these types of accidents, allowing to detect possible technical and performance problems of this equipment, its potential misuse, deficiencies regarding its protections and safety devices, to mention but a few. Thus, this methodology would provide conclusions, facilitating the identification of weaknesses and the design of more specific and effective strategies and measures to improve working conditions in the agricultural sector and health and safety during the use of this work equipment.

Palabras clave: agricultura, seguridad, prevención, máquina.

1. Introducción

El sector agrario presenta unos elevados índices de siniestralidad, estando muchos de los accidentes relacionados con los tractores y la maquinaria agrícola y forestal utilizada. Sin embargo, los sistemas de notificación actuales (Sistema Delt@) no proporcionan información lo suficientemente detallada que posibilite proponer e implantar acciones preventivas más específicas y eficaces encaminadas a reducir la siniestralidad.

Esta deficiencia de información acerca de los accidentes asociados a tractores y maquinaria agrícola y forestal es algo común a todos los países europeos, al basarse en una metodología estadística de índole europea. Por este motivo, la Asociación Europea de Fabricantes de Maquinaria Agrícola (CEMA) y diversos organismos europeos relacionados con el aseguramiento de accidentes y la prevención de riesgos laborales (INAIL en Italia o DGUV en Alemania) impulsaron en 2014 una iniciativa para elaborar una norma destinada al registro de accidentes de tractores y maquinaria agrícola y forestal, con el fin de solucionar la carencia de información sobre estos accidentes y hacer comparables los datos de accidentalidad relacionada con estos equipos en la Unión Europea.

De acuerdo con sus propuestas, el Comité Técnico CEN/TC144 elaboró en su momento la norma EN 16831:2016 [1], que con posterioridad ha sido publicada por UNE como UNE-EN 16831:2017 [2]. Esta norma establece un formato uniforme para el registro de los datos de los accidentes de tractores y maquinaria agrícola y forestal, por parte de todas las partes interesadas

(autoridad laboral, organismos de prevención de riesgos laborales, servicios de prevención, mutuas de accidentes, fabricantes, asociaciones profesionales, etc.).

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) ha elaborado una metodología para el registro y análisis de estos accidentes basada en la Norma UNE-EN 16831:2017. Para su elaboración, además de las citadas normas, se ha tenido en cuenta también la norma UNE-EN ISO 12100:2012 [3], la Directiva 2006/42/CE [4] y la Guía para la aplicación de la Directiva 2006/42/CE relativa a las máquinas [5].

2. Materiales y métodos

La metodología seguida consta de las siguientes fases:

- Fase 1: Elaboración del formulario y de una guía de aplicación del cuestionario, basados en la norma UNE-EN 16831:2016. La guía contiene información acerca de la estructura del cuestionario y definiciones de las diferentes secciones y códigos, con el objetivo de facilitar su cumplimentación.
- Fase 2: Constitución del grupo de trabajo. Con el fin de poder validar la metodología se consideró necesario establecer una colaboración con varias entidades que pudieran estar interesadas en registrar accidentes en los que hubiera estado implicado un tractor o una máquina agrícola o forestal. Para ello, se contó con la participación de la Inspección de Trabajo y Seguridad Social, varias mutuas colaboradoras de la Seguridad Social, organismos de prevención de las comunidades autónomas, un servicio de prevención propio, así como miembros del Comité Técnico de Normalización de UNE, CTN 68 – Tractores y maquinaria agrícola y forestal, a título individual.
- Fase 3: Desarrollo de un formulario web para el registro de los accidentes. Con el objetivo de facilitar el registro de los datos y su posterior sistematización por parte de los miembros del grupo de trabajo, se elaboró un formulario web.
- Fase 4: Registro de accidentes por parte de las entidades participantes en el grupo de trabajo. Durante esta fase las entidades participantes aplicaron el cuestionario a los accidentes registrados a lo largo del año 2021. Adicionalmente, se registraron algunos accidentes durante el año 2022, así como durante años anteriores a 2021.
- Fase 5: Análisis de la información registrada. A continuación, se procedió a analizar la información registrada, tras la creación de una base de datos a partir de los accidentes registrados.
- Fase 6: Propuesta de corrección de códigos de algunos de los accidentes registrados y solicitud de información. Tras detectar alguna información contradictoria, se elaboró una propuesta de corrección de códigos de algunos de los accidentes registrados, así como una solicitud de información de algunos de los accidentes analizados. Esta propuesta y solicitud de información se envió a las entidades participantes que registraron dichos accidentes a la espera de su confirmación y envío de comentarios e información adicional.
- Fase 7: Elaboración de la versión definitiva del formulario y de la guía de aplicación. Tras revisar la información recibida se completó la base de datos y se elaboró una versión definitiva de la guía de aplicación del cuestionario en vistas a su publicación, junto con los resultados de la validación.

3. Resultados y discusión

La base de la metodología es un formulario de registro basado en la norma UNE-EN 16831:2017. Sin embargo, a diferencia de la norma, que proporciona dos modelos de informe separados, uno para la información de carácter público y otro para los datos confidenciales, en el modelo de formulario desarrollado por el INSST se ha elaborado un único modelo, prescindiendo

de recoger datos de carácter confidencial (nombre y dirección de la víctima, nombre y dirección de la persona propietaria de la máquina, nombre y dirección del empresario, etc.).

Por otro lado, en la guía de aplicación se incluyen las tablas de códigos, igualmente basadas en las que recoge la norma, y definiciones tanto de cada sección del formulario como de cada uno de los códigos incluidos en las tablas.

El cuestionario diseñado, para el registro de accidentes de tractores y maquinaria agrícola y forestal, consta de 3 partes:

- Parte A. Identificación del accidente
- Parte B. Información técnica
- Parte C. Descripción del accidente

Parte A. Identificación del accidente

La primera parte recoge la información necesaria para identificar el accidente concreto, agrupada en tres secciones:

A.1. Código del accidente

Se asigna un número de control a cada accidente investigado que se registre, que incluye el acrónimo de la entidad que investigue el accidente, dos dígitos del código postal en el que tuvo lugar el accidente y tres caracteres identificativos de la persona que lo investigue.

A.2. Fecha, hora y lugar del accidente.

Se registrarán los datos relativos a la fecha, hora, y lugar del accidente (comunidad autónoma, provincia y municipio).

A.3. Identificación del equipo.

Esta sección incluye los datos relativos a la identificación del equipo involucrado en el accidente. En concreto, se indicarán, entre otros, los siguientes datos:

- Clasificación del equipo

En este apartado se indicará la clasificación y la denominación general del equipo correspondiente a los códigos de agente material del Sistema Delt@. En particular, de entre todos los códigos recogidos en la Orden TAS/2926/2002 (Anexo IV), se contemplan únicamente los correspondientes a los equipos agrícolas, que son los equipos comprendidos dentro del grupo de códigos 09.02.00.00, que agrupa a las Máquinas portátiles o móviles - para el trabajo del suelo, agricultura.

- Categoría y tipo de equipo

Para una identificación más precisa del equipo implicado en cada accidente, se utilizarán los códigos de categoría y tipo de equipo que establece la norma UNE-EN 16831:2017.

La categoría de equipo describe su configuración general, debiendo seleccionar una opción entre las seis categorías propuestas:

- Equipo autopropulsado
- Tractor + equipo remolcado
- Tractor + equipo remolcado
- Tractor + equipo suspendido
- Cargadores y manipuladores
- Equipo de jardinería con ruedas
- Equipo portátil motorizado

Una vez indicada la categoría, se selecciona el tipo de equipo de entre los códigos que recoge la norma. El tipo de equipo especifica con mayor detalle el equipo principalmente implicado en el accidente. Por ejemplo: en el caso de que el accidente se produjera con una cosechadora de patatas autopropulsada, se seleccionaría la categoría de equipo autopropulsado y, a continuación, el código correspondiente a la cosechadora de patatas.

Dentro de cada grupo (categoría de equipo), se ha añadido el código "Otro equipo", para identificar aquellos equipos que no tienen código de tipo asignado en la norma UNE-EN 16831:20017. En estos casos, se especifica el nombre del equipo en el espacio previsto para ello.

- Marca comercial, modelo y año de fabricación

Estos datos, que figuran en la placa de identificación del equipo, permiten comprobar las indicaciones incluidas por el fabricante en el manual de instrucciones, tales como el uso previsto del equipo, los usos "prohibidos", las advertencias de seguridad, etc.

Parte B. Información técnica

Esta parte incluye información de carácter técnico relativa a las condiciones del equipo, la naturaleza del accidente, los factores ambientales y los factores humanos.

B.1. Condiciones del equipo

Deben marcarse sólo los códigos referidos a los aspectos que hayan sido pertinentes en el accidente en cuestión, ya que el objetivo no es efectuar una evaluación de riesgos completa del equipo. Por lo tanto, en aquellos apartados que se considere que no tuvieron incidencia en el accidente se debe seleccionar el código "no aplicable o no pertinente" correspondiente.

Esta sección incluye a su vez 4 apartados:

- Condiciones de mantenimiento.

Se calificarán las condiciones de mantenimiento del equipo principalmente implicado en el accidente en cuestión. Se tendrán en cuenta en la valoración tanto las operaciones propias de mantenimiento como el estado general del equipo, pudiendo indicar si estaba mal mantenido, si se trataba de una máquina modificada o reconstruida por el usuario, o una máquina de fabricación propia, etc.

- Protecciones y dispositivos de seguridad

Este apartado define el estado de las estructuras de protección y dispositivos de seguridad del equipo, que pudieron haber tenido incidencia en el accidente, incluyendo códigos como ROPS no instalado, ROPS en mal estado, cinturón de seguridad instalado, o instalado, pero no utilizado, freno de estacionamiento con funcionamiento incorrecto, etc.

- Funcionamiento y problemas técnicos

Estos códigos recogen información relativa al funcionamiento general y posibles problemas técnicos del equipo, que pudieran haber tenido incidencia en el accidente, como, por ejemplo: funcionamiento alterado, obstrucción, enrollamiento o flujo interrumpido, problema técnico que provoca parada del equipo, etc.

- Cumplimiento de reglamentos y normas

Esta sección tiene por objeto recoger información relativa al cumplimiento de la reglamentación aplicable al equipo implicado en el accidente, debiendo considerarse únicamente aquellos reglamentos y normas que guarden relación con el accidente. También se considera que debe evaluarse la conformidad del equipo durante su puesta en el mercado por primera vez, pudiendo resultar complicado en ocasiones recopilar la legislación exacta que resultaba de

aplicación en ese momento. Se incluyen, por tanto, códigos que hacen referencia al cumplimiento de reglamentos y normas a fecha del accidente, a fecha de puesta en el mercado, manual de instrucciones no disponible o manual de instrucciones disponible pero no advierte del peligro (que dio lugar al accidente).

B.2. Naturaleza del accidente

Esta sección tiene por objeto caracterizar el accidente, definiendo la categoría del accidente, el escenario en el que tuvo lugar, la actividad en el momento del accidente y el modo del uso del equipo.

- Categoría del accidente

Este apartado define la categoría del peligro que ha generado la lesión resultante del accidente, pudiendo seleccionar entre unos códigos que están basados en la lista de peligros que recoge la norma UNE-EN ISO 12100:2012.

Si se hubiera producido más de una lesión se debe seleccionar la categoría de accidente que se corresponda con la lesión de mayor gravedad.

Se incluyen categorías tales como el daño por vuelco o inclinación, debido a un accidente de tráfico, aplastamiento o atropello por un vehículo o equipo, caída desde el equipo, golpe, corte o pinchazo por elementos móviles de la máquina, etc.

- Escenario del accidente

Precisa el entorno en el que tuvo lugar el accidente, pudiendo seleccionar entre los escenarios agrícolas típicos de operación de los equipos considerados, como puede ser el campo, la zona abierta del edificio agrícola o patio, un taller, un cobertizo o granero, un silo de forraje, una zona forestal, etc.

- Actividad en el momento del accidente

Los códigos de este apartado hacen referencia a la fase del ciclo de vida del equipo en la que tuvo lugar la interacción operador-equipo que provocó el accidente, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 12100:2012. Se incluyen códigos relativos al trabajo normal en el campo, limpieza del equipo, mantenimiento rutinario del equipo, montaje de equipos, etc.

- Modo de uso del equipo

Define la manera en que se utilizaba el equipo en el momento del accidente, ya fuera un "uso normal previsto" o alguno de los supuestos de "uso no previsto".

Este modo de uso comprende su utilización en sentido amplio, en relación con cualquier actividad referida al equipo de trabajo, tal como la puesta en marcha o la detención, el empleo, el transporte, la reparación, la transformación, el mantenimiento y la conservación, incluida, en particular, la limpieza, etc.

Así, se pueden seleccionar códigos tales como uso normal previsto, mal uso razonablemente previsible, mal uso no previsible, uso indicado como no previsto en el manual de instrucciones, entre otros.

B.3. Factores ambientales

Esta sección recoge información sobre el medio físico en el que se encontraba el equipo en el momento del accidente. Los códigos de esta sección caracterizan las condiciones ambientales que pudieran haber tenido incidencia en el accidente.

En cada uno de los apartados siguientes se debe seleccionar la opción "no aplicable o no pertinente" si se considera que ese aspecto en concreto no tuvo incidencia en el accidente en cuestión.

- Condiciones meteorológicas

Define las condiciones meteorológicas, así como otras condiciones ambientales, que pudieran haber afectado a la visibilidad, en el momento del accidente, con códigos que incluyen la lluvia, la nieve, el viento fuerte, la niebla, la neblina, el humo y la oscuridad, entre otros.

- Estado del terreno, camino o carretera

Define el estado del terreno, camino o carretera en que se situaba el equipo involucrado en el momento del accidente. Se incluyen códigos como condiciones regulares de la superficie del terreno, camino o carretera, superficie del terreno, camino o carretera resbaladiza o helada, operación en superficie inclinada, mala adherencia, etc.

- Condiciones del cultivo

Define las condiciones del cultivo durante la recolección en el momento del accidente, con códigos para indicar si las condiciones eran buenas, difíciles o adversas.

B.4. Factores humanos

Esta sección recoge determinados aspectos relacionados con la víctima, así como información relativa a la lesión, constando de los siguientes apartados:

- Edad

Se indicará la edad de la persona accidentada expresada en años. Si no se dispone de esta información se escribirá "00".

- Función de la víctima

Se refiere a la función de la víctima y su vinculación con el equipo en el momento del accidente, pudiendo elegir entre códigos como trabajador por cuenta propia, asalariado, trabajador familiar colaborador, aprendiz o en prácticas, persona próxima participante o no en el proceso de trabajo, etc.

- Características de la víctima

Identifica las características de la persona accidentada en relación con el adiestramiento recibido para el manejo del equipo, así como la información y la concienciación respecto a los peligros, si estos son pertinentes en la ocurrencia del accidente. Así, se incluyen códigos para indicar si la persona accidentada se trataba de un operador adiestrado para el trabajo (especializado), un operador general agrícola, un operador no adiestrado adecuadamente, una persona próxima no informada o no consciente de los peligros, etc.

- Comportamiento de la víctima

Se refiere al comportamiento de la víctima en el momento del accidente en términos de aptitud física, condición mental y estrés. Se indicará si la víctima era apta y prudente, imprudente, si estaba cansada o estresada, si se encontraba intoxicada, si no cumplió las normas básicas de seguridad y salud laboral, etc.

- Parte del cuerpo afectada

Debe indicarse la parte del cuerpo que ha sufrido la lesión, siguiendo los criterios establecidos por el Ministerio de Trabajo y Economía Social en la guía "Sistema Delt@. Guía de cumplimentación del parte de accidente de trabajo (PAT)".

- Tipo de lesión

Se indicará el tipo de lesión sufrida como consecuencia del accidente. Se incluyen códigos que hacen referencia a lesiones y heridas superficiales, fracturas de huesos, dislocaciones, esguinces y distensiones, amputaciones traumáticas, etc.

- Días perdidos

Define la gravedad de la lesión expresada en número de días perdidos, que se definen, como el número de días civiles completos durante los cuales la víctima está incapacitada para trabajar debido a un accidente laboral, por lo que solo se deben tener en cuenta los días civiles completos (incluyendo sábados, domingos y festivos) en los que la víctima esté de baja, sin contar el día del accidente, notificándose los que den lugar a más de tres días de baja, así como los accidentes mortales.

Parte C. Descripción del accidente

Aunque en la norma UNE-EN 16831:2017 el modelo de informe de accidentes no incluye ningún apartado de descripción del accidente, durante la fase de validación se consideró necesario incluir esta información para comprobar que el formulario se estaba cumplimentando de forma correcta.

4. Conclusiones

El registro de los datos de los accidentes asociados a tractores y maquinaria agrícola y forestal mediante este formulario proporciona gran cantidad de información de diversa índole acerca de los factores que tuvieron incidencia en este tipo de accidentes, la mayoría de la cual no se podría obtener únicamente a partir de los datos proporcionados a través del Sistema Delt@.

Así, la aplicación de este formulario permitiría conocer con más detalle cuáles son los equipos más involucrados en este tipo de accidentes, así como mucha otra información que puede resultar de gran utilidad desde el punto de vista preventivo. De esta forma, contribuiría a mejorar el conocimiento acerca de aspectos relacionados con posibles problemas técnicos y de funcionamiento de estos equipos, su posible mal uso, deficiencias en relación con las protecciones y dispositivos de seguridad, la categoría del accidente, el escenario y la actividad en el momento del accidente, las condiciones ambientales, las características y el comportamiento de la víctima, etc.

Asimismo, la recogida de información de los accidentes de tractores y maquinaria agrícola y forestal mediante este formulario, y su posterior estudio y análisis estadístico permitiría extraer conclusiones, detectar deficiencias y diseñar estrategias y medidas más específicas y eficaces para mejorar las condiciones del trabajo en el sector agrario y la seguridad y salud durante el uso de estos equipos de trabajo.

Por otro lado, su aplicación sistemática, al estar basado en una norma europea, permitiría comparar datos de siniestralidad en el sector entre diferentes países de la UE en los que se aplique esta norma, con mayor nivel de detalle que con el sistema actual de notificación de accidentes de trabajo, así como su evolución en el tiempo.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a las entidades y personas a título individual participantes en el grupo de trabajo del proyecto por registrar datos de accidentes que han resultado fundamentales para validar la metodología, así como por sus comentarios y aportaciones.

Referencias

21. EN 16831:2016 Tractors and machinery for agriculture and forestry. Safety. Format for reporting accidents.
22. UNE-EN 16831:2017 Tractores y maquinaria agrícola y forestal. Seguridad- Formato de los informes de accidentes.
23. UNE-EN ISO 12100:2012 Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.
24. Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2006, relativa a las máquinas y por la que se modifica la Directiva 95/16/CE.
25. Guide to the application of the Machinery Directive 2006/42/EC. European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.

Forecasting Agricultural Tractor Wholesale and Retail Remaining Value using Parametric and Non-parametric Models

Ivan Herranz Matey [1 2] (https://orcid.org/0000-0001-7959-0688)

Luis Ruiz Garcia [1] (https://orcid.org/0000-0001-6656-6507)

[1] Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSIAAB. Universidad Politécnica de Madrid, Av. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, Spain

[2] Correspondence: ivan.hmatey@alumnos.upm.es; Tel.: +34-910-67-09-83

Abstract: The residual value of agricultural tractors is an important factor for the profitability of agribusinesses. However, there have been few studies that forecast the retail and wholesale residual value of agricultural tractors in Western Europe. The present research introduces an innovative methodology to assess the residual worth of farming tractors, while accounting for the substantial disparity in pricing observed between retail and wholesale transactions. Using publicly available auction data, a polynomic regression model is developed to forecast the relationship between retail and wholesale residual values. The model achieves highly robust results, outperforming previous studies with a root mean squared error (RMSE) of 0.0159 and a combined adjusted coefficient of determination (RSqAdj) of 0.9997. The proposed model provides valuable insights for stakeholders, including manufacturers, sellers, financiers, insurers, and users, to make informed decisions about retailing and/or wholesaling agricultural tractors based on factual evidence.

Keywords: Used, Equipment, Machinery, Forecasting, Nonparametric, Machine Learning

1 Introduction

Efficient cost management in production is of paramount importance, not only for survival but also for thriving in the market. The expenses linked to machinery operation and ownership often account for a substantial proportion, exceeding fifty percent, of the overall costs incurred in crop production. The optimization of production expenditures plays a critical role not only in ensuring survival but also in achieving success in the marketplace, where equipment operation and ownership expenses frequently constitute more than half of the total crop production costs (Kastens, 1997).

Even in instances where a machine is purchased outright, without any financing, leasing, or renting arrangements (Edwards, 2019), its residual value significantly influences its subsequent trade-in value or upfront payment. This residual value factor carries considerable weight in

determining the associated finance costs, as financiers typically ensure that the loan amount remains lower than the machine's residual value (U.S. Consumer Financial Protection Bureau, 2020). Uncertainty regarding the residual value may lead to the inclusion of a haircut (ECB, 2016), a safety margin applied by financiers to make the financing scheme more costly for the buyer.

When a used machine is traded-in as a form of payment, the purchaser incurs additional costs at the acquisition stage, including preparation costs (ranging from minor scheduled maintenance to major refurbishment), warranty costs, administrative, and transportation expenses. This results in a margin gap between these costs (trade-in or acquisition, preparation, warranty, and admin & transport) and the retail price, also known as the Fair Market Value (FMV). Attempting to sell above the fair market value may result in more days in inventory with associated financial costs and residual value dilution. Consequently, the machine is promoted at an advertised price that allows for some negotiating room above the retail price or FMV. The wholesale price will be lower than the retail price (Nakamura, 2008) since the sales terms and conditions will likely be "as-is, where-is," thus excluding preparation, warranty, administrative, or transport costs, and the margin expectations will be lower, as depicted in Figure 1.

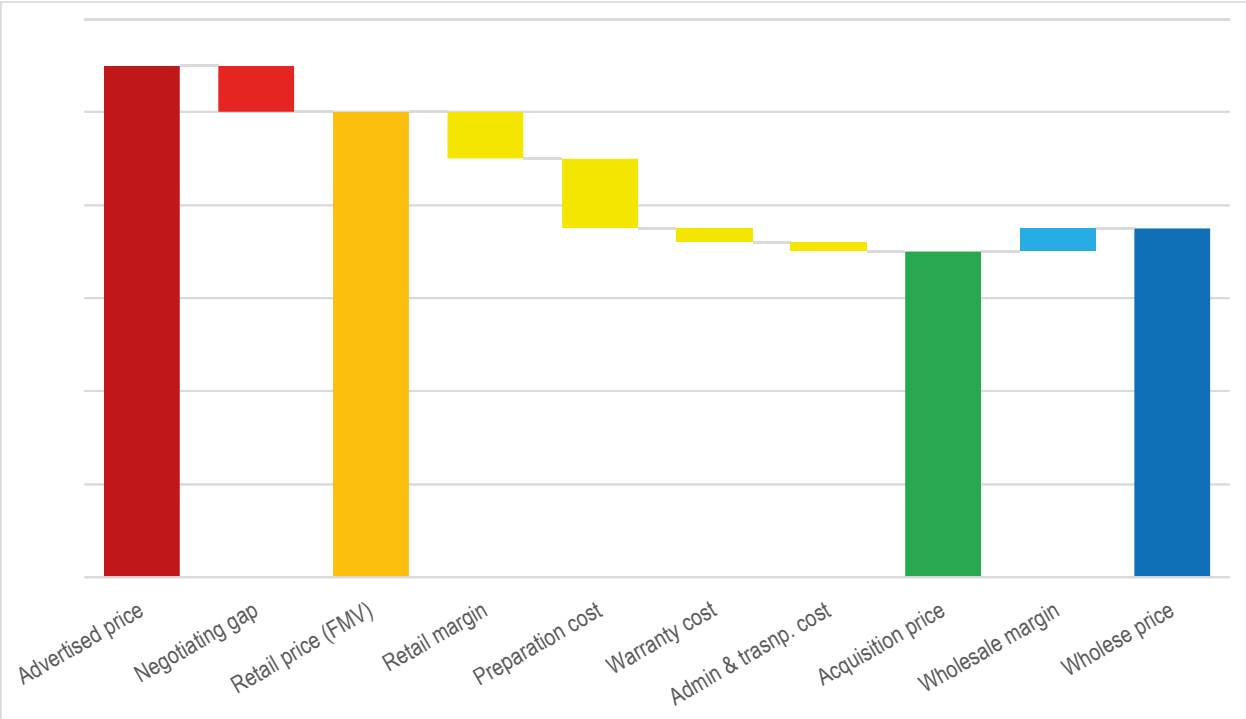


Figure 1: Graphical representation of glossary of terms

Therefore, understanding the wholesale residual value is essential in addition to comprehending the retail residual value. Having a clear understanding of the wholesale residual value provides additional options for managing machine ownership both as a source and as a destination.

1.1 Previous studies

The significance of attaining a comprehensive understanding of agricultural tractor depreciation rates cannot be overstated, and substantial research has been undertaken in this domain.

Reid & Bradford, (1983) conducted an analysis of 411 tractors in the United States and employed exponential functions to assess the impact of age, power, motor type, manufacturer, increasing usage, and technological advancements on residual value. Perry et al., (1986) carried out a separate study in the United States, examining 1,612 tractors, and utilized the Box-Cox transformation to estimate the influence of factors such as age, power, manufacturer, usage, care, and macroeconomic variables on residual value. Similarly, Hansen & Lee, (1991) investigated agricultural tractors in Canada and employed a linear function to ascertain the relationship between age, year of manufacture, and purchase year on residual value.

Cross and Perry (1995); Cross and Perry (1995) used Box-Cox transformations to estimate the effects of age, hours of use, brand, condition, auction region and type, and economic macro indicators on residual value in auctions of agricultural tractors in the USA. Unterschultz & Mumey, (1996); conducted a study on 3,202 tractors in auctions in the USA and Canada, which was corroborated by the Hansen and Lee model. Cross and Perry (1996); studied auctions of 433 tractors with less than 60 kW, 1,946 tractors between 60 and 112 kW, and 866 tractors with more than 112 kW in the USA and used Box-Cox transformations to estimate the effects of age, hours of use, brand, condition, and economic macro variables on residual value.

Wu & Perry, (2004); conducted a study on 657 tractors with 30-79 horsepower, 1,420 tractors with 80-120 horsepower, and 781 tractors with 121+ horsepower in auctions in the USA and used Box-Cox transformations to estimate the effects of age, production year, manufacturer, and other variables on residual value Fenollosa & Guadalajara, (2007); studied 7,876 tractors with 13-79 horsepower, 3,963 tractors with 80-133 horsepower, and 731 tractors with 134-263 horsepower in sales in Spain from December 1999 to December 2002 and used Ordinary Least Squares (OLS) and Box-Cox transformations to estimate the effects of age, power, brand, and other variables on residual value.

Wilson & Tolley, (2004) and Wilson, (2010) analyzed tractor advertisement data from the UK, with Wilson, (2010) incorporating Box-Cox transformation to enhance the accuracy of the results. The American Society of Agricultural and Biological Engineers ASABE, (2020) conducted a study in 2011, based on data from the USA, considering factors such as age, usage, and power, using Box-Cox transformation for data normalization. Kay et al., (2020) analyzed auction data from the USA, applying the ASABE standards from 2006.

Witte et al., (2022) analyzed advertisement and auction data from Germany, focusing on factors such as age, usage, available power, and manufacturer, using exponential regression analysis. Ruiz-Garcia & Sanchez-Guerrero (2022) examined advertisement data from Europe, focusing on new and used tractors, and considering factors such as age, usage, available

power, and manufacturer. They used robust linear regression (polynomial) to estimate the residual value.

Finally, Herranz-Matey & Ruiz-Garcia, (2023a). examined advertisement data from Europe, considering factors such as age, hours, brand, and tractor cohort, using power linear regression analysis. The current study builds upon these previous efforts by proposing a novel model that achieves highly robust results for estimating the residual value of agricultural tractors. The model's robustness and sturdiness were confirmed using more limited in numbers combine advertisements (Herranz-Matey & Ruiz-Garcia, 2023b).

Due to the lack of abundant transactional European data for robust modeling, previous studies have mainly focused on advertised tractors, which may not entirely reflect the market value offered by proficient vendors. Nonetheless, such data remains valuable in providing insights and enhancing the comprehension of residual value trends.

Witte et al., (2022) made significant strides by considering both advertised and auctioned prices, emphasizing the importance of understanding the auctioned price in relation to the retailed (advertised) price.

The clear understanding of the auction value of agricultural tractors holds paramount importance for all stakeholders as it provides insights into the most challenging price realization expectations that can be attained in case of undetected mechanical failures, be they catastrophic or otherwise, or during situations requiring urgent price realization.

In conclusion, the knowledge surrounding agricultural tractor depreciation rates and residual value estimation is essential for informed decision-making and effective management in the agricultural machinery market. The continuous refinement and improvement of models in this field will undoubtedly contribute to better outcomes for all stakeholders involved. Further research endeavors should seek to gather more comprehensive European transactional data to enhance the robustness of the models and improve the overall understanding of residual value trends in the agricultural tractor market.

1.2 Current issues

In their research, Herranz-Matey, and Ruiz-Garcia (2023) draw attention to the fact that tractor manufacturers offer a variety of sizes and features within the same power category, resulting in price disparities of up to 39% between different models. This observation implies that power alone does not constitute the sole, or even the most critical, determinant of tractor prices. Instead, other factors such as size, features, and brand may exert a more significant influence on the pricing dynamics of tractors.

The authors also highlight the significance of compliance with emission regulations (Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1997, 1997; Directive 2000/25/EC of the European Parliament, 2000; Directive 2004/26/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 Amending Directive 97/68/EC, 2004; Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 Amending Directive 98/70/EC, 2009) as a major concern for the tractor industry in recent years. However,

the authors argue that the costs associated with adhering to these regulations have not been the primary driver of price increases. This finding aligns with previous studies conducted by (Lynch et al., 2020; Posada et al., 2016) which suggest that other factors, such as the increasing demand for larger and more technologically advanced tractors, are more likely to have contributed to the upward trend in tractor prices.

2 Goal

The primary aim of this research is to develop a robust model for estimating residual value that is user-friendly and can be readily implemented using widely accessible mainstream software. The model is intended to cater to various stakeholders involved in residual value assessment, including manufacturers, sellers, financers, insurers, and users within the agricultural tractor industry. By accurately calculating both wholesale residual value and the discrepancy between wholesale and retail residual value, this proposed model will enable stakeholders to make well-informed decisions, optimizing their financial performance when purchasing new or used agricultural tractors.

To fulfill this objective, a residual value calculation methodology will be devised, striking a balance between ease of application and precision of outcomes. The proposed methodology will specifically be applicable to standard agricultural tractors featuring an engine power above 75 kW, equipped with cabs, and manufactured by major original equipment manufacturers (OEMs) such as Case IH, Claas, Fendt, John Deere, Massey Ferguson, and New Holland. The scope of this model will primarily focus on the primary Western European markets. The overarching goal is to provide an accessible and effective tool for calculating residual value, catering to the interests of diverse parties, including users, producers, financial and insurance entities, financiers, and insurers, within the agricultural tractor sector. (CEMA, 2022).

3 Materials and Methods

3.1 Dataset

This research centers on the examination of agricultural tractors manufactured by prominent companies, namely New Holland, Massey Ferguson, John Deere, Fendt, Claas, and Case IH, featuring engine power greater than seventy-five kilowatts. The data collection spanned a duration of 18 months, during which observations were made in Germany, United Kingdom, France, Spain, and Italy. The selection of this timeframe aimed to ensure the acquisition of a sufficiently large dataset to achieve robust statistical power, while simultaneously mitigating the impact of rapidly changing economic conditions. To gather the required data, an online source (https://www.rbauction.com/heavy-equipment-auctions/past-auctions) was accessed on July 15th, 2022.

The dataset amassed a total of 1,120 distinct observations of advertised tractors, each categorized uniquely. This dataset serves as a comprehensive and valuable resource for conducting an in-depth analysis of the agricultural tractor market within the specified countries. It facilitates the identification of discernible trends and patterns related to tractor

manufacturers, features, and pricing, thereby contributing to a more comprehensive understanding of the market dynamics in the agricultural tractor industry.

3.2 Data systematization and preprocessing

The determination of residual value (RV) as originally conceptualized by Herranz-Matey and Ruiz-Garcia (2023) can be ascertained through the next computational process.:

$$RV = \frac{Used\ tractor\ retail\ price\ (€)}{Equivalent\ new\ tractor\ (€)} \quad (1)$$

Using the same tractor cohort grouped (tractors with similar size (wheelbase, minimum and maximum mass) and features (transmissions and user interfaces) which, in some cases, splitting the manufacturer defined tractor series in cohorts) new equivalent tractor method (find correspondence with all de predecessors of every single model of every single cohort in the year in scope (since 1998) based on the relative model positioning within the tractor series as well as its features).

3.3 Data analysis

3.3.1 Wholesale residual value regression

This research endeavor sought to comprehensively assess alternative regression techniques by exploring various models and subtypes. The evaluated models encompassed bagged and boosted trees ensembles, exponential, matern 5/2, rational quadratic, and squared exponential Gaussian Process Regression (GPR), least square regressions, and supported vector machines kernels, as well as linear and robust linear regressions. Additionally, the study considered bilayered, medium, narrow, trilayered, and wide neural networks, coarse and fine Gaussian, cubic, linear, median, and quadratic supported vector machines (SVM), and fine and medium trees.

To rigorously evaluate the performance of the fitted models, a range of predictor variables (2, 3, 5, 7, and 9 variables) were incorporated, including age, hours, tractor cohort, model, current equivalent model, brand, country, wheelbase, and engine power. Both cross-over validation, employing 3, 5, 7, and 9 folds, and hold-out validation, using 5%, 10%, 15%, 20%, and 25% test data, were applied during the process, with a focus on employing machine learning optimization techniques.

Furthermore, the research conducted an exhaustive analysis of parametric models concerning all tractor cohorts, thereby providing a comprehensive assessment of diverse models and subtypes for the prediction of residual value in the context of agricultural tractors.

Linear (lin-lin): $$RV = \mathrm{Coef}_A + Coef_B \cdot Hours + Coef_C \cdot Age \quad (2)$$

Logarithmic (lin-log): $$RV = \mathrm{Coef}_A + Coef_B \cdot ln(Hours) + Coef_C \cdot \ln(Age) \quad (3)$$

Power (log-log): $$RV = \mathrm{Coef}_A \cdot Coef_B^{Hours} \cdot Coef_C^{Age} \quad (4)$$

Exponential (log-lin): $$RV = \text{Coef}_A \cdot e^{Coef_B \cdot Hours} \cdot e^{Coef_C \cdot Age} \quad (5)$$

Double SqRt $$RV = \left(\text{Coef}_A + Coef_B \cdot \sqrt{Hours} + Coef_C \cdot \sqrt{Age}\right)^2 \quad (6)$$

Polynomial 12 $$RV = \text{C}_A + C_B \cdot Hours + C_C \cdot Hours^2 + C_D \cdot Age + C_E \cdot Age \cdot Hours \quad (7)$$

Polynomial 21 $$RV = \text{C}_A + C_B \cdot Hours + C_C \cdot Age + C_D \cdot Age^2 + C_E \cdot Age \cdot Hours \quad (8)$$

Polynomial 22 $$RV = \text{C}_A + C_B \cdot Hours + C_C \cdot Hours^2 + C_D \cdot Age + C_E \cdot Age^2 + C_F \cdot Age \cdot Hours \quad (9)$$

In the process of evaluating the model's performance, two key metrics were employed, namely the root mean squared error (RMSE) and the adjusted coefficient of determination (RSqAdj). The rationale behind choosing RMSE lies in its ability to present errors in the same unit as the outcome variable, facilitating straightforward interpretation. Specifically, an RMSE value of zero would indicate a model with perfect accuracy, wherein predicted values align precisely with the actual outcomes. Conversely, RSqAdj was utilized to account for the proportion of variance in the dependent variable that is effectively explained by the regression model, while also considering the number of predictor variables utilized to forecast the dependent variable (McCarthy et al., 2019).

3.3.2 Retail and wholesale residual value difference regression

Once the retail and the wholesale residual value can be predicted it is remarkably simple to calculate the difference with the following equation:

$$Retail - Wholesale\ RV = \frac{Retail\ RV - Wholesale\ RV}{Wholesale\ RV} \quad (10)$$

That retail regression value and wholesale regression value difference is calculated for ages 1 to 20 years, in 1-year increments, and 100 to 750 hours per year (HPY) in 50 hours increments.

4 Results

4.1 Wholesale residual value regression

Based on the results presented in Table 1, the power regression model (4) exhibited the most favorable performance in terms of both RMSE and RSqAdj metrics. Consequently, it is deemed to be the recommended regression model.

Table 1: Tractor cohort power regression results

Brand Id	Cohort Id	RMSE	RSqAdj	Observations
A	A|Bb	0.0094	0.9944	19
	A|Ea	0.0559	0.9488	69
	A|Eb	0.0674	0.9682	37
	A|Gb	0.0535	0.9784	22
B	B|Cb	0.0049	0.9726	79
	B|Eb	0.0337	0.9649	38

Brand Id	Cohort Id	RMSE	RSqAdj	Observations
C	C|Ba	0.0266	0.9835	71
	C|Ca	0.0192	0.9749	35
	C|Da	0.1004	0.9741	56
D	D|C0	0.0521	0.9756	93
	D|E0	0.0262	0.9590	31
	D|F0	0.0413	0.9751	113
	D|G0	0.0167	0.9694	31
E	E|Ba	0.0196	0.9712	22
	E|Ea	0.0402	0.9745	23
F	F|Eb	0.0588	0.9777	52
	F|Fb	0.0470	0.9198	37
	F|Gb	0.0175	0.9849	41

The experimental evaluation of the advanced models revealed that those incorporating seven predictors yielded notably superior root mean squared error (RMSE) values when compared to models with fewer predictors (i.e., three, five, or fewer). Additionally, models employing holdout validation outperformed those utilizing cross-validation methods. Among the various models tested, the Exponential Gaussian Process Regression model, with seven predictors and a 10% holdout validation, exhibited the most favorable overall performance, boasting an impressive RMSE value of 0.0518.

The proposed methodology, which primarily focused on power regression models utilizing only two predictor variables for tractor cohorts, necessitated an exploration of more sophisticated software capable of leveraging intricate models. The application of Optimized Gaussian Process Regressions, employing two predictors and a 10% holdout validation for the considered tractor cohorts, yielded highly satisfactory RMSE and adjusted coefficient of determination (RSqAdj) results. Remarkably, the outcomes of the proposed power regression model, utilizing two predictors categorized by cohort, surpassed even the most precise regression model optimized through machine learning. (Table 2).

Table 2: Tractor cohort two predictors regression results

	Power Linear Regression		Machinne Learning Optimized Gaussian Process Regression		
Tractor Cohort	RMSE	RSqAdj	RMSE	RSqAdj	Observations
A|Bb	0.0049	0.9726	0.0533	0.7978	79
F|Fb	0.0470	0.9198	0.0639	0.7335	37
F|Fa	0.0192	0.9749	0.0551	0.8892	35
A|Ea	0.0196	0.9712	0.0490	0.8868	22
E|Ea	0.0262	0.9590	0.0676	0.7448	31
A|Gb	0.0266	0.9835	0.0526	0.8534	71
F|Ea	0.0316	0.9830	0.0624	0.8571	21
E|Ib	0.0337	0.9649	0.0851	0.4006	38
F|Ib	0.0361	0.9784	0.0697	0.5990	39
F|Gb	0.0402	0.9745	0.0572	0.6034	23

The proposed power regression model displayed a remarkable level of accuracy in capturing the residual value trends across diverse tractor cohorts. Additionally, it is worth noting, as previously observed by Witte et al. (2022), that the exponential regression model emerged as the second-best performing model, surpassing more complex alternatives such as the optimized Gaussian regressions (OGPR).

4.2 Retail and wholesale residual value difference regression

n the evaluation of the most suitable model for predicting the retail and wholesale residual value difference (the two predictor parameters), several regression models were tested, including linear (lin-lin), logarithmic (lin-log), power (log-log), exponential (log-lin), double square root, polynomial 12, polynomial 21, and polynomial 22 regressions. These models were assessed across different tractor cohorts and a constant operating hours rate of 500 hours per year (HPY). The results, depicted in Figure 2 d emonstrate that polynomial regressions provide a better fit for capturing the behavior of the retail-wholesale difference, regardless of the magnitude of the difference observed.

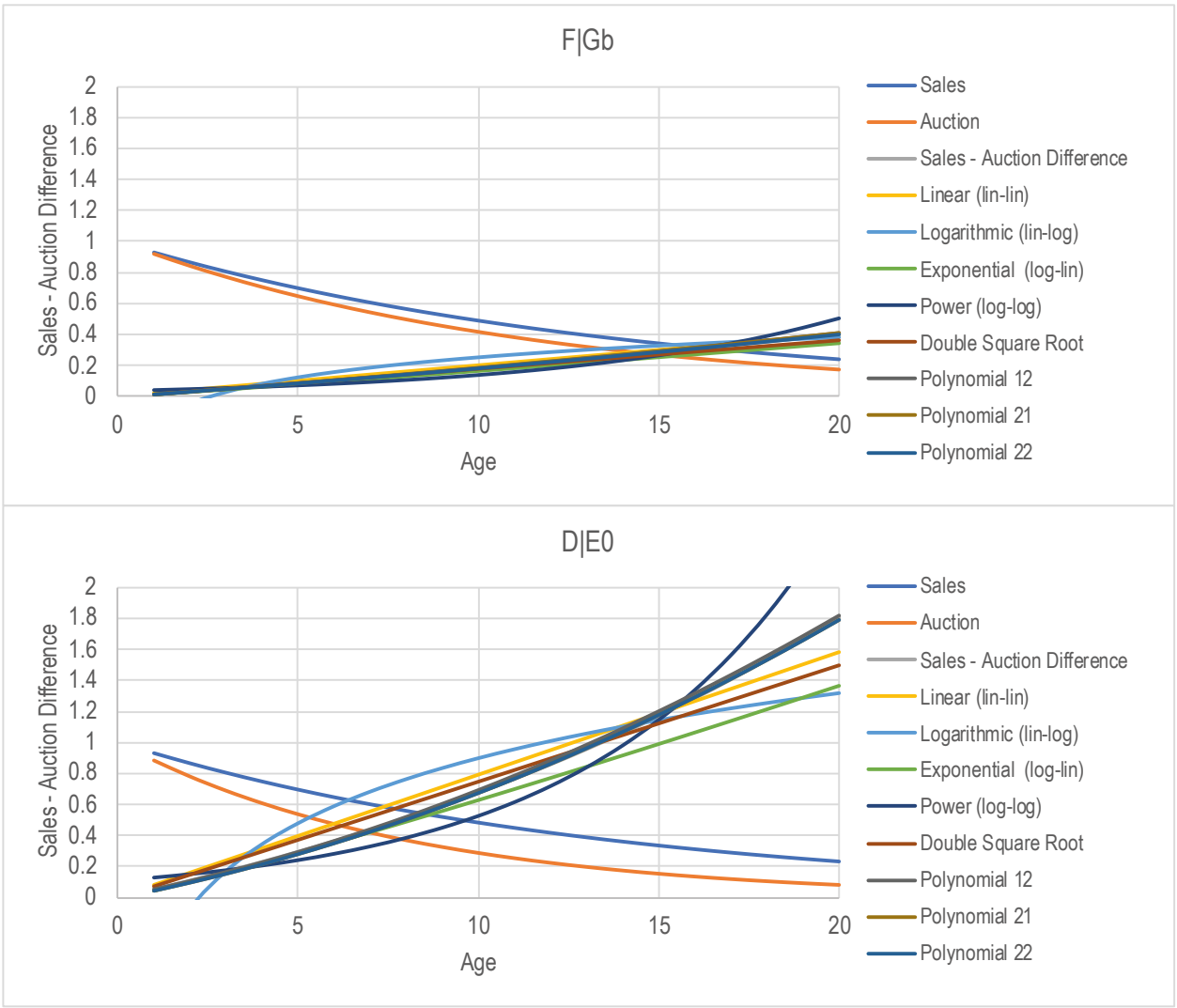


Figure 2: F|Gb and D|E0 tractor cohorts retail and wholesale residual value difference regression model by year calculated at 500 hours per year (HPY).

The surface representing B|Cb tractor cohort retail and wholesale residual value difference regression lowest RMSE models (Figure 3) Visualized the regression model results how it compares to the actual difference showing the best correlation of the polynomial 22 regression (9).

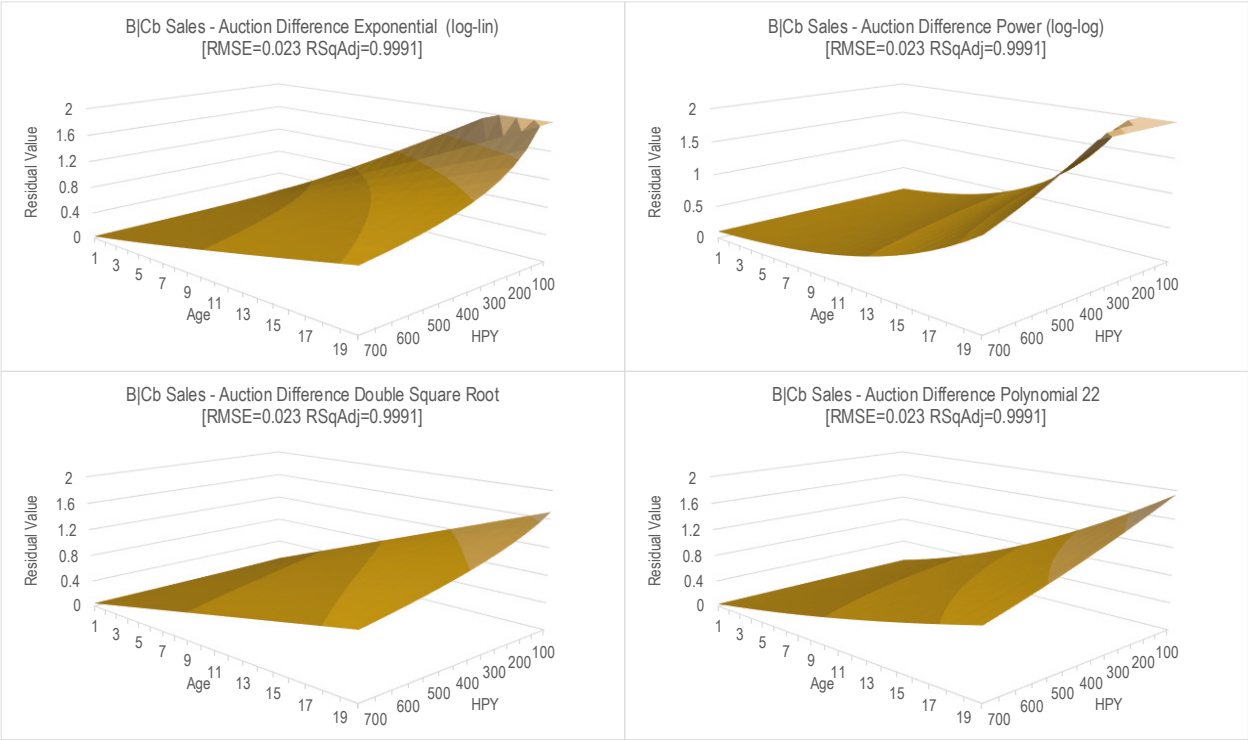


Figure 3: B|Cb tractor cohort retail and wholesale residual value difference regression results of best performing regression model

The similitude of the polynomial regression compared to the actual difference between retail and wholesale residual value perceived in Figure 2.and Figure 3 is confirmed by the calculated RMSE and RSqAdj represented for all studied tractor cohorts in Table 3.

Table 3: Retail and wholesale residual value difference regression model results

Regression model	RMSE	RSqAdj
Linear (lin-lin)	0.1305	0.9813
Logarithmic (lin-log)	0.3902	0.8222
Exponential (log-lin)	0.3863	0.9157
Power (log-log)	0.3899	0.8728
Double Square Root	0.0650	0.9934
Polynomial 12	0.0531	0.9957
Polynomial 21	0.0770	0.9914
Polynomial 22	0.0159	0.9997

Summarizing, the retail and wholesale data is analyzed with a power regression model and its difference is calculated and analyzed with a polynomial 22 regression model.

5 Discussion

5.1 Wholesale residual value regression

The proposed power regression model demonstrates heightened predictive robustness compared to prior studies that relied solely on age, usage hours, brand, and power features to forecast residual value behavior. It is important to underscore that relying solely on power as a predictor may not adequately discern residual value behavior, particularly for tractor cohorts originating from the same brand, featuring similar power ratings but varying in size, mass, transmissions, and user interfaces, as emphasized by Herranz-Matey & Ruiz-Garcia, (2023a). In contrast, the proposed model adopts a more comprehensive approach by delving into the modeling level and grouping tractors into cohorts, thereby laying a more solid foundation for producing robust results that surpass the performance of previous studies based solely on auction data (Table 4).

Table 4: Previous studies results on auctioned dataset

Researcher	RMSE	RSqAdj	Observations
Cross, T. L., and Perry, G. M. (1995).	1.1061	0.7441	984
Unterschultz, J., and Mumey, G. (1996).	5.4442	0.5101	354
Cross, T. L., and Perry, G. M. (1996).	2.4855	0.4661	808
Wu, J., and Perry, G. M. (2004).	5.8467	0.7204	984
Fenollosa, M. L., and Guadalajara, N. (2007).	6.2488	0.6241	921
Wilson, P., and Tolley, C. (2004).	2.0283	0.7053	984
Wilson, P. (2010). OLS	11.7206	0.6469	984
Wilson, P. (2010). Box–Cox	0.7821	0.7441	982
ASABE. (2011 (R2020)).	2.2521	0.7225	984
Kay, R., Edwards, W., and Duffy, P. (2020).	0.0933	0.7147	624
Witte, F., Back, H., Sponagel, C., and Bahrs, E. (2022)	0.9306	0.4931	990
Ruiz-Garcia and Sanchez-Guerrero (2022)	4.2757	0.7580	1,120

The methodology introduced in this research presents a simpler approach, yet achieves superior RMSE and RSqAdj outcomes in comparison to more intricate fitting models that necessitate specialized software. Furthermore, the proposed methodology is readily implementable using widely accessible mainstream software, thereby rendering it more inclusive and accessible to a diverse array of users.

5.2 Retail and wholesale residual value difference regression

Witte et al. (2022) contributed significantly to the field by pioneering the consideration of both advertised and auctioned prices, emphasizing the importance of comprehending the relationship between auctioned and retailed (advertised) prices. Their study revealed that the average discount between advertisements and auction results amounts to 30.1%.

In contrast, the proposed polynomial 22 regression model provides a comprehensive analysis of the variation between retail and wholesale prices, taking into account tractor cohort, age, and usage hours. This model demonstrates exceptional accuracy, with a mean squared error (RMSE) of 0.0159 and an adjusted coefficient of determination (RSqAdj) of 0.9997.

The power regression charts, employed to determine retail and wholesale residual values, in conjunction with the polynomial power regression, used to evaluate the difference in residual values, yield valuable insights for stakeholders within the used tractor market, including manufacturers, sellers, financers, insurers, and users. Notably, this model not only considers the retail market but also opens up market opportunities by forecasting values in the wholesale market. Furthermore, the model is constructed using publicly available data and can be readily utilized with widely accessible software, making it highly transparent and offering infinite analysis options that can be easily visualized (refer to Figure 4).

It is essential to consider the specifications, features, and condition of the tractor, as it may undergo refurbishment or improvements. However, the costs associated with such refurbishments or improvements must be carefully evaluated, as they will only be justified if they lead to a higher price realization in the retail market compared to the wholesale market (evident in tractor cohort D|E0 in Figure 4). Conversely, in some cases, the cost of refurbishment or improvement may outweigh the potential price realization obtained from the retail price compared to the wholesale price, leading to the opposite decision (apparent in cohort F|Gb in Figure 4). Such considerations are vital for decision-makers navigating the used tractor market and can influence their market strategies accordingly.

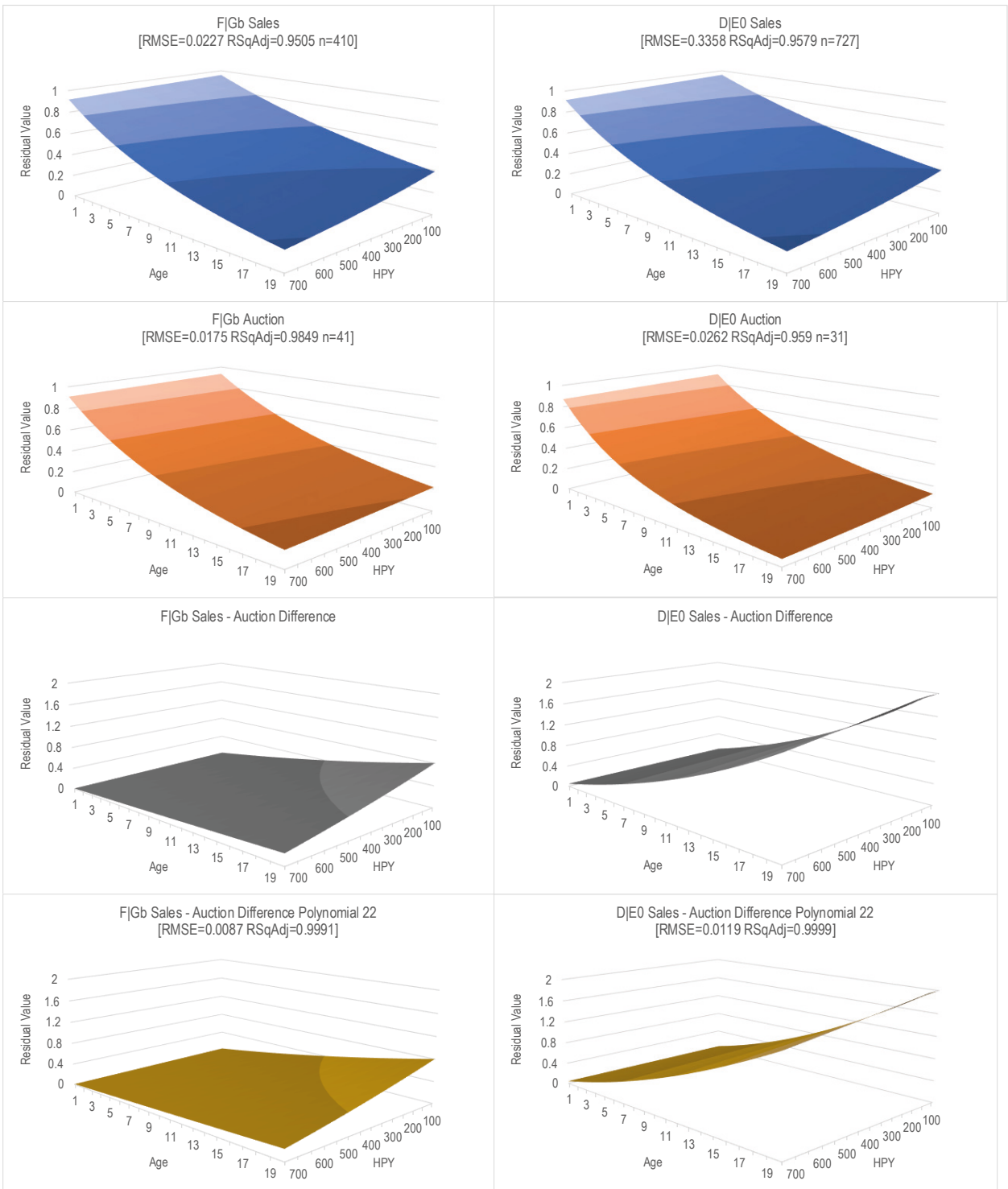


Figure 4: F|Gb and D|E0 tractor cohort retail, wholesale, retail and wholesale residual value difference and retail and wholesale difference regression results

6 Conclusions

The proposed power regression model for residual value estimation exhibits remarkable robustness when compared to previous studies and more advanced models, including those involving machine learning optimization. Several factors contribute to its enhanced

performance. Firstly, the model accounts for each tractor model individually, effectively mitigating interferences from other tractors possessing the same power but differing specifications. Secondly, it accommodates the price increase attributed to emission regulations and specification evolution by assessing the used tractor retail price relative to the equivalent new tractor retail price. Thirdly, to compensate for the limited statistical population, the model groups tractor models into cohort groups, thereby overcoming statistical challenges encountered within tractor series or subdividing tractor series to account for significant differences when a substantial number of models exist.

Moreover, the proposed methodology, along with the power linear regression model based on tractor cohort group new equivalent models, demonstrates superior robustness when applied to wholesale data sourced from auctions, surpassing previous studies and advanced machine learning-optimized models (RMSE = 0.0695 | RSqAdj = 0.8461). Its simplicity lies in the ease of implementation; merely requiring a simple internet search on used equipment websites and two inquiries from sellers, thereby making it accessible and facilitating the acquisition of information for transparent processing using universally known software.

Furthermore, calculating the difference between the predicted retail and wholesale residual value entails a straightforward calculation, accurately described by a polynomial regression model (RMSE = 0.0159 | RSqAdj = 0.9997). This allows all stakeholders involved to optimize their marketing strategy by selecting the most effective channel, whether retail or wholesale, to achieve the highest price realization.

Lastly, extending the evaluation of this methodology and model to other types of agricultural machinery, such as combines and self-propelled forage harvesters, would undoubtedly be of great interest, as it may yield similarly positive results. Such investigations could offer valuable insights and extend the applicability of the proposed approach to diverse agricultural machinery contexts.

7 References

ASABE. (2020). Agricultural Machinery Management Data ASAE Standard D497.7 Agricultural Machinery Management Data. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

CEMA. (2022). *Economic Press Release Tractor Registrations 2021*. CEMA aisbl - European Agricultural Machinery.

Cross, T. L., & Perry, G. M. (1995). Depreciation Patterns for Agricultural Machinery. *American Journal of Agricultural Economics*, *77*(1), 194–204. https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1243901

Cross, T. L., & Perry, G. M. (1996). Remaining Value Functions for Farm Equipment. *Applied Engineering in Agriculture*, *12*(5), 547–553. https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.25682

Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1997, European Commission (EC) (1997). http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:31997L0068

Directive 2000/25/EC of the European Parliament, European Commission (EC) (2000). http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0025

Directive 2004/26/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC, European Commission (EC) (2004). http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32004L0026R%2801%29

Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 98/70/EC, European Commission (EC) (2009). http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009L0030

ECB. (2016). *Haircuts*. European Central Bank (ECB). https://www.ecb.europa.eu/ecb/educational/explainers/tell-me-more/html/haircuts.en.html

Edwards, W. (2019). FM1900/AgDM A3-30, Replacement Strategies for Farm Machinery.

Fenollosa, M., & Guadalajara, N. (2007). An empirical depreciation model for agricultural tractors in Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research, ISSN 1695-971X, Nº. 2, 2007, Pags. 130-141*, *5*. https://doi.org/10.5424/sjar/2007052-233

Hansen, L., & Lee, H. (1991). Estimating Farm Tractor Depreciation: Tax Implications. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue Canadienne d'agroeconomie*, *39*, 463–479. https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.1991.tb03587.x

Herranz-Matey, I., & Ruiz-Garcia, L. (2023a). A New Method and Model for the Estimation of Residual Value of Agricultural Tractors. *Agriculture*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/agriculture13020409

Herranz-Matey, I., & Ruiz-Garcia, L. (2023b). Agricultural Combine Remaining Value Forecasting Methodology and Model (and Derived Tool). *Agriculture*, *13*(4). https://doi.org/10.3390/agriculture13040894

Kastens, T. (1997). Farm Machinery Operations Cost Calculations.

Kay, R. D., Edwards, W. M., & Duffy, P. A. (2020). *Farm Management* (7th ed.). McGraw-Hill.

Lynch, L. A., Hunter, C. A., Zigler, B. T., Thomton, M. J., & Reznicek, E. P. (2020). On-Road Heavy-Duty Low-NOx Technology Cost Study. In *National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S. Department of Energy*. www.nrel.gov/publications.

McCarthy, R. v., McCarthy, M. M., Ceccucci, W., & Halawi, L. (2019). *Applying Predictive Analytics*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14038-0

Nakamura, E. (2008). Pass-Through in Retail and Wholesale. *American Economic Review*, *98*(2), 430–437. https://doi.org/10.1257/aer.98.2.430

Perry, G. M., Bayaner, A., & Nixon, C. J. (1986). The Effect of Usage and Size on Tractor Depreciation. *American Journal of Agricultural Economics*, *72*(2), 317–325.

Posada, F., Chambliss, S., & Blumberg, K. (2016). Cost of emission reduction technologies for heavy duty diesel vehicles. In *The International Council on Clean Transportation (icct)*. The International Council on Clean Transportation (icct.

Reid, D. W., & Bradford, G. L. (1983). On Optimal Replacement of Farm Tractors. *American Journal of Agricultural Economics*, *65*(2), 326–331. https://doi.org/https://doi.org/10.2307/1240883

Ruiz-Garcia, L., & Sanchez-Guerrero, P. (2022). A Decision Support Tool for Buying Farm Tractors, Based on Predictive Analytics. *Agriculture*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/agriculture12030331

Unterschultz, J., & Mumey, G. (1996). Reducing Investment Risk in Tractors and Combines with Improved Terminal Asset Value Forecasts. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, *44*(3), 295–309.

U.S. Consumer Financial Protection Bureau. (2020). *What is a loan to value ratio and how does it relate to my costs*. U.S. Consumer Financial Protection Bureau. https://www.consumerfinance.gov/ask-cfpb/what-is-a-loan-to-value-ratio-and-how-does-it-relate-to-my-costs-en-121/#:~:text=The%20loan%2Dto%2Dvalue%20(,will%20require%20private%20mortgage%20insurance.

Wilson, P. (2010). Estimating Tractor Depreciation: The Impact of Choice of Functional Form. *Journal of Farm Management (UK)*, *13*(12), 799–818.

Wilson, P., & Tolley, C. (2004). Estimating Tractor Depreciation and Implications for Farm Management Accounting. *Journal of Farm Management (UK)*, *12*(1), 5–16.

Witte, F., Back, H., Sponagel, C., & Bahrs, E. (2022). Remaining value development of tractors – a call for the application of a differentiated market value estimation. *Agricultural Engineering*, *77*(1). https://doi.org/10.15150/lt.2022.3273

Wu, J., & Perry, G. M. (2004). Estimating Farm Equipment Depreciation: Which Functional Form is Best? *American Journal of Agricultural Economics*, *86*(2), 483–491.

Estudio del riesgo de incendio en empacadoras agrícolas

M. Videgain[1,2*], C. Ayudán[1], M. Vidal[1], A. Boné[1], A. Vigo-Morancho[1], A. Jiménez[1], F.J. García-Ramos[1,2]

[1] Escuela Politécnica Superior, Universidad de Zaragoza, Ctra. Cuarte s/n, 22071 Huesca, España.
[2] Instituto Agroalimentario de Aragón – IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), Ctra. Cuarte s/n, 22071 Huesca, España.
* Correspondencia: mvidegain@unizar.es

Abstract: The use of agricultural machinery can be one of the causes of forest fires, especially those machines operating under specific environmental conditions, such as winter cereal straw harvesters and balers. The objective of this study was to identify critical ignition points in agricultural balers by monitoring the temperature of their components under real working conditions. Temperature measurements were conducted during two agricultural seasons (2020 and 2021) on 6 machines with different characteristics. A total of 8 records were obtained by placing thermocouples on different machine components for extended periods of time. The temperatures reached varied depending on the machine and the component analyzed, with the feed fork brake of the compression chamber and the hydraulic pump experiencing the highest temperatures. None of the components reached the ignition temperature values established for the accumulated residue type in them.

Palabras clave: pacas prismáticas; residuos paja; sensor de temperatura; freno horquilla; residuos de empacado.

1. Introducción

Los incendios forestales son una amenaza grave debido a las consecuencias ambientales, materiales y humanas que generan. No están exclusivamente relacionados con la actividad de la maquinaria agrícola, pero existen casos contrastados que han sido consecuencia de la misma. Estos incendios resultan en la destrucción de patrimonio medioambiental, pérdidas económicas y la reducción de la capacidad productiva del suelo. Según datos del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [1], en España se producen anualmente un promedio de 7.091 conatos de incendios y 3.525 incendios mayores. En Aragón, entre 2001 y 2020, se registraron 7.820 incendios, con un 47% de ellos atribuidos a negligencias y accidentes, incluyendo un 8% relacionado con maquinaria agrícola [2].

Algunos tipos de maquinaria agrícola son más susceptibles a sufrir incendios debido a su modo de trabajo y época del año en la que realizan su actividad. Principalmente, dos de las máquinas más afectadas son las cosechadoras de cereal y las empacadoras.

Para el caso de las cosechadoras de cereal, Quick [3] enumera una serie de zonas potenciales para la generación del incendio. En resumen, estas zonas son: el motor y los conductos de salida de gases de combustión, las transmisiones, los cojinetes, los frenos, los cortocircuitos eléctricos y

otros elementos. La introducción de objetos extraños en la máquina puede ser otro posible riesgo de incendio.

En este mismo tipo de máquinas, Val-Aguasca et al. [4] concluyeron que la acumulación de superficie cosechada por la máquina tiene una influencia estadísticamente significativa sobre el riesgo de incendio, siendo a partir de las 6.000 ha acumuladas cuando el riesgo de incendio aumenta considerablemente. En pruebas realizadas *in situ* por los mismos autores sobre las tres zonas clave mencionadas, se detectaron temperaturas de hasta 300 °C en la zona del motor, más concretamente en el colector de escape. En la barra de corte, una cuchilla trabajando en condiciones de rozamiento alcanzó temperaturas superiores a los 400 °C. Dichas temperaturas, junto con la acumulación de residuo agrícola procedente de la cosecha de cereales, supondrían un alto riesgo de inicio de combustión. En este mismo trabajo se recogieron residuos paja de diferentes partes de las máquinas monitorizadas, se caracterizó su tamaño y se establecieron las temperaturas de ignición de las diferentes fracciones analizadas, tanto en trigo como en cebada.

En Estados Unidos, el grupo de Shutske [5,6], investigaron más de 4.000 incendios en cosechadoras y tractores, pudiendo acceder en 265 casos a las máquinas incendiadas para realizar sobre ellas un estudio detallado. En base a los datos obtenidos, los autores concluyeron que el 74% de los incendios se originaron en la zona del motor por diferentes causas (calentamiento de superficies, salida de gases de combustión y componentes eléctricos). También llegaron a la conclusión de que el material que inició el incendio generalmente fueron los residuos del cultivo recolectado, por delante de los restos de combustible y aceite.

En máquinas empacadoras los estudios realizados sobre el riesgo de incendio son escasos. Posiblemente debido a no ser máquinas autopropulsadas y por lo tanto carecer de motores de combustión.

En un estudio de Mickan [7] se puede consultar información del riesgo de incendio en empacadoras atendiendo a diferentes consideraciones. Entre las principales, cita la importancia del mantenimiento de cojinetes y del riesgo de combustión de las pacas al ser liberadas desde el canal de compresión, al exponerse repentinamente mayores niveles de oxígeno que en el interior. Sin embargo, no se han encontrado estudios que detallen puntos críticos de origen de incendio.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en este trabajo se ha planteado la monitorización de diferentes componentes de empacadoras agrícolas, concretamente empacadoras de grandes pacas prismáticas, con el objetivo de detectar posibles patrones de comportamiento y puntos críticos de origen de incendio que permitan establecer medidas preventivas adecuadas.

2. Materiales y métodos

Se obtuvieron registros de temperaturas en seis empacadoras diferentes, a lo largo de dos campañas de empacado de residuos de trigo y cebada (cinco empacadoras en la primera campaña y tres empacadoras en la segunda, dos de ellas repetidas).

Se instalaron sondas de temperatura (termopares tipo K) en diferentes zonas de cada máquina, además de una sonda de temperatura/humedad ambiental en el exterior, modelo HOBO Pro v2 Ext Temp/RH (Onset Computer Corp., Bourne, MA, EE.UU.). En cada máquina se instalaron cuatro sondas conectadas a un datalogger portátil (Data Logger THERMOMETER SE-520; TC-Direct, Madrid).

Con el objetivo de estudiar un grupo de máquinas heterogéneo, se monitorizaron empacadoras con diferentes diseños de fabricación, diferentes metodologías de trabajo (usuarios particulares, empresa de servicios). Además, se seleccionaron empacadoras con diferentes características técnicas (antigüedad, pacas realizadas al año y pacas acumuladas).

Las características de las seis empacadoras seleccionadas, pertenecientes a tres fabricantes, se detallan en la Tabla 1:

Tabla 1. Características de las empacadoras monitorizadas en la campaña 2020 y 2021.

Empacadora	Fabricante	Rastrillo	Nº pacas inicio	Nº pacas final	Periodo monitorización
#1	1	Sí	40	18.020	02/07/20-04/08/20
#2	2	Sí	8.100	19.000	09/07/20-22/09/20
#3	3	No	8.900	17.000	06/07/20-27/07/20
#4	3	Sí	84.970	87.954	22/07/20-18/08/20
#5	3	Sí	5.033	8.580	29/07/20-02/09/20
#6	1	Sí	146.000	157.898	23/06/21-07/09/21
#2	2	Sí	26.200	40.950	21/06/21-08/10/21
#5	3	Sí	11.000	18.200	23/06/21-16/09/21

Las sondas de temperatura se colocaron en puntos seleccionados en función de las zonas de riesgo detectadas en un cuestionario inicial, realizado entre diferentes usuarios de empacadoras con el objetivo de recopilar información basada en su experiencia, identificar puntos críticos de la maquinaria y caracterizar el perfil de las máquinas con mayor riesgo de incendio [8]. La colocación de las sondas también se realizó en función de la viabilidad de ser colocadas dependiendo de la tipología del chasis de los diferentes modelos. En la Tabla 2 se detallan los puntos de sondeo seleccionados en cada máquina.

Tabla 2. Localización de las sondas de temperatura en los 8 registros realizados en las empacadoras.

Localización sonda	Nº empacadora							
	1	2	3	4	5	6	7	8
(1) Canal compresión	X	X	X		X		X	
(2) Cojinete eje fuerza conjunto pick-up	X	X	X	X		X		
(3) Bomba hidráulica	X	X	X			X	X	
(4) Cojinete eje ventiladores	X			X				
(5) Freno horquilla alimentación cámara compresión		X	X	X	X	X		X
(6) Grupo mecánico empacadora	X				X			X
(7) Cojinete cardan transmisión a grupo mecánico				X				
(8) Freno tambor rueda empacadora					X		X	X
(9) Cojinete lado izquierdo eje alimentación pick-up						X		
(10) Multiplicador transmisión cardan t.d.f								X
(11) Transmisión fuerza pick-up	X						X	

Todas las sondas se programaron de forma sincronizada para que registraran datos cada 5 min. Posteriormente se realizó el pre-procesado de los datos, consistente en la eliminación de los datos de temperatura obtenidos durante el tiempo que no trabajaba la máquina.

Se analizaron estadísticamente las diferencias entre las temperaturas de cada componente o mecanismo en las diferentes empacadoras, con el objetivo de determinar las diferencias entre fabricantes. Asimismo, se registraron temperaturas en componentes de empacadoras del mismo

fabricante, pero con salida al mercado en años diferentes, para estudiar las diferencias entre modelos más modernos y/o con menor número de pacas acumuladas. La empacadora más antigua es la #6, con 146.000 pacas acumuladas La empacadora #1, del mismo fabricante que la #6, se estrenó la campaña en la que se instalaron las sondas. Del segundo fabricante, la empacadora más antigua es la #4, con 84.970 pacas acumuladas. Las empacadoras más actuales, también del segundo fabricante, son la #3 (8.900 pacas acumuladas) y la #5 (5.033 pacas acumuladas). La empacadora #2 correspondió a un tercer fabricante y el número de pacas realizadas al inicio de registro fue de 8.100.

Tras comprobar que los datos no cumplían con el criterio de normalidad, se analizaron las diferencias de temperaturas a través del ANOVA de Kruskal-Wallis, utilizando el software SPSS v.26 (IBM, Chicago, IL, EE.UU.).

3. Resultados y discusión

En la Figura 1 se muestran las temperaturas medias registradas en los diferentes mecanismos agrupados para cada una de las empacadoras estudiadas.

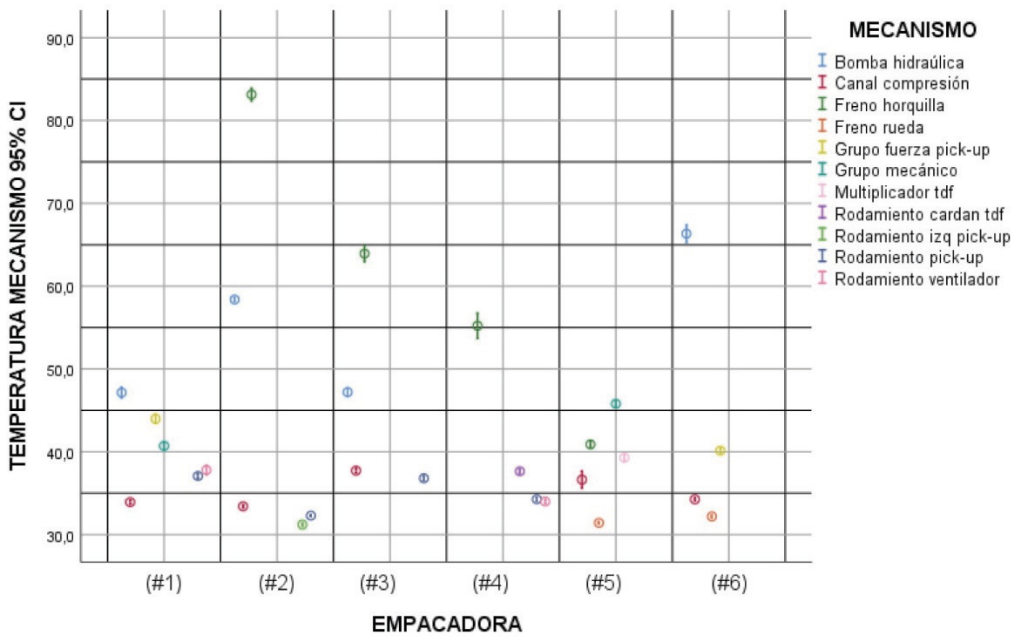


Figura 1. Temperatura media (°C) ± I.C. 95%, de los diferentes mecanismos registrados en cada una de las empacadoras monitorizadas.

La temperatura más elevada se registró en el freno de la horquilla, alcanzando los 190,6 °C. Este mecanismo, junto con la bomba hidráulica, son los puntos más calientes de las empacadoras, con mayor riesgo de incendio. En relación al efecto del modelo de empacadora sobre la temperatura obtenida en los mecanismos comunes a varias empacadoras, los mecanismos analizados fueron: el canal de compresión, el cojinete del eje de fuerza del pick-up, la bomba hidráulica, el freno de la horquilla del alimentador y la transmisión de potencia al conjunto pick-up.

Las Figuras 2 y 3 muestran las diferencias detectadas entre las temperaturas medidas en el freno de la horquilla y la bomba hidráulica, respectivamente, en función del modelo de empacadora.

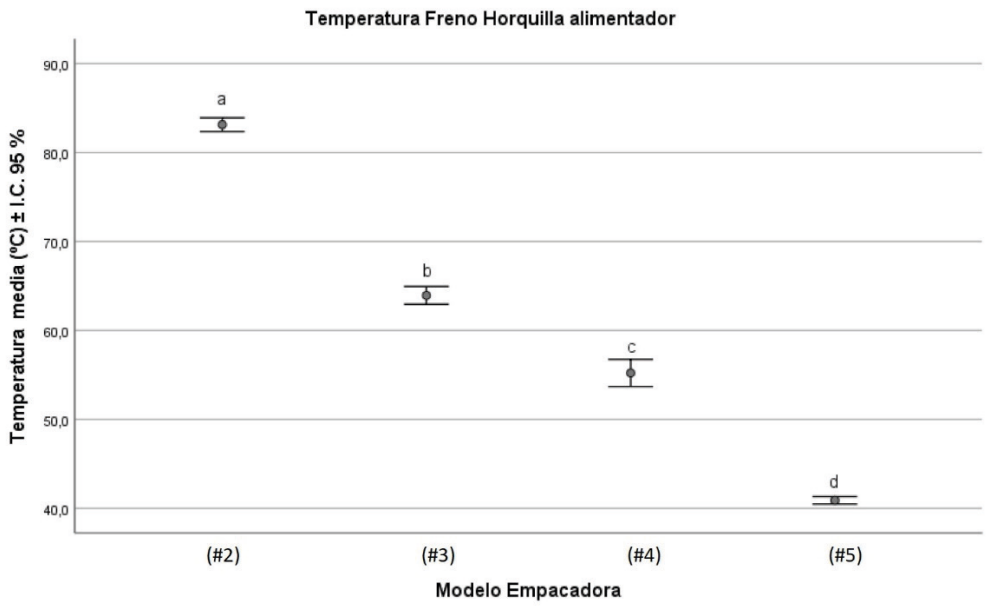


Figura 2. Temperatura media (°C) e intervalo de confianza 95% registrada en el freno de la horquilla de los modelos de empacadoras monitorizadas. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre temperaturas ($p < 0,05$; ANOVA de Kruskal-Wallis).

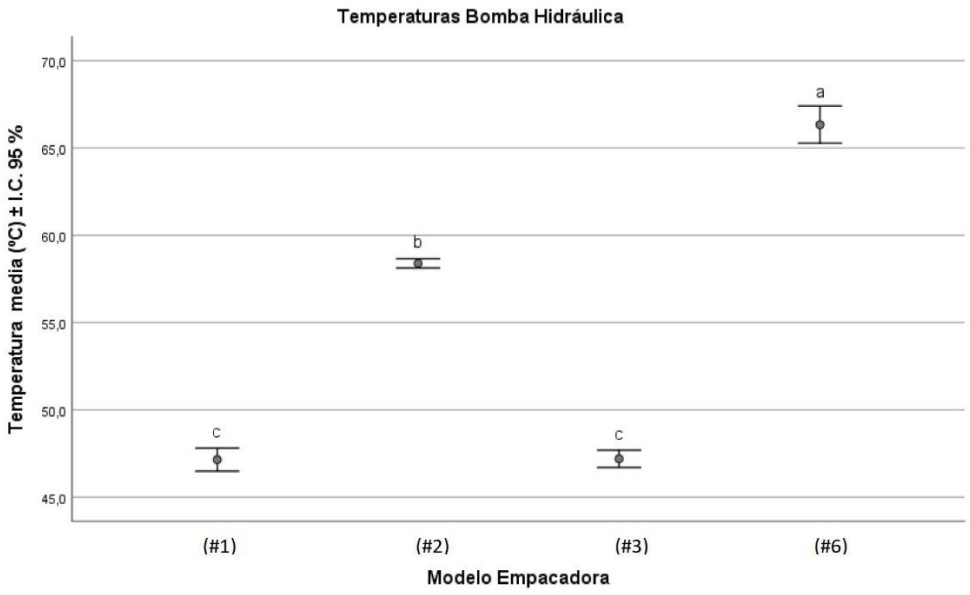


Figura 3. Temperatura media (°C) e intervalo de confianza 95% registrada en la bomba hidráulica de los modelos de empacadoras monitorizadas. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre temperaturas ($p < 0,05$; ANOVA de Kruskal-Wallis).

La bomba hidráulica se monitorizó en cuatro empacadoras. Entre las empacadoras del fabricante 1, la bomba hidráulica es el mecanismo que mayor diferencia presentó, siendo la empacadora #6 la que mayor temperatura registró entre todas las máquinas (66,3 °C), como puede observarse en la Figura 4.

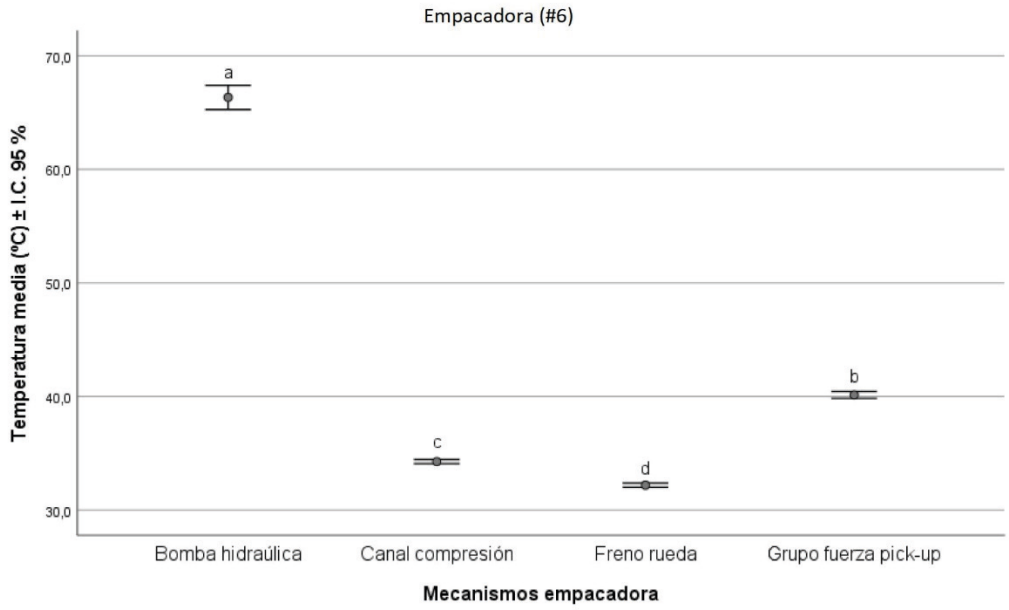


Figura 4. Temperatura media (°C) e intervalo de confianza 95% registrada en los mecanismos de la empacadora #6. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre temperaturas ($p < 0,05$; ANOVA de Kruskal-Wallis).

Por el contrario, la empacadora #1, registró temperaturas medias de 47,1 °C. Esta última empacadora y la #3 no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre sí.

El freno de la horquilla de la empacadora se monitorizó en cuatro empacadoras, presentando todas ellas diferencias estadísticamente significativas entre sí ($p < 0,0001$). El valor más alto lo registró la empacadora #2 (83,1 °C). En la Figura 5 se observan las diferencias detectadas en las temperaturas de los componentes de esta cosechadora.

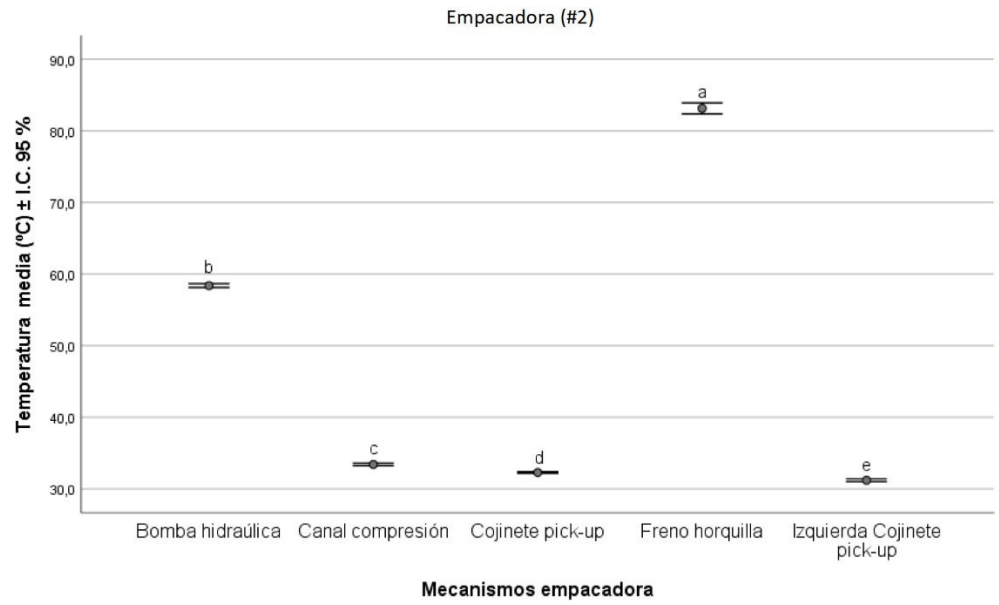


Figura 5. Temperatura media (°C) e intervalo de confianza 95% registrada en los mecanismos de la empacadora #2. Letras diferentes muestran diferencias significativas entre temperaturas ($p < 0,05$; ANOVA de Kruskal-Wallis).

En las empacadoras del fabricante 2, la temperatura más alta monitorizada en el freno de la horquilla, con diferencia sobre el resto, se registró en la empacadora #3 con un valor medio de 62 °C. Tras ésta, se encuentra la empacadora #4 con 49,6 °C y, por último, la empacadora #5 con 41,3 °C. Son diferencias claras, que no responden a un patrón concreto respecto la antigüedad o las pacas acumuladas, ya que la tecnología del mecanismo es común a las tres empacadoras. Podría ser motivado por el reglaje del mecanismo, encontrándose más ajustado en la empacadora #3, por lo que su rozamiento sería mayor y su temperatura más alta. El valor obtenido en la empacadora #5, podría haberse visto condicionado por la temperatura media ambiente, siendo menor que la monitorizada durante las condiciones de trabajo de las otras dos empacadoras del mismo fabricante, 5 °C por debajo.

Ambos componentes mostraron diferentes temperaturas según el modelo de empacadora, sin embargo, en los mismos modelos las temperaturas también mostraron diferencias. De este modo, las temperaturas resultaron variables en función de la metodología de trabajo que cada usuario de empacadora desarrolló, las condiciones climáticas de la situación geográfica donde la empacadora trabajó u otras posibles razones como el mantenimiento o la supervisión de los mecanismos.

El canal de compresión se monitorizó en un total de cinco empacadoras, siendo las empacadoras del fabricante 2 las que registraron las temperaturas más altas en esta zona (37,7 °C; 36,7 °C). La empacadora con más pacas acumuladas (#3), fue la que registró una temperatura media mayor. El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre todas las empacadoras, exceptuando las empacadoras #1 y #6 ($p = 0,292$). Las temperaturas del canal de compresión en estas empacadoras resultaron prácticamente iguales, ya que su diferencia de temperatura media varió de 34,25 °C, a 33,93 °C en la empacadora más moderna (#1), con una variación inferior a medio grado.

El cojinete del eje de fuerza del conjunto del pick-up se monitorizó en cuatro empacadoras. Todas las empacadoras mostraron diferencias estadísticamente significativas entre sí ($p < 0,0001$), siendo la empacadora #1 (37,1 °C) y la #3 (36,8 °C), las que registraron las temperaturas más altas con valores medios muy próximos entre sí. En las empacadoras del mismo fabricante (2), se registraron temperaturas medias 2,5 °C mayores en la empacadora más moderna, #3 (36,8 °C), frente a los 34,3 °C registrados en la #4.

La transmisión de fuerza al grupo del pick-up se registró únicamente en las empacadoras del primer fabricante. Este fabricante es el único entre las máquinas monitorizadas que transmite la potencia hasta el conjunto del pick-up mediante transmisión cardan. La temperatura más elevada se registró en la empacadora más moderna (#1). La media fue de 44,0 °C, respecto a los 40,1 °C que registró la más antigua (#6). Posiblemente este hecho se encuentre motivado por un mayor requerimiento de potencia en la empacadora #1, por su mayor capacidad de trabajo. No obstante, las diferencias de temperatura fueron reducidas.

Es importante tener en cuenta que el riesgo de incendio aumenta cuando las condiciones climáticas son adversas [6]. Venem y Shutske [9] concluyeron que el 48,5% de los incendios originados por maquinaria agrícola coincidieron con las horas de temperaturas más altas (2:00 PM-4:00 PM). En consonancia con estas conclusiones, las temperaturas máximas en los mecanismos se correspondieron con valores de temperatura ambiental alta, así como valores de humedad relativa baja.

Es importante destacar que ninguno de los componentes monitorizados alcanzó la temperatura de ignición establecida para los residuos más pequeños (< 250 µm) y abundantes en empacadoras, según el trabajo realizado por Val-Aguasca et al. [4], el cual se relacionó con los residuos recogidos y caracterizados en las máquinas de este trabajo, cuyos resultados se recogen en un trabajo completo [8].

4. Conclusiones

El foco de temperatura más elevado en las empacadoras fue el mecanismo del freno de la horquilla de alimentación, con una temperatura máxima de 190,6 °C y una media de 83,1 °C. El siguiente componente con la temperatura más alta registrada fue la bomba hidráulica, con una máxima registrada de 128,7 °C y una media de 66,3 °C.

Ninguna temperatura registrada alcanzó el valor de ignición (250 °C) de los residuos más pequeños (< 250 µm) y más abundantes en las empacadoras.

Existe correlación entre las distribuciones de temperatura de los componentes de la empacadora y la temperatura ambiente, aumentando la temperatura de los componentes cuando las temperaturas ambientales son elevadas.

Los componentes y mecanismos muestran diferencias significativas de temperaturas según el modelo de empacadora, sin embargo, en los mismos modelos las temperaturas también muestran diferencias. Siendo dependientes de la metodología de trabajo o el ritmo de empacado.

5. Agradecimientos

El presente trabajo ha sido desarrollado en el proyecto "SEFE Mejora de la seguridad en empacadoras" subvencionado mediante la orden DRS/35/2019 del Gobierno de Aragón, en el marco del Programa de Desarrollo Rural para Aragón 2014-2020. Los autores agradecen la colaboración de todas las entidades miembros del grupo de cooperación, así como de los usuarios de empacadoras, empresas de servicios y talleres agrícolas implicados.

Referencias

1. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Avance informativo de incendios forestales del 1 de enero al 31 de diciembre de 2022. 2023. En https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/estadisticas-avances.aspx#prettyPhoto.
2. Gobierno de Aragón. Estadísticas de incendios forestales en Aragón. 2023. En https://www.aragon.es/-/estadisticas-de-incendios.
3. Quick, G.R. An investigation into combine harvester fires. Grains Research and Development Corporation. 2010, 20 pp.
4. Val-Agüasca, J.P., Videgain-Marco, M., Martín-Ramos, P., Vidal-Cortés, M., Boné-Garasa, A. y García-Ramos, F.J. Fire risk associated with combine harvesters: analysis of machinery critical points. Agronomy. 2019, 9(12), 877, 1–13.
5. Shutske, J.M. y Field, W.E. An integrated loss control strategy for grain combine fires. International Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Chicago, USA, 1988.
6. Shutske, J.M., Field, W.E., Gaultney, L.D. y Parsons, S.D. Agricultural machinery fire losses: a preventative approach. Applied Enginering in Agriculture. 1990, 10(3), 175–192.
7. Mickan, F. Hay balers: a hidden fire danger. Department of Environment and Primary Industries, State Government of Victoria (Australia). 2013, 1–3.
8. Ayudán, C. Estudio del riesgo de incendio en empacadoras agrícolas. Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Agronómica. 2021. Disponible en https://zaguan.unizar.es/record/109740.
9. Venem, M. y Shutske, J.M. Combine fire prevention and control summit. CIGR XVth World Congress, American Society of Agricultural Engineers, Chicago, USA, 2002.

Evaluation of the Ground Speed Effect on the Performance of the Row-Side Continuous Canopy Shaking Harvester Prototype in a High-Density Olive Grove

A.B. Dias[1], A. Pinheiro[1], J.M. Falcão[2], J.O. Peça[1]

[1] Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Instituto de Investigação e Formação Avançada, Universidade de Évora, Núcleo da Mitra, Apartado 94, 7002-554 Évora, Portugal

email: adias@uevora.pt; jmop@uevora.pt; pinheiro@uevora.pt

[2] Torre das Figueiras Sociedade Agrícola Lda, Herdade da Torre das Figueiras, Apartado 23, 7450-909 Monforte, Portugal;
email: cffjosefalcao@gmail.com

Abstract:
In 2009 authors begin the development of the Row-Side Continuous Canopy Shaking Harvester (RSCCSH) prototype. The prototype comprises two symmetrical harvesters trailed by a farm tractor. Each harvester has a vibratory rotor with flexible rods, a catching platform with conveyors belts and a temporary storage bag. The detachment efficiency of canopy shakers are influenced by shaking frequency, ground speed and olive canopy characteristics.
Between 2015 and 2017 a trial to evaluate the ground speed effect in the performance of the RSCCSH was carried out. The trial was established in an irrigated olive orchard of Picual variety planted with the array 7m x 3.5m. In a randomly design with three replications, the following treatments were evaluated: V400 - ground speed of 0.4 kmh^{-1}; V600 - ground speed of 0.6 kmh^{-1}; V800 - ground speed of 0.8 kmh^{-1}; V1000 – ground speed of 1.00 kmh^{-1}; V750 - ground speed of 0.75 kmh^{-1}; V910 - ground speed of 0.91 kmh^{-1}.
Olive detachment efficiency tends to decrease with an increase in ground speed.
No significant differences were found between treatments in olive losses to the ground.
The best option in terms of harvesting rate (kgh^{-1}) will correspond to the interval between 600 and 800 mh^{-1}.

Keywords: canopy, shaker, efficiency.

1. Introduction

In Portugal there are about 377 thousand hectares of olive groves [0] of which 33% are high-density groves [1].

Olive harvest in high density olive orchards is usually performed by a tractor mounted trunk shaker and a canvas manually placed on the ground under the tree. Less labour demanding solutions based on inverted umbrellas linked to the trunk shaker have limited use since trees are very closely spaced to allow the umbrella to open.

Only changing from a discrete trunk shaking to a continuous canopy shaking principle will improve working capacity and will reduce the dependency over scarce and expensive labour.

The increase in the area of new olive groves that occurred in the first decade of 21st century in Portugal led to testing alternative harvesting solutions. The use of the Colossus straddle harvester proved to be inappropriate as it is a machine too heavy and expensive, hardly suitable to the difficult wet soil conditions encountered in Portugal.

A row-side, instead of over-the-row, concept imposing fewer limitations on tree growth is a technique bound for high-density olive groves and may even be adequate for the large trees of the traditional non-irrigated orchards [2].

In 2009 the authors started the development of the Row-Side Continuous Canopy Shaking Harvester – RSCCSH prototype [3].

This paper presents and discusses the results of research conducted on a 20-year-old intensive olive grove to evaluate the influence of ground speed in the performance of the RSCCSH prototype.

2. Material and Methods

2.1. Olive grove

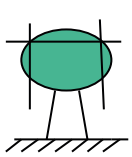
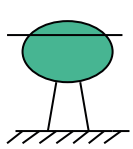
The high-density olive orchard (HD) used in the trial was established in 1996 in Herdade da Torre das Figueiras in the Alentejo region of southern Portugal (lat. 39º 03' 34.04'' N; 07º 28' 22.00'' W). This drip irrigated HD olive orchard of Picual cultivar was installed in an array of 7m x 3.5m.

The orchard was planted on Chromic Luvisol soil (FAO). This region is semi-arid with strong continental influence and an annual rain mean of 500 mm concentrated in the winter.

The orchard is drip irrigated twice a week, from May till October, receiving annually an estimated volume of 1500-2000 m^3 per hectare.

The HD olive orchard was sprayed to control olive leaf spot (Flusicladium *oleaginum (Castagne) Ritschel & U.Braun*), olive moth (Prays oleae Bernard), olive fly (*Bactrocera oleae Gmelin.)* and olive anthracnose (*Colletotrichum acutatum Simmons or Colletotrichum gloeosporioides Penz.)*. Weed control was done by spraying Glyphosate in the rows and with a shredder between rows. About 80 units of nitrogen, 30 units of phosphorus and 50 units of potassium were applied to the soil and by drip irrigation in average by year.
Table 1 shows the pruning interventions carried out in this olive grove between 2014 and 2017.

Table 1. Sequence of pruning interventions made in the olive grove between 2014 and 2017.

2014	2015	2016	2017
	No pruning	Manual pruning	

Legend:  

- mechanical pruning ("topping"); - mechanical pruning ("topping" + "hedging").

2.2. Equipment

The Row-Side Continuous Canopy Shaking Harvester - RSCCSH is a prototype (Figure 2) developed to remove fruits from the tree brunches, collect and transport the fruits to temporary storage [3].

The RSCCSH is based on two symmetrical machines, each one trailed by a tractor, moving alongside a same tree row, harvesting both sides of the trees. Fruit removal is made by a vibratory rotor with flexible rods for engaging and shaking the olive bearing branches. Vibration frequency of the vibratory rotor can be altered by adjusting the tractor power-take-off speed. Removed olives are collected on a platform and conveyed to a temporary storage bag [4]. Table 1 show the operational parameters of RSCCSH in each harvesting season.



Figure 2 – Row-side continuous canopy shaker prototype

In 2015 and 2016 tractors with continuously variable transmission (CVT) were used while in 2017 a tractor with powershift transmission had to be used (Table 2).

Table 2 – Tractors used to tow the RSCCSH prototype in each season

Harvesting season	2015	2016	2017
Tractor used in left unit	Fendt 714 Vario	Fendt 313 Vario	Fendt 313 Vario
Tractor used in right unit	Fendt 313 Vario	Fendt 714 Vario	Kubota 135 GXIII
PTO of left unit (*rpm*)	500	540	540

PTO of right unit (*rpm*)	500	540	540

2.3. Treatments

In the period from 2015 to 2017, the effect of ground speed on the performance of the RSCCSH prototype in olive harvesting was evaluated, and the following treatments were defined:

- V400 – a ground speed of the RSCCSH prototype of 0.4 kmh^{-1}
- V600 - a ground speed of the RSCCSH prototype of 0.6 kmh^{-1}
- V800 - a ground speed of the RSCCSH prototype of 0.8 kmh^{-1}
- V1000 – a ground speed of the RSCCSH prototype of 1.08 kmh^{-1}
- V750 - a ground speed of the RSCCSH prototype of 0.75 kmh^{-1}
- V910 - a ground speed of the RSCCSH prototype of 0.91 kmh^{-1}

Table 3 show the different ground speed of the RSCCSH prototype tested in the period between 2015 and 2017.

Table 3. Treatments evaluated in each year.

2015	2016	201
V400	V600	V750
V600	V800	V910
V800	V100	

In 2017, the need to use the Kubota 135GX III (Table 1) led to defined the treatments being defined according to the ground speed obtained in this tractor:

- V750 - 1st speed in the slow range with engine rotation that guarantees 540 rpm in the PTO. In the Fendt tractor was selected equal working speed for an engine rotation that ensures 540rpm in the PTO;

- V910 - 2nd speed in the slow range with engine rotation that guarantees 540 rpm in the PTO. In the Fendt tractor was selected equal working speed for an engine rotation that ensures 540rpm in the PTO;

In 2015, 12 olive grove rows were selected and randomly distributed for each treatment (table 4).

Table 4. Distribution of the olive rows by treatment

Olive row	Number of trees	2015	2016	2017
1	37	V600	V600	V750
2	41	V800	V800	V910
3	41	V400	V1000	V910
4	42	V800	V800	-
5	39	V600	V1000	V910
6	34	V400	V600	V750
7	31	V400	V1000	V910
8	33	V800	V800	V750

9	31	V600	V600	V750
10	29	V600	V600	V750
11	29	V400	V1000	V910
12	27	V800	V800	V750

2.4 Assessments

The time spend to harvest each plot was recorded. The mass of olives caught by the RSCCSH was measured by weighing the bags from each plot. The evaluation of the mass of olive removed but not caught by the harvester was done weighing the fruits collected on canvas placed under a group of 3 olive trees at 3 locations randomly selected in each plot. To quantify the mass of olives not removed by the harvester, all trees in each plot were vibrated by a trunk shaker complemented by manual harvest with poles. Total yield per tree was obtained by adding the mass of olives caught by the harvester to the mass of olives dropped to the ground plus the mass left on the tree.

Harvest efficiency was calculated as follows:

$$Harvest\ efficiency\ (\%) = \frac{\text{Mass of olives caught per tree}}{\text{Total yield per tree}}$$

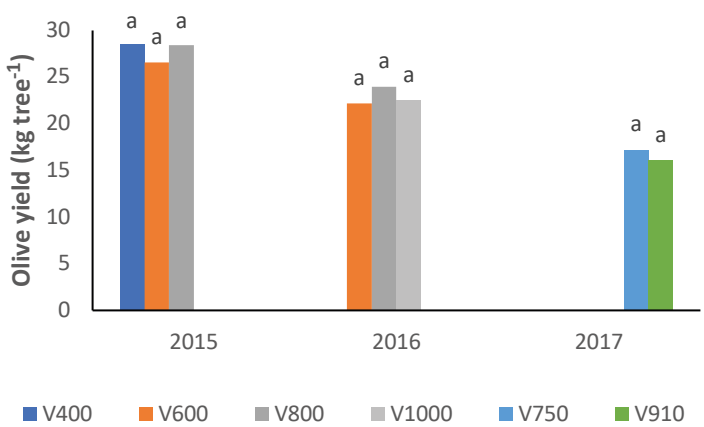
One-Way Analysis of Variance was performed to annual data and GLM Univariate Analysis for average data, using IBM SPSS version 24 software. Mean separation was performed by Multiple Range Duncan test at 5% significance level.

3. Results and Discussion

3.1. Olive yield

Figure 2 shows the average yield of olives per tree by treatment in each year. As the same pruning intervention were made all the treatments, in each year, no significant differences (P>0.05) were registered between treatments in each year.

The pruning interventions applied by the farmer may have contributed to the variation in olive yield between years.



Legend: V400 – ground speed of 400 mh^{-1}; V600 - ground speed of 600 mh^{-1};

V800 - ground speed of 800 mh^{-1}; V1000 - ground speed of 1000 mh^{-1};

V750 - ground speed of 750 mh^{-1}; V910 - ground speed of 910 mh^{-1}

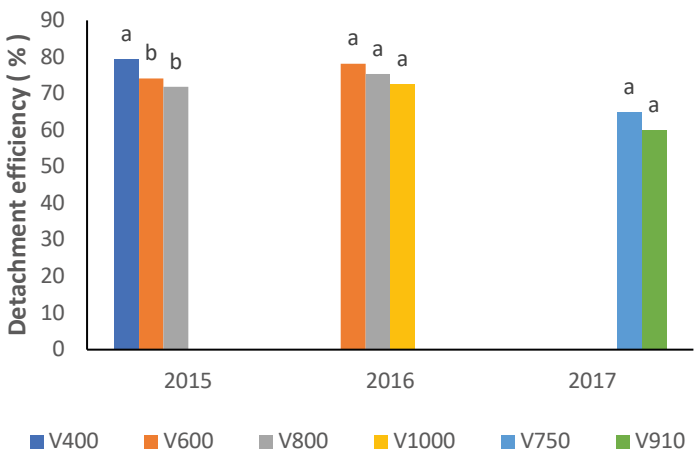
In each year, columns followed by the same letter are not significantly

different by Duncan multiple range test at the 5% level

Figure 2. Average olive yield by treatment in each year.

3.2. Olive detachment efficiency

Figure 3 shows the olive detachment efficiency obtained by treatment in ach year. The results shows that there is a tendency to reduce the detachment efficiency as the ground speed increase, although in 2015 there were significant differences (P<0.05) between treatments .



Legend: V400 - ground speed of 400 mh^{-1}; V600 - ground speed of 600 mh^{-1};

V800 - ground speed of 800 mh^{-1}; V1000 - ground speed of 1000 mh^{-1};

V750 - ground speed of 750 mh^{-1}; V910 - ground speed of 910 mh^{-1}

In each year, columns followed by the same letter are not significantly

different by Duncan multiple range test at the 5% level

Figure 3. Average olive detachment efficiency by treatment in each year.

The decrease in detachment efficiency with the increase of the ground speed could be due to the reduction of the vibration time, as mentioned by conforme referem Aragon e catro cit Castro.
This is due to the fact that a higher foward speed corresponds to a shorter period of contact between the flexible rods of the vibratory rotor and the olive canopy.
In canopy shakers, the interaction between rods and canopy is essential to ensure good fruit detachment. According to [4, 5] the zones of the canopy with less penetration of the rods receive lees aceleration, leading to less fruit detachment.

3.3. Olive losses

Figure 4 shows the losses of olives to the ground by treatment in each year. Although there was a slight decrease in the losses to the ground between 2015 and the other years, there were no significant differences (P>0.05) between treatments.

Olive losses to the soil can be caused by:

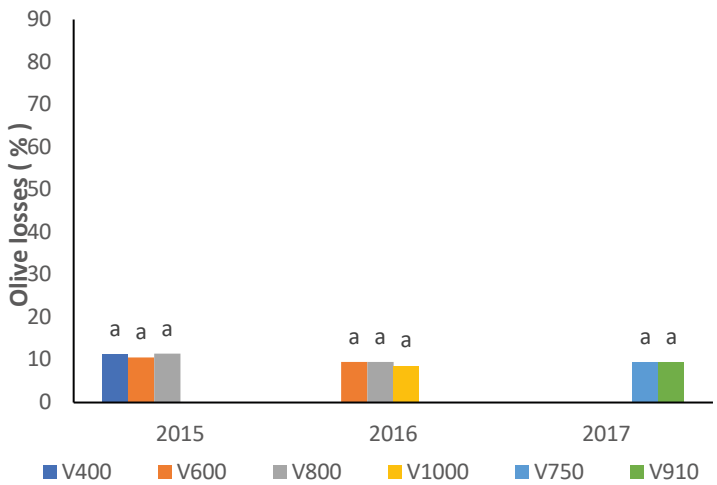
- an inadequate positioning of the machine-olive trunk interface, which is controled by an auxiliary operator;
- in the transition between conveyor belts.

Since it is the auxiliary operator who adjust the position of the machine to the tree row, when occur an increase in the forward speed, greater control of the deviations of the prototype to the tree row is required.

In 2016 and 2017, the decrease in the olive losses to the ground could be due to the higher experience of the auxiliar operators.

The losses of olives to the ground obtained was higher than those registered by straddle harvesters in hedge olive groves. To obtain lower straddle harvesters losses requires an adequate control of canopy distance to the soil.

In the RSCCSH it is necessary to improve the catching and transport system since a considerable part of the losses occurs in tne transition between conveyor belts.



Legend: V400 - ground speed of 400 mh^{-1}; V600 - ground speed of 600 mh^{-1};

V800 - ground speed of 800 mh^{-1}; V1000 - ground speed of 1000 mh^{-1};

V750 - ground speed of 750 mh^{-1}; V910 - ground speed of 910 mh^{-1}

In each year, columns followed by the same letter are not significantly

different by Duncan multiple range test at the 5% level

Figure 4. Average olive losses to the ground by treatment in each year.

3.4. Harvesting rate of RSCCSH

To calculate the harvesting rate of the RSCCSH the following assumptions were used:

- olive grove of Picual variety planted in the array of 7m × 3.5m;

- olive row with 64 trees (average number of trees by row in the olive grove);

- headland time spend by RSCCSH in average = 4 minutes;

- RSCCSH temporary storage capacity in *"big bags"* = 400*kg*;

- time required for changing *"big bags"* = 1 minute.

Table 5 shows the estimation of the harvesting rate by treatment in 2015.

Although the higher harvest yield by tree in treatment V400, a greater harvesting rate is obtained in the V800 treatment, due to the higher ground speed.

Table 5. Estimation of harvesting rate per treatment in 2015

Treatments	**Olive by tree** (kg)	**Trees by *"big-bag"***	**Stops**	**Harvest time** (min)	**Total time** (min)	**Harvesting rate** (tree hour^{-1})	**Harvesting rate** (kg hour^{-1})
V400	19.4	20	3	32.4	39.4	97.5	1891.5
V600	16.9	23	3	21.5	28.5	134.7	2276.4
V800	17.2	23	3	17.5	24.5	156.7	2695.2

Legend: Olive by tree - average olive yield harvested by tree; Trees by *"big-bag"* - number of trees required for changing "big-bag"; Stops – number of stops for changing "big-bag" by olive row; Harvest time – harvesting time spend by olive row; Total time – harvest time + time required for stops + headland time spend by RSCCSH

Table 6 shows the estimation of the harvesting rate by treatment in 2016.

The olive harvested per tree was lower in treatment V1000, while the V600 and V800 treatments obtained similar values. As a consequence, the harvesting rate of treatment V800, in kg of olives harvested per hour, was higher that that recorded in treatment V600 and with values nearest of those registered in the treatment V1000.

Table 6. Estimation of harvesting rate per treatment in 2016

Treatments	**Olive by tree** (kg)	**Trees by *"big-bag"***	**Stops**	**Harvest time** (min)	**Total time** (min)	**Harvesting rate** (tree hour^{-1})	**Harvesting rate** (kg hour^{-1})
V600	15.3	26	2	23.7	29.7	129.3	1978.3
V800	15.8	25	2	18.5	24.5	156.7	2475.9
V1000	13.6	29	2	14.7	20.7	185.5	2522.8

Legend: Olive by tree - average olive yield harvested by tree; Trees by *"big-bag"* - number of trees required for changing "big-bag"; Stops – number of stops for changing "big-bag" by olive row; Harvest time – harvesting time spend by olive row; Total time – harvest time + time required for stops + headland time spend by RSCCSH

Table 7 shows the estimation of the harvesting rate by treatment in 2017.

The mass of olives harvested per tree was slightly higher in treatment V750, contributing to obtain a higher harvesting rate (kg of olives by hour) in this treatment.

Table 7. Estimation of harvesting rate per treatment in 2017

Treatments	Olive by tree (kg)	Trees by *"big-bag"*	Stops	Harvest time (min)	Total time (min)	Harvesting rate (tree hour^{-1})	Harvesting rate (kg hour^{-1})
V750	9.5	42	1.5	18.3	23.8	161.3	1532.4
V910	8.1	49	1.3	15.3	20.6	186.4	1509.8

Legend: Olive by tree - average olive yield harvested by tree; Trees by *"big-bag"* - number of trees required for changing "big-bag"; Stops – number of stops for changing "big-bag" by olive row; Harvest time – harvesting time spend by olive row; Total time – harvest time + time required for stops + headland time spend by RSCCSH

4. Conclusions

An increase in the ground speed of the RSCCSH results in a decrease in the olive detachment efficiency. An increase of the forward speed beyond 750-800 mh^{-1} reduces considerably the harvesting rate due to the lower olive detachment efficiency.

The decision between 600 mh^{-1} and 800 mh^{-1} will depend on the choice between greater olive detachment and faster harvesting. At the beginning of the campaign the first option could be privileged progressively increasing the forward speed towards the end of the campaign.

5. Thanks

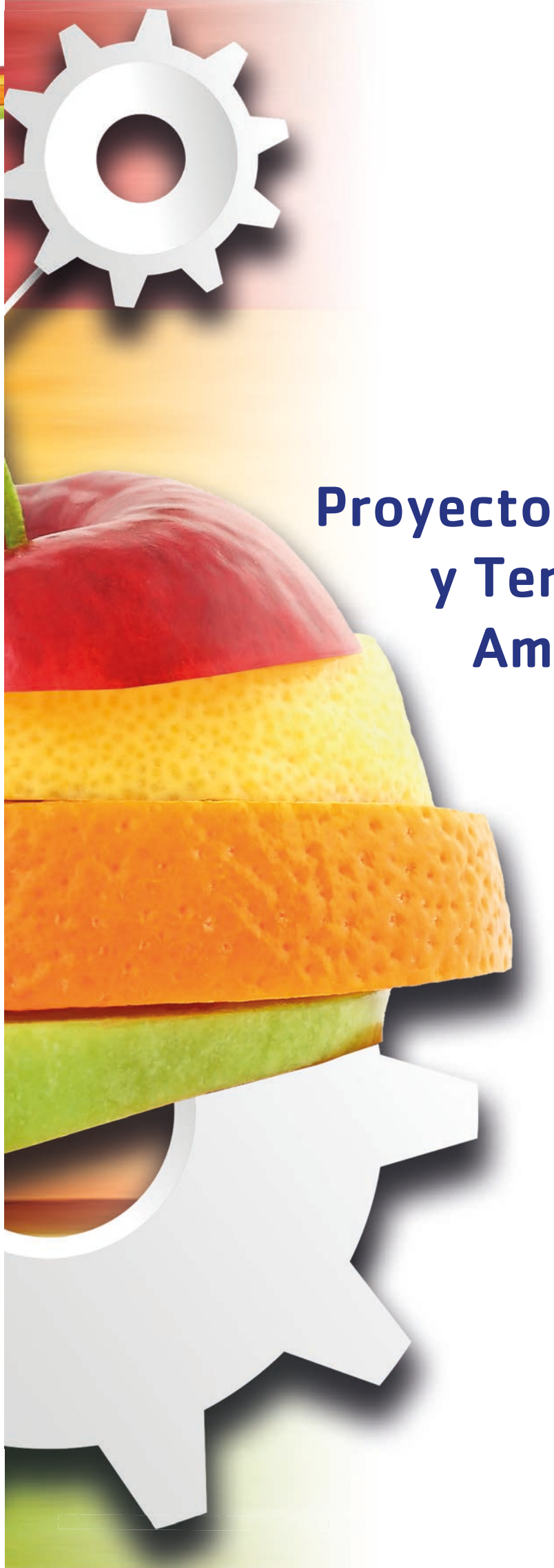
We acknowledge the National Funds through FCT - Foundation for Science and Technology under the Project UIDB/05183/2020. the project PRODER entitled "*Evaluation of the performance of the row-side continuous canopy harvesting machine*" from Ministry of Agriculture.

We also acknowledge "Torre das Figueiras Sociedade Agrícola Lda" for access to olive grove where this research was conducted.

References

26. INE (2021) Recenseamento Agricola - Análise dos principais resultados – 2019. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa, pp 70-72.
27. Consulai, Juan Vilar Consultores Estratégicos (2019) Alentejo: A liderar a Olivicultura Moderna Internacional. Relatório Final.
28. Castro-García, S., Blanco-Roldán, G.L., Muñoz-Tejada, R. and Gil-Ribes, J.A. 2011. Estudio de los parámetros de vibración de un sacudidor de copa en la recolección mecanizada del olivar tradicional. Proc. VI Congreso Ibérico de AgroIngenieria, Evora, Portugal, 4-7, setembro.
29. Peça, J.O., Dias, A.B., Pinheiro, A., Cardoso, V., Reynolds de Souza, D., Falcão, J.M. (2014). Side-Row Continuous Canopy Shaking Harvester for Intensive Olive Orchards. Acta Horticulturae, Number 1057, ISBN: 978 94 6261 047 7, pp. 391-397.
30. Dias AB, Falcão JM, Pinheiro A and Peça JO (2020) Evaluation of Olive Pruning Effect on the Performance of the Row-Side Continuous Canopy Shaking Harvester in a High-Density Olive Orchard. Front. Plant Sci. 10:1631. doi: 10.3389/fpls.2019.01631

31. Aragon-Rodriguez, F.; Dias, A.B., Pinheiro, A., Peça, J.. Días, I.L., Castro-Garcia, S. (2023) Assessment of a Side-Row Continuous Canopy Shaking Harvester and Its Adaptability to the Portuguese Cobrançosa Variety in High-Density Olive Orchards. Sensors 2023, 23, 1740. https://doi.org/10.3390/s23031740
6. Castro-Garcia, S.; Aragon-Rodriguez, F.; Sola-Guirado, R.R.; Serrano, A.J.; Soria-Olivas, E.; Gil-Ribes, J.A. Vibration monitoring of the mechanical harvesting of citrus to improve fruit detachment efficiency. Sensors 2019, 19, 1760.



Proyectos, Medio Ambiente y Territorio/ Projectos, Ambiente e Território

Efecto de un fitofortificante en las propiedades de suelo, producción y calidad del cultivo de melón

M.D. Gómez-López[1]*, J.I. Martínez-Moreno[1], S. Martínez-Martínez[1], A. Faz[1], J.A. Acosta[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Área de Ingeniería Agroforestal (Departamento de Ingeniería Agronómica). Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia). E-Mail: lola.gomez@upct.es

Abstract:

The excessive use of agrochemicals to increase yield and fruit quality can result in soil, freshwater, and groundwater contamination. Designing and using new products based on microorganisms, such as rhizosphere bacteria, could reduce intensive agrochemical application and subsequent potential contamination. Therefore, the effect of a biocontroller (Pseudomonas fluorescens) on the soil properties and yield quality and production of melon (Cucumis melo L.) was evaluated under field conditions. Control and treatment plots without and with a biocontroller applied with an irrigation system were assayed. Soils were monitored by physicochemical and biochemical analysis and yield quality analysis during crop development. Pseudomonas fluorescens produced an increase of organic carbon, carbon of the microbial biomass, β-glucosidase and arylesterase activities, and concentration of available manganese and potassium, while protease and phosphodiesterase activities decreased. Regarding the soil total nitrogen, a lower level is observed in the soils treated, which could indicate a higher consumption by the crop. Finally, P. fluorescens application increased fruit size and weight; therefore, biofertilization with this bacterium is a sustainable alternative to increase yield and fruit quality without increasing the use of chemical fertilizers and pesticides.

Palabras clave: biochemical properties; biocontroller; Cucumis melo; Growth promotion

1. Introducción

El abuso y la mala utilización de agroquímicos (fertilizantes y productos químicos) tiene efectos nocivos tanto para la salud de las personas como para el medio ambiente. Es por ello que el cambio de modelo de agricultura, encaminado a una agricultura sostenible es de vital importancia en el mundo actual, ya que ofrece el potencial para satisfacer nuestras necesidades agrícolas, algo que la agricultura convencional no lo hace [1]. Este tipo de agricultura utiliza unas técnicas de cultivo especiales en el que los recursos del medio ambiente pueden utilizarse plenamente y, al mismo tiempo, garantizar que ningún efecto dañino tenga lugar. Una de esas técnicas se basa en el uso de microorganismos ya que las poblaciones microbianas son fundamentales para los procesos que impulsan la estabilidad y la productividad de los ecosistemas agrícolas. Estos microorganismos favorecen el crecimiento de las plantas por la producción de fitohormonas, la solubilización de fosfatos inorgánicos, la absorción de N, el aumento en la asimilación de hierro, incrementando los rendimientos, e induciendo una resistencia sistémica en plantas contra un amplio espectro de patógenos foliares y de raíz [2,3].

La biofertilización microbiana consiste en el uso de microorganismos beneficiosos para mejorar las condiciones del suelo y obtener mayores rendimientos en los cultivos sin contaminar el medio ambiente. El uso de biofertilizantes en la agricultura tiene dos ventajas principales: una ecológica y otra económica. En cuanto a la ventaja ecológica, los microorganismos utilizados para

la fertilización biológica no son contaminantes ya que conservan el suelo desde el punto de vista de la fertilidad y la biodiversidad. La fertilización biológica es más económica en cuanto a su producción, por lo que también lo es su comercialización; como consecuencia su precio es más bajo que el de los fertilizantes químicos, con lo cual es posible reducir costes de producción en la explotación agrícola. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de un fitofortificante (*Pseudomonas fluorescens*) en las propiedades físico-químicas y microbiológicas/bioquímicas del suelo rizosférico implicadas en la dinámica de nutrientes en el sistema suelo-planta, así como su efecto en la calidad y producción del cultivo de melón a escala comercial.

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

La parcela de estudio se encuentra en el Campo de Cartagena, en una zona de producción agrícola cercana a la pedanía de El Jimenado, Municipio de Torre Pacheco (Figura 1). El clima del Campo de Cartagena podría definirse como árido, cuyo índice de aridez se ve incrementado en dirección Sureste a Noroeste. La temperatura media anual es de 17,5 ºC, con una pluviometría media anual cercana a los 300 mm, con un déficit hídrico entre 800 y 1400 mm.



Figura 1. Localización de la parcela experimental y diseño experimental

2.2. Diseño experimental y muestreo

El diseño experimental en campo consistió en la delimitación de 6 parcelas de 150 m^2 cada una. En tres de ellas se aplicaron bacterias (*Pseudomonas fluorescens*) en la dosis recomendada de 1 kg ha^{-1}; mientras que otras tres fueron usadas como parcelas control (CT) (Figura 1). La implantación del cultivo tuvo lugar el 2 de abril siendo la recolección el 8 de julio. Antes de la plantación se tomó una muestra compuesta de suelo (formada por 5 sub-muestras) a una profundidad de 0-30 cm en cada una de las parcelas experimentales. Al final del cultivo, se realizó otro muestreo de suelo, en este caso de suelo rizosférico. Para el análisis de calidad se tomaron al azar 5 frutos en cada una de las parcelas experimentales. Por su parte, la producción se determinó tanto por el número de frutos recolectados como por el peso total recolectado, tanto por parcela como por tratamiento.

2.3. *Análisis de laboratorio*

Una vez las muestras de suelo fueron llevadas al laboratorio, éstas fueron secadas a 30ºC durante 48-72h, tamizadas con un tamiz de diámetro de luz de 2 mm, y una fracción de suelo fue molida. Los análisis realizados fueron: pH del extracto 1:1 [4], conductividad eléctrica del extracto 1:5 [5], nitrógeno, carbono orgánico e inorgánico (Elemental Analysis LECO CHNS), capacidad de intercambio catiónico [6], análisis granulométrico [7], fósforo asimilable [8], hierro, cobre, zinc y manganeso asimilables [9], carbono de la biomasa microbiana [10], respiración basal [11], actividad

ureasa [12], arilesterasa [13], glucosidasa [14], fosfodiesterasa [15], fosfatasa [16], proteasa [12] y fosfatasa [16].

Los parámetros que se evaluaron para determinar la calidad de los frutos fueron los siguientes: peso, grosor y firmeza de la pulpa, grados Brix. La producción se determinó mediante recuento de los frutos en cada uno de los cortes y los pesos medios de los frutos determinados en el laboratorio.

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades físico-químicas y biológicas del suelo

En la Figura 2 se puede observar que el pH al inicio del ensayo es moderadamente alcalino [17]; lo cual se debe al alto contenido en carbonatos como se verá posteriormente. No existen diferencias significativas entre tratamientos. Los niveles de salinidad iniciales son superiores a los registrados al final del cultivo, lo cual muestra cómo las sales han sufrido el proceso de lixiviación, no obstante, en todos los casos los suelos son clasificados como suelos no salinos. El porcentaje de carbonatos son muy elevados [18], no existiendo diferencias significativas entre las muestras inicial y final. La textura, carbono orgánico y capaciadad de intercambio catiónico permaneces constante durante el cultivo. No existinedo diferencias significativas entre tratamientos.

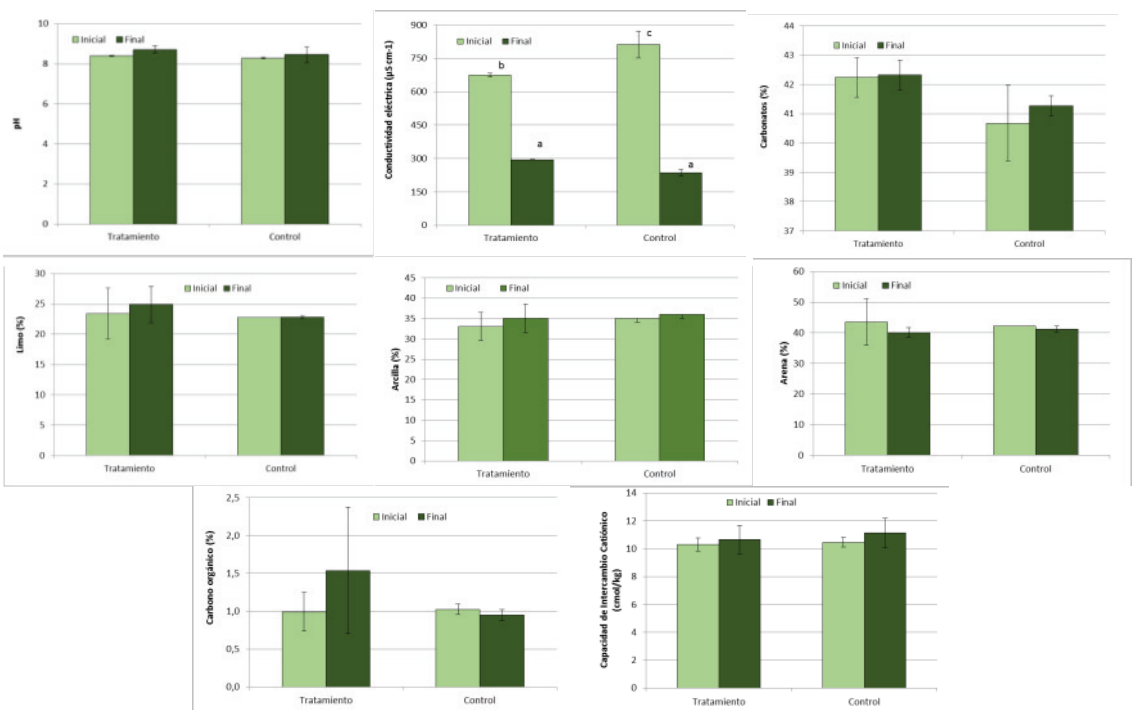


Figura 2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos de las parcelas

La Figura 3 muestra que no hay diferencias significativas entre el inicio y el final del cultivo en CBM. Sin embargo, si se observan las concentraciones de las parcelas control, se puede ver una acusada disminución del CBM al final del cultivo. Estos resultados indican que la aplicación de bacterias mantiene los niveles de las mismas durante el ciclo de cultivo. En relación a la respiración edáfica, se puede apreciar que en las muestras de suelo tratadas, la diferencia de niveles entre el inicio y el final del cultivo es significativo, con una amplia disminución. Sin embargo, en las muestras de control, la respiración se mantiene estable durante el cultivo. Estos resultados indican que aunque el número de microorganismos se haya incrementado, la mineralización de la materia orgánica se ve ralentizada. La actividad fosfatasa muestra una disminución al final del ciclo de cultivo en ambos tratamientos, siendo los niveles

estadísticamente similares en ambos casos. Observando las concentraciones de actividad fosfodiesterasa de las parcelas tratadas, se puede observar una elevada disminución de los niveles al final del cultivo (Figura 3). En cambio, los niveles de las parcelas control se mantienen constantes hasta el final del cultivo. Estos resultados podrían indicar que se ha producido la liberación de la mayor parte del fósforo orgánico durante el cultivo, quedando reducida esta actividad por falta de sustrato, al finalizar el mismo.

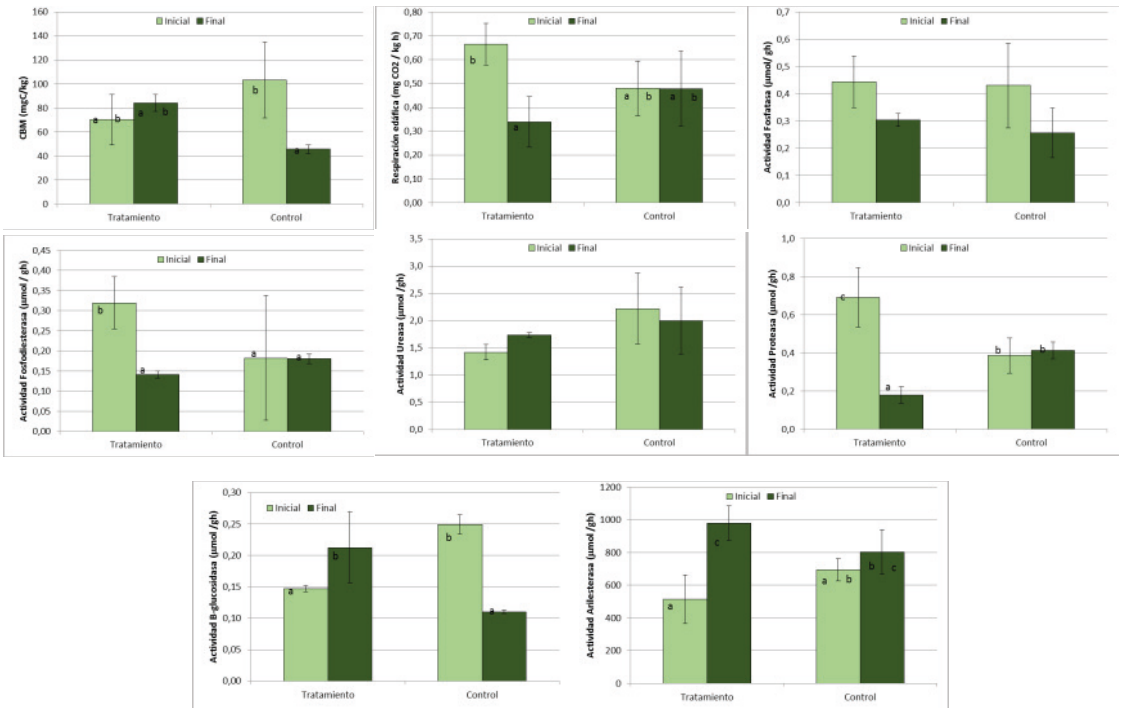


Figura 3. Actividades enzimáticas de los suelos de las parcelas

Los niveles de actividad ureasa en las parcelas control son superiores a las parcelas de tratamiento, produciéndose en éstas un aumento al final del cultivo, mientras que en las otras se produce una disminución (Figura 3). A pesar de ello, las diferencias no son significativas. Si observamos los niveles de actividad proteasa de las parcelas control, podemos apreciar que no existen diferencias entre el inicio y el final del cultivo. En cambio, en el suelo tratado, se advierte que el nivel inicial es mucho mayor que el final, indicando una reducción de esta actividad enzimática, posiblemente (al igual que en el caso del fósforo) por la liberación de la mayor parte de nitrógeno orgánico. En las parcelas en las que se aplicó el tratamiento la actividad β-glucosidasa aumentó al final del ciclo de cultivo, mientras que en las muestras control esta actividad disminuyó (Figura 3). Por lo que se podría concluir que las bacterias continúan transformando el carbono orgánico del suelo una vez finalizado el cultivo, lo cual estaría relacionado con el contenido del mismo en el suelo. Como en el caso anterior, en las parcelas tratadas se produce un aumento mucho más acusado de la actividad arilesterasa al final del cultivo, que en las muestras control.

3.2. Liberación de nutrientes

En la Figura 4 se puede apreciar una disminución del porcentaje de nitrógeno en el suelo al final del cultivo. Sin embargo es mucho más significativa la disminución en las parcelas de tratamiento que en las parcelas control, lo que indica un mayor consumo de este elemento por parte del cultivo. Los niveles de fósforo asimilable de las parcelas en tratamiento aumentan con el ciclo de cultivo, mientras que en el control disminuyen muy levemente hacia el final del ciclo. No obstante, estas diferencias no son estadísticamente significativas (Figura 4). La tendencia general es un aumento de cobre asimilable hacia el final del cultivo, ligeramente superior en las

parcelas control que en las de tratamiento. Sin embargo, las diferencias entre control y tratamiento no son estadísticamente significativas, tanto en las muestras iniciales analizadas como en las finales (Figura 4). Tanto en los suelos en los que se aplicó un fitofortificante como en los suelos control, los niveles de hierro asimilable son superiores al final del ciclo de cultivo, aunque las diferencias no fueron significativas. Se puede observar que en ambos tratamientos, al final del cultivo disminuyen los niveles de zinc asimilable. No obstante, las diferencias entre los niveles inicial y final de tratamiento son mínimas; al igual que pasa en los niveles inicial y final de las muestras control (Figura 4). Se puede observar un aumento en los niveles de manganeso al final del ciclo con respecto a los niveles iniciales, tanto en el suelo con tratamiento como en el suelo control, siendo más acusado en el caso de las parcelas tratadas, lo que podría indicar que las bacterias aplicadas favorecen la liberación de este elemento en el suelo (Figura 4).

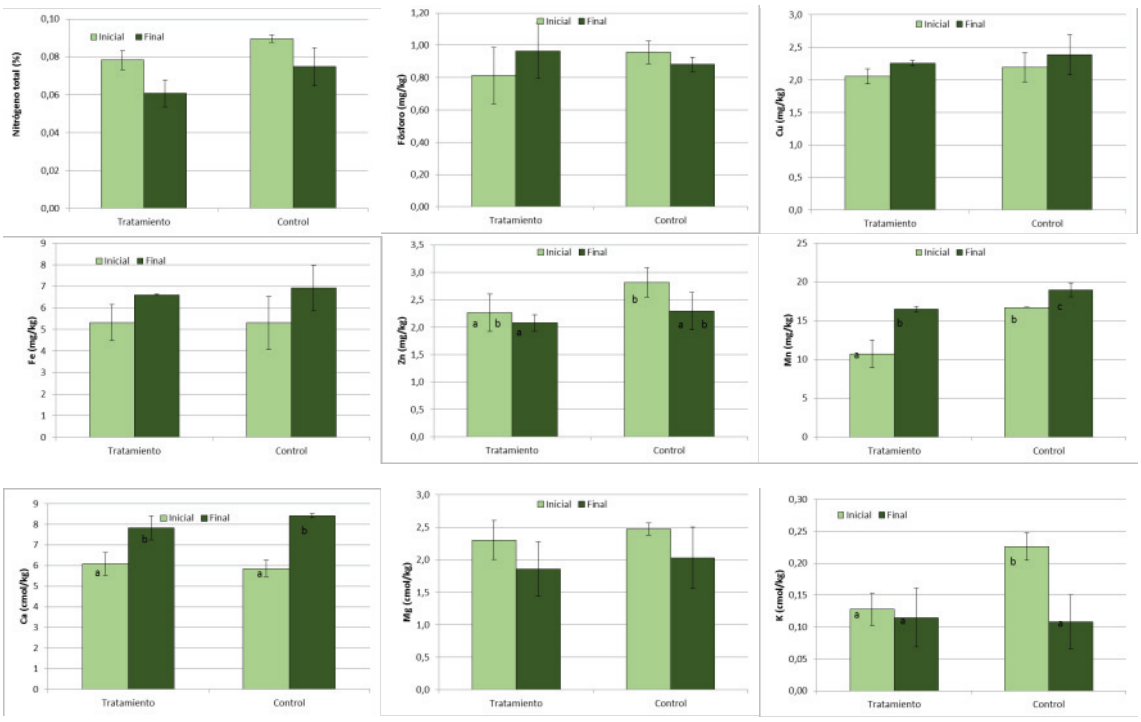


Figura 4. Concentración de nutrientes de los suelos de las parcelas

En la figura 4 se observa que ocurre un aumento del calcio de cambio al final del cultivo, tanto en las parcelas de tratamiento como en las parcelas de control. Los niveles, en cambio, no presentan diferencias importantes entre ambos tratamientos. Los niveles de magnesio de cambio tanto en las parcelas de tratamiento –al inicio y al final del ciclo- son muy similares a los de las parcelas de control, cuya tendencia es a disminuir al final del ciclo. Se puede observar que en las parcelas tratadas los niveles de potasio de cambio son similares antes y después del cultivo, con una ligera disminución al finalizar el cultivo. Sin embargo, en las parcelas en las que se llevó a cabo el control, se aprecia una acusada disminución del nivel al final del cultivo. Esto podría indicar que las bacterias aplicadas favorecen la liberación de este elemento impidiendo su disminución en el suelo, tal y como se observa en las parcelas control.

Calidad y producción

En lo referente a la calidad de los frutos recolectados, a continuación se presentan los parámetros evaluados (peso, grosor de pulpa, dureza de pulpa y ºbrix) para cada uno de los tratamientos (Figura 5). El melón Piel de Sapo se caracteriza por poseer frutos uniformes en cuanto a calidad y producción, con un peso medio comprendido entre los 1,5 y 2,5 kg. La Figura

5 muestra los pesos de los frutos estudiados. En el gráfico podemos observar que en las tres mediciones que se realizaron, los pesos de los frutos que habían sido tratados son superiores a los pesos de los frutos control, con pesos superiores a los 3 kg en las parcelas tratadas, alcanzando los 3,5 kg en el 1º y 2º corte. Por el contrario, en las parcelas control era inferior a los 3 kg, siendo incluso menor a los 2,5 kg en el primer control de calidad.

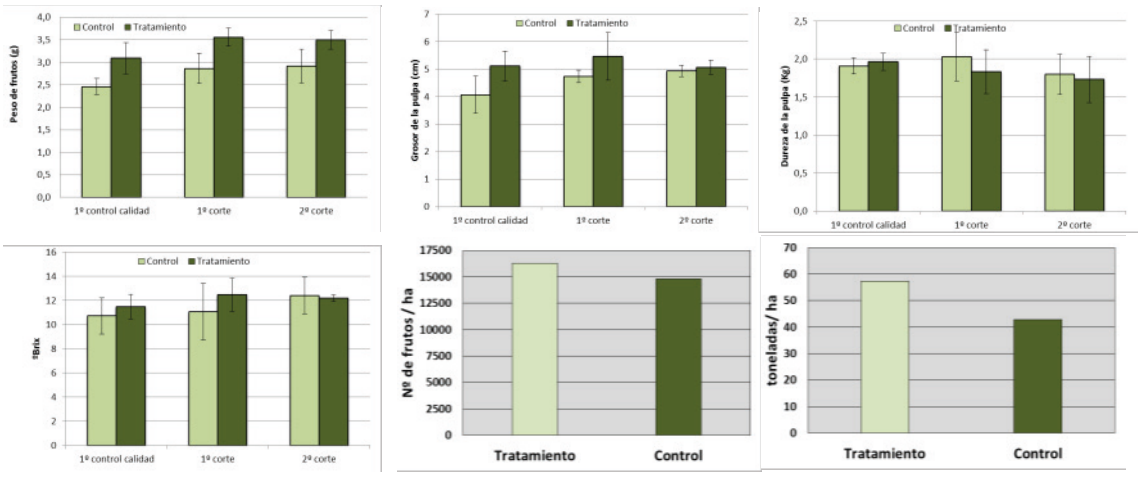


Figura 5. Calidad y producción de melón

La tendencia general es que los frutos en los que se aplicó el tratamiento poseen una pulpa más gruesa que en los frutos control, y por lo tanto mayor cantidad de fruto consumible (Figura 5). En el 1º control de calidad la dureza de la pulpa de los frutos en tratamiento es ligeramente superior a la de las frutas control. Sin embargo, en los otros cortes, podemos ver que es más dura la pulpa de los frutos control que los de tratamiento, lo que podría indicar una mayor maduración en este último caso en el momento de la recolección (Figura 5). Los frutos que fueron tratados poseen un mayor contenido en azúcares que los frutos control, aunque en el 2º corte ésta sería semejante. Finalmente indicar que tanto el número de frutos como las toneladas recolectadas fueron superiores en las parcelas tratadas, entorno al 10 % se incrementan los frutos y alrededor de un 30% las toneladas recolectadas (Figura 5).

4. Conclusiones

Tras la evaluación del comportamiento del suelo, planta y parámetros de calidad del melón en plantas control y en plantas tratadas con *Pseudomonas fluorescens*, se puede concluir que el tratamiento tiene efectos positivos sobre el cultivo del melón. Según los resultados obtenidos en relación a las propiedades del suelo, se podría concluir que el tratamiento con *Pseudomonas fluorescens* no afecta significativamente al pH, salinidad, carbonatos, textura, capacidad de intercambio catiónico, y actividades ureasa y fosfatasa. Por el contrario, produce un aumento al finalizar el cultivo de carbono orgánico, carbono de la biomasa microbiana y actividades β-glucosidasa y arilesterasa; mientras que disminuyen las actividades proteasa y fosfodiesterasa quizás debido a la liberación de la mayor parte de fósforo y nitrógeno orgánico presente en la materia orgánica del suelo.

Respecto a la liberación de los nutrientes se puede decir que la aplicación de bacterias no afectó significativamente en los contenidos de cobre, hierro, zinc, calcio, magnesio y fósforo asimilable en los suelos estudiados. Por el contrario, se produjo un aumento en la concentración de manganeso y potasio, que aunque no superó a la concentración de las parcelas control, sí impidió su disminución debido al consumo por parte del cultivo. Con respecto al nitrógeno total en el suelo, se observa un menor nivel en los suelos tratados con el fitofortificante, lo cual podría indicar un mayor consumo del mismo por parte del cultivo.

Los parámetros de calidad estudiados se ven favorecidos cuando se aplican los fitofortificantes. Los frutos poseen un ligero aumento de peso, la pulpa más gruesa, una menor dureza de ésta, y mayor cantidad de grados Brix, por lo que los frutos tratados son ligeramente más dulces que los frutos en el control. Los resultados mostraron un incremento entorno al 10 % en los frutos recolectados y alrededor de un 30% en las toneladas recolectadas.

Referencias

1. Bhattacharyya, P. N., Jha D. K. 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. World J. Microbiol. Biotechnol. 28, 1327-1350.
2. Boddey, R.M., Oliveira, O.C., Urquiaga, S., Reis V.M., Olovares, F.L., Baldani, B.L.D. and Dobereiner, J. 1995. Biological nitrogen fixation associated with sugar cane and rice: Contribution and prospects for improvements. Plant and Soil 174:195-209.
3. Dobbelaere, S., Vanderleyden, J., Okon, Y. 2003. Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. Plant Sci. 22, 107-149.
4. Peech, M. 1.965. Hidrogen-ion activity. C. A. Black (ed.). Methods or Soil Analysis. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U.S.A. 2, 914-916.
5. Andrade, G., DeLeij F. A., Lynch J. M. 1998. Plant mediated interactions between Pseudomonas fluorescens, Rhizobium leguminosarum and arbuscular mycorrhizae on pea. Lett. Appl. Microbiol. 26, 311-316.
6. Chapman H. D. 1965. Cation Exchange Capacity. In C. A. Black (ed). Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U.S.A. 2: 891-900.
7. F.A.O.-I.S.R.I.C. 2006. Guidelines for Soil Description. 4th edition (revised). F.A.O. Roma, 97pp.
8. Watanabe, F.S., Olsen, S.R. 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO3 extracts from soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29, 677-678.
9. Linsay W.L. y Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 42-428.
10. Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology & Biochemistry 19, 703-707.
11. Anderson, J.P.E. 1982. Soil respiration. En: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, (Eds.). Methods of soil analysis, part 2, 2nd edition. Amercian Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. pp. 837-871.
12. Kandeler, E., Stemmer, M., Klimanek, E.M. 1999. Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fraction to long-term management. Soil Biology & Biochemistry 31, 261-273.
13. Zornoza, R., Landi, L., Nannipieri, P., Renella, G. 2009. A protocol for the assay of arylestease activity in soil. Soil Biology & Biochemistry 41, 659-662.
14. Tabatabai, M.A. 1982. Soil Enzymes. En: Page, A.L., Millar, E.M., Keeney, D.R. (Eds.). Methods of Soil Analices. Part 2. Chemcial and Microbiological Properties. Soil Science Society of America , Inc, Madison, pp. 903-947.
15. Bowman, M.G., Tabatabai, M.A. 1978. Phosphodiesterase activity in soils. Soil Science Society of America Journal 42, 284-290.
16. Tabatabai, M.A., Bremner, J.M. 1969. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of a soil phosphatase activity. Soil Biology & Biochemistry 1, 301-307.
17. Porta J., López M. y Roquero C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. (2º ed) Mundi Prensa. Madrid. 849 pp.
18. Urbano P. 2001. Tratado de fitotecnia general. Ed. Mundi Prensa. Madrid 895 pp.



Desarrollo y Evaluación de Redes Neuronales Artificiales para la Predicción de Temperaturas en Parques y Huertos Urbanos de la ciudad de Valladolid, Castilla y León, España.

Francisco Tomatis[1], Francisco J. Diez[1], Maria Sol Wilhelm[2], Luis Manuel Navas-Gracia[1]

[1] Department of Agricultural and Forestry Engineering, University of Valladolid, Campus La Yutera, 34004 Palencia, Spain. francisco.tomatis@uva.es; x5pino@yahoo.es ; luismanuel.navas@uva.es
[2] Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe 3000, Argentina. msolwilhelm@gmail.com

Abstract: Being the leading cities in a changing world from the demographic and climatic aspects, urban green spaces are playing a key role in improving people's quality of life through their power to mitigate urban temperatures. Within these spaces, urban gardens have a particular and dynamic vegetation, which leads us to focus on studying their potential for urban cooling. In this article, Artificial Neural Networks (ANNs) have been carried out with the aim of making daily and hourly predictions of the ambient temperature in Downtown Points Without Vegetation, in a Forested Urban Park and in Urban Gardens in the city of Valladolid, Castilla y León, Spain to obtain a better prediction and estimation of temperatures. Therefore, different ANNs were constructed and evaluated from various combinations of Inputs, Hidden Neurons, and Outputs until the best results were achieved in the 6-x-1 Architecture. Under the practical rule of "*making networks simple, to obtain better results*", the best result of the 6-x-1 Architectures, analyzed by means of the Root Mean Square Error (RMSE), shows that for the Urban Garden of "*Valle de Arán*" values of RMSE=0.42 °C are found.

Palabras clave: ambiente urbano; clima urbano; temperatura urbana; espacios verdes urbanos; artificial neural networks (ANNs)

1. Introducción

1.1. Consideraciones e importancia del Clima Urbano.

Actualmente, más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y se estima que sea el 60% para el año 2030 [1]. Por tanto, lograr ciudades más sostenibles, habitables y resilientes se encuentra entre los mayores desafíos para la política y planificación urbana del siglo XXI [1,2].

El concepto "urbano" incluye entornos que van desde pueblos rurales hasta megaciudades [3]. Las áreas urbanas se caracterizan por la heterogeneidad espacial [4], menor albedo, mayor conductividad térmica y mayor capacidad calorífica de los materiales de construcción [5,6]. En consecuencia, los climas urbanos son considerados como un microclima que resulta del efecto combinado de las edificaciones y las actividades humanas que pueden causar un efecto notorio en la dinámica de la energía térmica de una ciudad [7].

El efecto Isla de Calor Urbano (UHI por sus siglas en inglés) se puede definir como el desarrollo de temperaturas más altas en el centro de la ciudad en comparación con las áreas rurales adyacentes [7,8] y se considera una modificación climática única. Numerosos estudios [6,9-11] han confirmado que cuanto mayor es la proporción de sellado y menor la proporción de vegetación en una ciudad, más pronunciado es el efecto UHI [6].

En este contexto, especialmente por motivos del cambio climático, se destaca que las áreas urbanas no se encuentran suficientemente adaptadas al calentamiento global [12]. Por tanto, el efecto UHI exacerba las condiciones ya cálidas que se sienten en las ciudades [13-16] y hace que las personas a menudo estén expuestas a un calor más alto [17], afectando su calidad de vida [18]. Si bien los espacios verdes urbanos son un recurso muy limitado y amenazado [4,19,20], la cubierta vegetal tiene el potencial de reducir las temperaturas y las olas de calor [17,21-23], por tanto, ser parte de la adaptación climática de las ciudades.

Con el afán de estudiar el potencial de enfriamiento provocado por los espacios verdes urbanos, específicamente los Parques y Huertos Urbanos (espacios verdes particulares, ya que poseen un carácter productivo y su vegetación es dinámica), esta investigación muestra que es posible estimar y predecir sus respectivas influencias en la temperatura urbana de una ciudad a partir de Redes Neuronales Artificiales (RNAs o ANNs por sus siglas en inglés).

1.2. Desarrollo y utilidad de las ANNs para la estimación y prediccion de las Temperaturas Urbanas.

Para conocer las temperaturas de las ciudades, generalmente se consideran como propias las temperaturas que se registran en Estaciones Meteorológicas (EMs) de proximidad, ubicadas en su mayoría en sitios periurbanos y/o rurales. Sin embargo, a medida que aumenten los efectos de UHI, las temperaturas registradas por las EMs serán cada vez menos representativas del clima urbano. Otra opción más precisa para conocer las temperaturas urbanas es la colocación de sensores ubicados estratégicamente en varios puntos de la ciudad para obtener datos *in situ*, pero no todos los Ayuntamientos quieren y/o pueden invertir en este tipo de dispositivos por su coste económico o por los riesgos de robo, daño o destrucción. En consecuencia, surgen las ANNs como opciones viables para lograr predicciones y estimaciones de temperaturas ambientales urbanas en diversos puntos de una ciudad. Su practicidad se debe a la fiabilidad de los resultados obtenidos, generados a partir de unos pocos datos urbanos registrados (sin necesidad de tener sensores en la ciudad de forma constante y permanente).

Las series temporales de temperatura ambiente se estudian para realizar su predicción desde diferentes modos: uno de estos enfoques las analiza con ANNs, que pueden aprovechar al máximo cierta información desconocida y oculta en los datos climáticos, aunque esta información no puede ser extraída directamente [24,25]. Los estudios de predicción y estimación de variables meteorológicas se centran en los datos medidos como entradas al modelo ANN [26]. Franco *et al.* 2020 [27], encontraron que hay una falta de estudios que usen modelos ANNs y que se centren en generar datos en sitios donde dichos datos no están disponibles, para que puedan usarse como entradas para otros modelos. Otros autores, además de las ANNs, también han desarrollado diferentes técnicas de inteligencia artificial (como algoritmos genéticos, lógica difusa o técnicas híbridas) para estimar la temperatura ambiente [25,26], considerando diferentes tiempos en escalas (mensual, diaria y horaria) o incluyendo coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud) de las fechas en las que se aplican los pronósticos.

En este artículo, estudiamos la temperatura ambiente diaria (promedio) y su estimación de la distribución media horaria—i.e., ($T_{0h}(t)$,…, $T_{23h}(t)$)—a través de modelos basados en ANN y utilizando datos de temperatura ambiente promedio medidos en la ciudad de Valladolid, Castilla y León, España. Los datos considerados provienen de sensores urbanos colocados por el Ayuntamiento de Valladolid y por la Universidad de Valladolid (UVa) en cinco Puntos Céntricos Sin Vegetación, en un Parque Urbano Forestado y en cuatro Huertos Urbanos.

El objetivo principal de este trabajo es realizar predicciones diarias y horarias de la temperatura ambiente en diversos puntos y espacios verdes urbanos de Valladolid para obtener un mejor resultado utilizando el menor número de entradas posible y facilitando su aplicación práctica. Por lo tanto, se construyeron y evaluaron diferentes ANNs a partir de diversas combinaciones de Entradas, Neuronas Ocultas y Salida hasta lograr los mejores resultados en la Arquitectura 6-x-1.

El modelo de Arquitectura 6-x-1, formulado para la estimación de la temperatura ambiente horaria media, tiene 6 entradas (5 provenientes de sensores urbanos del Ayuntamiento de Valladolid en Puntos Céntricos Sin Vegetación + la hora del día), y una neurona en la capa de salida (estimación para el Parque Urbano Forestado y para cada uno de los Huertos Urbanos) a la misma hora del día determinada. El mejor resultado de las Arquitecturas 6-x-1, analizada por medio del Root Mean Square Error (RMSE), muestra que para el Huerto Urbano de "*Valle de Arán*" se encuentran valores de RMSE=0,42 °C.

2. Materiales y métodos

2.1. Los datos de temperatura ambiente considerados para la ANNs con información sobre la ubicación, características y proceso de estandarización de los sensores urbanos utilizados en Valladolid.

Valladolid es una ciudad española situada en el cuadrante noroccidental de la Península Ibérica [28]. Según el INE [29], al 1 de enero de 2022 la ciudad de contaba con 295.639 habitantes.

Según la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático del municipio de Valladolid [28], la altura media sobre el nivel del mar de la ciudad es de 691 m.s.n.m., ya que la ciudad se encuentra en una zona mayoritariamente plana [28]. Su clima se clasifica como mediterráneo-continental, con precipitaciones medidas en torno a los 400 mm/año y una temperatura media que apenas supera los 12 °C. Sin embargo, los modelos climáticos predicen que el clima se verá fuertemente afectado por el aumento de las emisiones, generando cambios de considerable magnitud. A futuro, bajo la influencia del cambio climático, las tendencias de temperatura en los escenarios más desfavorables (RCP8.5 y RCP4.5) para Valladolid son:

- Disminución de: Temperatura mínima; Temperatura mínima extrema; Número de días de heladas; grados día de calefacción [28].
- Aumento de: Temperatura máxima; Temperatura máxima extrema; Amplitud térmica; Número de días cálidos; Número de días de olas de calor; grados día de enfriamiento [28].

Para los modelos de ANNs desarrolladas en este artículo, los datos de temperatura ambiente (promedios) utilizados para Valladolid son del 21/06/2022 al 18/07/2022 para la etapa de formación y del 19/07/2022 al 31/07/2022 para la etapa de validación.

Los datos iniciales han sido recogidos por 5 sensores (nanosensores) de que dispone el Ayuntamiento de Valladolid en varios Puntos Céntricos Sin Vegetación de la ciudad ("*Puente Poniente*", "*Plaza San Miguel*", "*Catedral*", "*Don Sancho*" y "*Dos de Mayo*"), por 12 sensores (Onset HOBO UA-002-64) colocados por la UVa en cuatro Huertos Urbanos ("*Jardín Botánico*", "*Valle de Arán*", "*Los Santos-Pilarica*" y "*Parque Alameda*") y por 2 sensores colocados por la UVa en un Parque Urbano Forestado (denominado "*Campo Grande*") en Valladolid **(Figura 1)**.

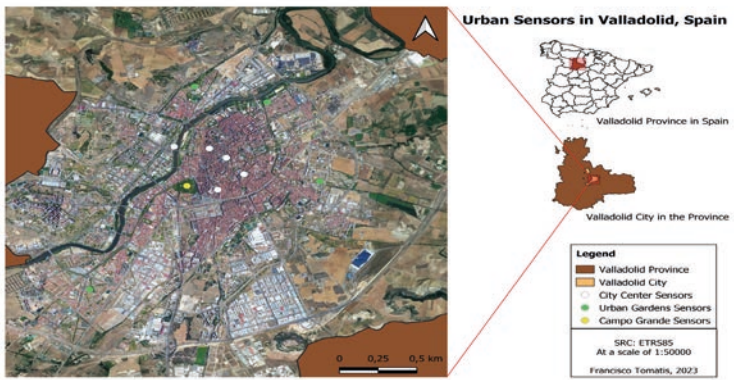


Figura 1. Localización de los sensores urbanos en Valladolid, considerados para las ANNs.

Para la estandarización de sensores, los sensores UVa se colocaron en los mismos lugares donde se encuentran los sensores del Ayuntamiento, proceso conocido como "calibración". Esta se realizó por un período de 84 horas durante los días 21/06/2022 desde las 00 horas hasta el 24/06/2022 a las 11 horas. Luego, se compararon los valores horarios medios de los sensores del Ayuntamiento y los de la UVa, identificando que había diferencias horarias entre ambos sensores. Estas diferencias se justifican porque los sensores del Ayuntamiento utilizan la Hora Solar en lugar de la Hora Oficial, por lo que los valores de los sensores UVa también se corrigieron a la Hora Solar (-2,5 horas).

Tras la mencionada corrección, para homogeneizar los valores obtenidos por ambos sensores, los datos de los sensores UVa se ajustaron a los valores observados en los sensores del Ayuntamiento mediante un Factor de Escalamiento. El Factor de Escalamiento se define como la relación entre el valor medio horario observado por los sensores UVa y el valor medio horario observado por los sensores del Ayuntamiento en cada uno de los lugares de calibración. A partir de esto, se determina un Factor de Escalamiento para cada uno de los cinco sitios de calibración y un único valor denominado Factor de Escalamiento general, que es el promedio de los cinco Factores de Escalamiento individuales, F=1,04, valor que fue utilizado para afectar a cada registro obtenido de los Huertos Urbanos y de *Campo Grande*. De este modo, se lograron corregir los registros de acuerdo a los horarios, y se lograron reducir las diferencias existentes entre los dos tipos de sensores.

2.2. Los modelos ANNs diseñados para estimar las temperaturas urbanas por hora.

La arquitectura ANN 6-x-1 para los modelos evaluados se muestra en la **Figura 2** (i.e., seis entradas [temperatura ambiente horaria (Puntos Céntricos Sin Vegetación: "*Puente Poniente*", "*Plaza San Miguel*", "*Catedral*", "*Don Sancho*", y "*Dos de Mayo")* y Hora del día (0, 1,…, 23)] y una salida [temperatura ambiente horaria (Huerto Urbano/Parque Urbano Forestado)]).

La implementación de las ANNs se realizó en MATLAB con la función '*feedforwardnet*', dimensionada con los vectores de datos de entrada y salida, que determinan el tamaño de las respectivas capas, generando un perceptron multilayer feed-forward (MLP) con una sola capa oculta, donde la función de activación seleccionada entre neuronas en la capa oculta es la tangente sigmoidea hiperbólica (tansig), mientras que la función de transferencia seleccionada para las neuronas de la capa de salida es lineal (purelin). El algoritmo back-propagation Levenberg–Marquardt (BP-LM) se aplicó para lograr una optimización rápida (trainlm) [25].

El entrenamiento de las ANNs se realizó con la función 'train', con matrices de vectores de datos de entrada y salida, durante 28 días (21/06/2022 al 18/07/2022). Finalmente, se utilizó la función 'sim', probando las ANNs previamente entrenadas con (2, 3, 4, 5, 6, 7, y 8) neuronas en la capa oculta, para hacer la estimación en cada Huerto Urbano/ Parque Urbano Forestado estudiado por separado, durante 13 días (19/07/2022 al 31/07/2022) en Valladolid, utilizados como referencia para la validación.

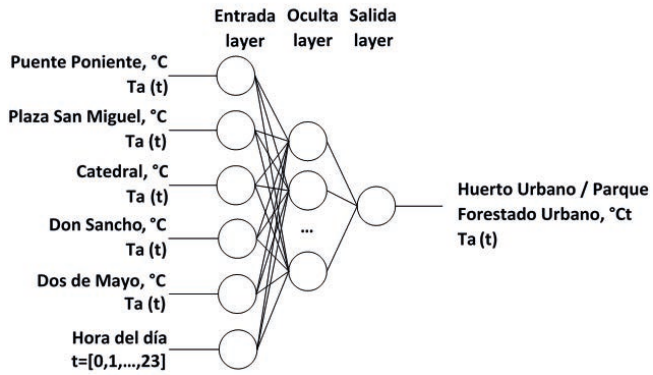


Figura 2. Arquitectura ANN 6-x-1 que obtiene los mejores resultados.

2.3. Las estadísticas utilizadas para analizar la precisión de los resultados obtenidos por los modelos de interpolación basados en ANNs.

La precisión de los resultados de los modelos ANN en la etapa de validación se realizó mediante el análisis de diversos los valores estadísticos demostrados y comprobados [25]: Root Mean Square Error (RMSE, temperatura °C); Coeficiente de Determinación (R^2); Coeficiente de Durbin-Watson (DW); Error Porcentual Medio (MPE); y Precisión del Pronóstico (FA).

3. Resultados y discusión

Se han desarrollado diferentes modelos de ANNs para la estimación horaria de la temperatura ambiente (promedio) para los Huertos Urbanos y para *Campo Grande* de Valladolid.

Las ANN desarrolladas han ido cambiando en sus Entradas, Neuronas Ocultas y Salidas, buscando la arquitectura ANN que simule con mayor precisión. En consecuencia, la arquitectura con los mejores resultados ha sido la ANN 6-x-1 **(Tablas 1-5).**

Tabla 1. Temperaturas medias (°C) horas en espacios urbanos de Valladolid según "ANNs 6 x Jardín Botánico". Arquitectura que dispone de 6 entradas (5 sensores del Ayuntamiento de Valladolid + hora), cambiando el número de neuronas de 2 a 8 en la capa oculta (ANN 6-2-1, ANN 6-3-1, ANN 6-4-1, ANN 6-5-1, ANN 6-6-1, ANN 6- 7-1, ANN 6-8-1) y ajuste de estadísticas.

ANNs 6 x Jardín Botánico: temperatura media horaria							
	ANN* 6-2-1	**ANN* 6-3-1**	**ANN* 6-4-1**	**ANN* 6-5-1**	**ANN* 6-6-1**	**ANN* 6-7-1**	**ANN* 6-8-1**
RMSE (°C)	0,72	0,61	0,60	0,65	0,64	0,60	0,61
R^2	0,988	0,991	0,992	0,990	0,991	0,992	0,992
DW	1,098	1,236	1,298	1,148	1,121	1,309	1,176
MPE	-0,005	-0,005	-0,004	-0,005	-0,009	-0,005	-0,005
FA	0,980	0,984	0,984	0,984	0,982	0,983	0,984

Tabla 2. Temperaturas medias (°C) horas en espacios urbanos de Valladolid según "ANNs 6 x Valle de Arán". Arquitectura que dispone de 6 entradas (5 sensores del Ayuntamiento de Valladolid + hora), cambiando el número de neuronas de 2 a 8 en la capa oculta (ANN 6-2-1, ANN 6-3-1, ANN 6-4-1, ANN 6-5-1, ANN 6-6-1, ANN 6- 7-1, ANN 6-8-1) y ajuste de estadísticas.

ANNs 6 x Valle de Arán: temperatura media horaria							
	ANN* 6-2-1	**ANN* 6-3-1**	**ANN* 6-4-1**	**ANN* 6-5-1**	**ANN* 6-6-1**	**ANN* 6-7-1**	**ANN* 6-8-1**
RMSE (°C)	0,53	0,46	0,46	0,50	0,44	0,42	0,46

R^2	0,993	0,995	0,995	0,994	0,995	0,996	0,995
DW	0,846	1,024	0,923	0,799	0,876	0,864	0,960
MPE	-0,001	-0,004	-0,002	-0,002	0,001	-0,001	0,000
FA	0,983	0,986	0,986	0,985	0,986	0,987	0,986

Tabla 3. Temperaturas medias (°C) horas en espacios urbanos de Valladolid según "ANNs 6 x Campo Grande". Arquitectura que dispone de 6 entradas (5 sensores del Ayuntamiento de Valladolid + hora), cambiando el número de neuronas de 2 a 8 en la capa oculta (ANN 6-2-1, ANN 6-3-1, ANN 6-4-1, ANN 6-5-1, ANN 6-6-1, ANN 6- 7-1, ANN 6-8-1) y ajuste de estadísticas.

ANNs 6 x Campo Grande: temperatura media horaria							
	ANN* 6-2-1	**ANN* 6-3-1**	**ANN* 6-4-1**	**ANN* 6-5-1**	**ANN* 6-6-1**	**ANN* 6-7-1**	**ANN* 6-8-1**
RMSE (°C)	1,20	1,20	1,15	1,10	1,14	1,07	0,96
R^2	0,956	0,956	0,960	0,963	0,960	0,965	0,972
DW	0,369	0,317	0,242	0,306	0,268	0,319	0,615
MPE	0,021	0,016	0,016	0,014	0,015	0,013	0,010
FA	0,961	0,965	0,968	0,969	0,969	0,967	0,972

Tabla 4. Temperaturas medias (°C) horas en espacios urbanos de Valladolid según "ANNs 6 x Los Santos Pilarica". Arquitectura que dispone de 6 entradas (5 sensores del Ayuntamiento de Valladolid + hora), cambiando el número de neuronas de 2 a 8 en la capa oculta (ANN 6-2-1, ANN 6-3-1, ANN 6-4-1, ANN 6-5-1, ANN 6-6-1, ANN 6- 7-1, ANN 6-8-1) y ajuste de estadísticas.

ANNs 6 x Los Santos Pilarica: temperatura media horaria							
	ANN* 6-2-1	**ANN* 6-3-1**	**ANN* 6-4-1**	**ANN* 6-5-1**	**ANN* 6-6-1**	**ANN* 6-7-1**	**ANN* 6-8-1**
RMSE (°C)	0,77	0,73	0,72	0,60	0,61	0,62	0,60
R^2	0,986	0,988	0,988	0,992	0,991	0,991	0,992
DW	0,773	0,768	0,877	0,591	0,859	0,837	0,653
MPE	0,005	0,002	0,002	0,001	0,002	0,001	0,000
FA	0,975	0,977	0,978	0,981	0,980	0,981	0,981

Tabla 5. Temperaturas medias (°C) horas en espacios urbanos de Valladolid según "ANNs 6 x Parque Alameda". Arquitectura que dispone de 6 entradas (5 sensores del Ayuntamiento de Valladolid + hora), cambiando el número de neuronas de 2 a 8 en la capa oculta (ANN 6-2-1, ANN 6-3-1, ANN 6-4-1, ANN 6-5-1, ANN 6-6-1, ANN 6- 7-1, ANN 6-8-1) y ajuste de estadísticas.

ANNs 6 x Parque Alameda: temperatura media horaria							
	ANN* 6-2-1	**ANN* 6-3-1**	**ANN* 6-4-1**	**ANN* 6-5-1**	**ANN* 6-6-1**	**ANN* 6-7-1**	**ANN* 6-8-1**
RMSE (°C)	0,69	0,61	0,63	0,64	0,63	0,63	0,61
R^2	0,989	0,991	0,991	0,990	0,991	0,990	0,991
DW	1,008	1,034	1,159	1,277	1,021	1,139	1,120
MPE	0,002	-0,003	0,002	-0,001	-0,002	-0,004	-0,002
FA	0,981	0,984	0,983	0,984	0,982	0,984	0,984

Aclaración Tablas 1-5: El (*) indica la Arquitectura del modelo en base al número de neuronas en cada capa (Entradas-Neuronas Ocultas-Salida). El subrayado identifica el mejor resultado estadístico encontrado.

Comparando la Arquitectura ANN 6-x-1 con otras Arquitecturas desarrolladas, se ha visualizado que eliminando la entrada "Día" han mejorado los rendimientos en todos los casos respecto al conjunto de test donde la entrada de los ANNs incluía la variable "Día" (por ejemplo,

ANN 7-x-1). La variable "Día" inicialmente fue pensada e incluida en las ANNs para situar a la ANN en la época del año. A partir de lo descrito, la variable "Día" ha empeorado los resultados para este test en particular, desarrollado en un período corto de tiempo. Dichas conclusiones se contraponen con los resultados mostrados en Diez et al., 2022 [25] para la predicción diaria, durante un año (periodo más largo de tiempo), donde se obtienen mejoras en los resultados de las ANNs añadiendo justamente la variable de entrada "Día". Entonces, se pone en discusión que utilizar la variable "Día" para la predicción en una serie larga de datos, donde la variable estacional predomina, sí es positivo en los resultados de las ANNs y no así en una serie de pocos días donde la variable estacional no influye.

4. Conclusiones

Bajo la norma práctica de "*hacer las redes sencillas, para obtener mejores resultados*", se ha identificado que la Arquitectura ANNS 6-x-1 es la que mejor aplica.

Las Arquitecturas ANNS 6-x-1, basándonos en los valores de RMSE, permiten identificar que para el Huerto Urbano "*Jardín Botánico*" se obtiene el mejor resultado de RMSE=0,60 °C con 4 y 7 neuronas ocultas (ANN 6-4-1 y ANN 6-7-1), para el Huerto Urbano "*Valle de Arán*" se obtiene RMSE=0,42 °C con 7 neuronas ocultas (ANN 6-7-1), para el Huerto Urbano "*Los Santos Pilarica*" se obtiene RMSE=0,60 °C con 5 y 8 neuronas ocultas (ANN 6-5-1 y ANN 6-8-1) y para el Huerto Urbano "*Parque Alameda*" se obtiene el mejor resultado de RMSE=0,61 °C con 3 y 8 neuronas ocultas (ANN 6-3-1 y ANN 6-8-1). Por su parte, para el Parque Urbano Forestado "*Campo Grande*" se obtiene el mejor resultado de RMSE=0,96 °C con 8 neuronas ocultas (ANN 6-8-1). Comparando los mejores resultados para cada uno de los lugares de aplicación, se llega a la conclusión que para el Huerto Urbano "*Valle de Arán*" se obtiene el mejor valor de todos ellos a partir del RMSE= 0,42 °C.

En todos los modelos desarrollados, al igual que la Arquitectura ANN 6-x-1, en las predicciones para *Campo Grande* se obtienen los peores rendimientos atribuidos principalmente al tipo o cantidad de vegetación que allí se encuentra (permanentemente forestado).

La aplicación de las ANNs resulta útil para la planificación urbana y para los estudios urbanos. Sus resultados permiten mejorar la comprensión del clima urbano, predecir futuras temperaturas urbanas, identificar estrategias de mitigación de temperatura como son los Parques y Huertos Urbanos e incluso para planificar y gestionar los cultivos urbanos. Además, las ANNs demuestran que se puede obtener información ambiental sumamente útil sin la necesidad de establecer sensores urbanos (muchas veces costosos y bajo riesgos) por largos períodos de tiempo.

Referencias

19. Camps-Calvet, M., Langemeyer, J., Calvet-Mir, L., & Gómez-Baggethun, E. Ecosystem services provided by urban gardens in Barcelona, Spain: Insights for policy and planning. *Environmental Science and Policy*. 2016, *62*, 14–23. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.007
20. Naciones Unidas. *Nueva Agenda Urbana*. 2017.
21. Colding, J., Barthel, S., Ljung, R., Eriksson, F., & Sjöberg, S. Urban Commons and Collective Action to Address Climate Change. *Social Inclusion*. 2022, *10*(1), 103–114. https://doi.org/10.17645/si.v10i1.4862
22. Dennis, M., & James, P. Ecosystem services of collectively managed urban gardens: Exploring factors affecting synergies and trade-offs at the site level. *Ecosystem Services*. 2017, 26, 17–26. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.009
23. Oke, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1982, *108*(455), 1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502
24. Rost, A. T., Liste, V., Seidel, C., Matscheroth, L., Otto, M., Meier, F., & Fenner, D. How cool are allotment gardens? A case study of nocturnal air temperature differences in Berlin, Germany. *Atmosphere*. 2020, *11*(5), 500-. https://doi.org/10.3390/ATMOS11050500

25. Coronel, S.A., Feldman, R. S., Jozami, E., Facundo, K., D. Piacentini, R., Dubbeling, M., & J. Escobedo, F. Effects of urban green areas on air temperature in a medium-sized Argentinian city. *AIMS Environmental Science.* 2015,*2*(3), 803–826. https://doi.org/10.3934/environsci.2015.3.803
26. Fernández, F., Montávez, J. P., Jesús, González-Rouco, F., & Valero, F. Relación Entre La Estructura Espacial De La Isla Térmica Y La Morfología Urbana De Madrid. *El Clima, Entre El Mar y La Montaña.* 2004, 641–650.
27. Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning.* 2015, *134*, 127–138. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018
28. Huang, L., Li, J., Zhao, D., & Zhu, J. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*. 2008, *43*(1), 7–17. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.025
29. Tsilini, V., Papantoniou, S., Kolokotsa, D. D., & Maria, E. A. Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island. *Sustainable Cities and Society.* 2015, *14*(1), 323–333. https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.08.006
30. Mancebo, F. Gardening the city: Addressing sustainability and adapting to global warming through urban agriculture. *Environments*. 2018, *5*(3), 1–11. https://doi.org/10.3390/environments5030038
31. AghaKouchak, A., Cheng, L., Mazdiyasni, O., & Farahmand, A. Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophysical Research Letters.* 2014, *41*(24), 8847–8852. https://doi.org/10.1002/2014GL062308
32. Mann, M. E., & Gleick, P. H. Climate change and California drought in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2015, *112*(13), 3858–3859. https://doi.org/10.1073/pnas.1503667112
33. Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. Impact of regional climate change on human health. *Nature.* 2005, *438*(7066), 310–317. https://doi.org/10.1038/nature04188
34. Lin, B. B., & Egerer, M. H. Global social and environmental change drives the management and delivery of ecosystem services from urban gardens: A case study from Central Coast, California. *Global Environmental Change.* 2020, *60*. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.102006
35. Lin, B. B., Egerer, M. H., Liere, H., Jha, S., Bichier, P., & Philpott, S. M. Local- and landscape-scale land cover affects microclimate and water use in urban gardens. *Science of the Total Environment* 2018, *610–611*, 570–575. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.091
36. Small, G., Jimenez, I., Salzl, M., & Shrestha, P. Urban heat island mitigation due to enhanced evapotranspiration in an urban garden in Saint Paul, Minnesota, USA. *WIT Transactions on Ecology and the Environment.* 2020, *243*, 39–45. https://doi.org/10.2495/UA200041
37. Reginster, I., & Rounsevell, M. Scenarios of future urban land use in Europe. *Environment* and Planning B: Planning and Design. 2006,33(4), 619–636. https://doi.org/10.1068/b31079
38. Schäffler, A., & Swilling, M. Valuing green infrastructure in an urban environment under pressure - The Johannesburg case. *Ecological Economics*. 2013, *86*, 246–257. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.05.008
39. Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 2010, *97*(3), 147–155. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006
40. Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure LK. *Built Environment. TA - TT.* 2007, *33*(1), 115–132.
41. Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landscape and Urban Planning.* 2009. *92*(3–4), 179–186. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005
42. Zhang, Z. Multivariate Time Series Analysis in Climate and Environmental Research. In *Multivariate Time Series Analysis in Climate and Environmental Research*. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67340-0

43. Diez, F. J., Boukharta, O. F., Navas-Gracia, L.M., Chico-Santamarta, L., Martínez-Rodríguez, A., Correa-Guimaraes, A. Daily Estimation of Global Solar Irradiation and Temperatures Station Concept in Castilla and León, Spain. *MDPI Sensors.* 2022, 22, 7772. https://doi.org/10.3390/s22207772
44. Diez, F. J., Correa-Guimaraes, A., Chico-Santamarta, L., Martínez-Rodríguez, A., Murcia-Velasco, D. A., Andara, R., & Navas-Gracia, L. M. Prediction of Daily Ambient Temperature and Its Hourly Estimation Using Artificial Neural Networks in an Agrometeorological Station in Castile and León, Spain. *Sensors*. 2022, *22*(13). https://doi.org/10.3390/s22134850
45. Franco, B. M., Hernández-Callejo, L., & Navas-Gracia, L. M. Virtual weather stations for meteorological data estimations. *Neural Computing and Applications* 2020, *32*(16), 12801–12812. https://doi.org/10.1007/s00521-020-04727-8
46. GEOCyL Consultoría Valladolid, Centro Tecnológico y CARTIF. Estrategia de Adaptación al Cambio Climático. Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Portugal POCTEP 2014-2020 (2020).
47. Estadìstica, I. N. de. (2022). *Población por sexo, municipios y edad (grupos quinquenales)*. https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=33950.



Public perception of and involvement in Urban Agriculture and Food Security

O.F. Boukharta[1]*, L.C. Santamarta[2], L.M. Navas Gracia[1]

[1] TADRUS Research Group, Department of Agricultural and Forestry Engineering, University of Valladolid, Spain; ouiamfatiha.boukharta@uva.es , luismanuel.navas@uva.es

[2] International Department, Harper Adams University, Newport TF10 8NB, UK, lchico-santamarta@harper-adams.ac.uk

Abstract:

Nowadays, we live in an epoch of concern for healthy, sustainable, local nutrition, mental health, and well-being of individuals, where we are increasingly aware of the benefits of being connected to nature, especially with the growing population. This article examines an important aspect of implementing urban agriculture, assessing public attitudes towards this particular concept, and linking it to ensuring better food security. The methodology used in this paper consists of the development and distribution of a survey to determine people's attitudes towards urban agriculture. The survey was distributed online, and its creation was carried out via the Google form, resulting in a total number of 250 respondents from all over the world. The results of the survey reveal that most respondents are aware of the concept of urban agriculture as well as food security, even if it remains at a theoretical level. However, when it comes to practical implementation, there is a notable lack of active engagement. Those interviewed, for instance, are clearly willing to participate in urban agriculture initiatives. In general, the responses are positive about the knowledge of the subject, but it needs to be further developed to be more accessible and understood by all.

Keywords: Sustainability, local food, healthy lifestyle, survey, implementation of population.

1. Introduction

Ensuring a secure and accessible food supply for a global population of approximately 9.7 billion people by 2050 is one of the most urgent and complex challenges facing the world, and urban agriculture is the way to address food insecurity in cities [1]. Indeed, in recent years, urban agriculture has become increasingly popular due to concerns about climate change and maintaining food security in urban areas [2]. Actually, it provides access to food and refers to food production in urban spaces where groups of residents do not have access to fresh food.

In 2007, the FAO defined Urban agriculture as "the growing of crops and raising of animals for food and other uses in and around cities and towns, and related activities such as production and delivery of inputs, processing and marketing of products." [3]. Thus, from this definition, we can understand that urban Agriculture is the cultivation, processing, and distribution of food products by growing plants in and around cities to feed local populations [4]. It is also characterized by the systematic and amplified occupation of unused land within the urban layout, with the implementation of individual, community or collective gardens and orchards [5].

Many experts underline the importance of social factors in achieving sustainable food security, although the development of a more holistic approach to sustainability including social factors is still underdeveloped [6]. From this perspective, it's important to highlight the complementarity between ensuring a sustainable food security and food policy. Indeed, food policy is "Any decision made by a government agency, business or organization that affects the way food is produced, processed, distributed, purchased and protected." [7]. Thus, the mission of food policy: "Goes from the way food is produced and grown, to the way it is processed, distributed and consumed" [8].

From this issue, the following questions are highlighted, which would be addressed in this article:

What are the attitudes of the population towards urban agriculture? and what conclusions can be drawn to better integrate this concept and its implementation within our society?

Regarding the insights of sustainability, the human factor plays and has a decisive role, at least one of the main ones. Indeed, some authors argue that sustainability (respectively, urban agriculture as an integral part) should include a social discourse that reveals the fundamental issues, considering the interests and attitudes of interest groups [9]. Researchers note that the success of urban agriculture is also rooted in its positive perception by the public: both those living in the proximity and the urban society as a whole [10].

The issues of social attitudes towards urban agriculture are considered by researchers in different countries [11, 12, 13]. Thus, this issue represents an important research question, where we have prepared and distributed a survey of different population groups was conducted as the main subject of implementation.

This paper addresses an important aspect of the implementation of Urban Agriculture, which is to assess the public's attitude towards this particular concept, while including in our research the level of knowledge, involvement and interest in Urban Agriculture, through the implementation and distribution of a survey with the same intention.

2. Materials and Methods

The methodology used in this research article consist on preparing and spreading a survey to determine the attitudes of the population toward urban agriculture, which was conducted during the month of May, in 2022. The survey has been distributed in an online way, i.e. through our networks, by email, through other colleagues etc. and its creation has been done through Google-form platform, for its effectiveness, simplicity and feasibility.

The following section will present in a very clear way how this survey has been carried out and describes its objectives and some of its contents, with the aim of making it easier to understand and get into the subject:

2.1. Demographic Profile

The first part concerned the demographic situation of the respondents, who were asked about their gender, age, country of residence, marital status, education level, whether they live in an urban or rural area, etc.

Indeed, this series of questions will help us to better identify the population being evaluated, through all those criteria that will allow us to base our answers around this target population.

2.2. knowledge and familiarity with key concepts

In this section, different questions were asked, such as defining the meaning of "urban agriculture" and "food security" according to their own understanding, through a series of proposed answers, while asking our respondents if they are and/or have been involved in some urban agriculture and or food security projects.

By asking the responders questions about their knowledge on such themes, we can better frame the population being evaluated, better understand how they assimilate this knowledge and therefore better draw the appropriate conclusions.

2.3. Attitude towards key concepts

The fourth and last part consisted in identifying the attitude of the population towards urban agriculture and food security, by answering different questions related to the opinion of our respondents and their communities/society towards both concepts of urban agriculture and food security and the benefits of each of them related to health, lifestyle and sustainability, as well as their level of interest in this topic and the way they are informed about it. Other questions were also asked that will allow us to better analyse the results and draw useful conclusions.

Answering these questions would give us a clearer idea of the current situation of the insertion of the food sector in cities through the involvement of urban agriculture and therefore, in case of negative answers and a lack of interest from stakeholders, what should be done to correct this.

3. Results

The dissemination of the survey has been carried out using a random sampling method to guarantee that the sampling is representative. Within our extensive network of workplaces, the questionnaire was disseminated using various channels such as email, colleagues and social networks. Using this multi-faceted distribution approach, we were able to reach a wide range of potential respondents from different professional backgrounds and geographical locations. As a result, we were able to collect a substantial sample of 250 participants from many different geographic regions. This diversity of respondents contributes to the robustness and generalisability of our results, as it encompasses the perspectives of individuals from different cultural, social and economic backgrounds.

The following sections provide a comprehensive and detailed overview of the outcomes of the survey. In the interest of clarity and better understanding, each result is presented in graphical form. The purpose of using visual representations, such as tables, graphs and diagrams, is to present the results in a visual appealing and accessible way. It is important to note that this visual approach not only conveys information more effectively, but also helps readers to quickly identify significant characteristics, models and relationships throughout the data.

3.1. Characteristic of the respondents

The demographic profile of respondents is illustrated in Figure 1. We can clearly notice that the number of female respondents exceeds the number of male respondents by a large margin, with 68% of responses from the female gender. 72% of our respondents are single and belong to the age category between 18 and 35 years (72% of our target population), as well as the majority not having children. As for the place of residence, the majority of our respondents live in cities and only 18% live in villages. It is also worth noting that the demographic profile of the respondent resembles a young woman with a college education - a city resident.

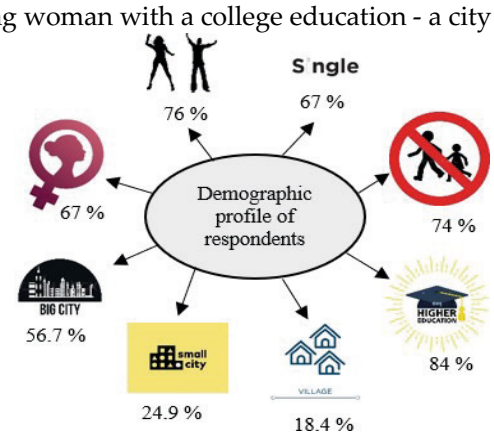


Figure 1. Demographic characteristics of respondents

It should be noted that the questionnaire was conducted on a global basis, bringing in participants from various geographical regions. For instance, 76.4% of the responses were from the European countries, indicating significant representation by Spain and Ukraine (26.74% and 52.95% out of 76.4%). In addition, 20.3% of respondents were from the Dominican Republic, which highlights their significant presence in the sample, and which points to the broad geographical distribution of our survey (Figure 2).

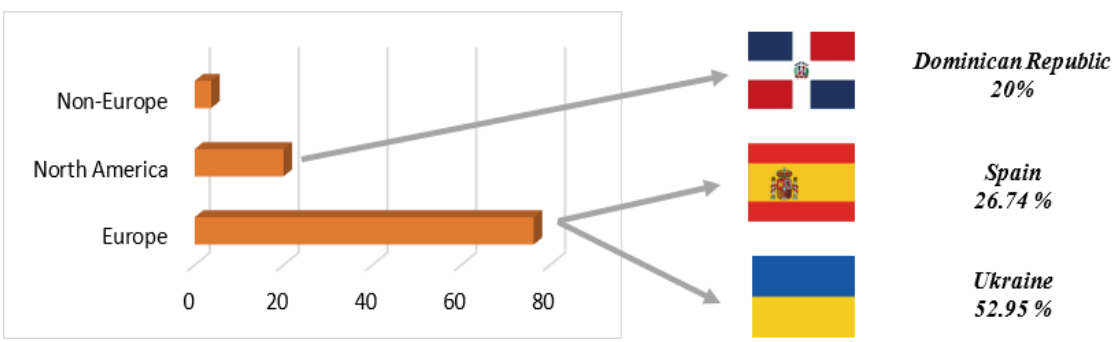


Figure 2. Residency of respondents

These results reveal the global nature of our study and provide valuable information about the perspectives and experiences of individuals from different parts of the world.

2.1. Knowledge about Urban Agriculture and Food Security

In this section, most of the respondents have heard of the two concepts but have not fully understood it. However, there are still a significant number of respondents who have not heard of the subject at all. The following sections show whether people understand exactly what the two concepts of urban agriculture and food security mean:

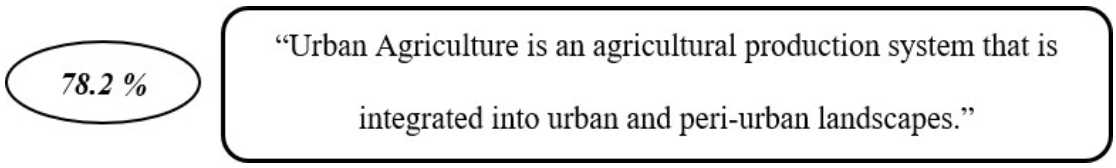


Figure 3. People knowledge about Urban Agriculture definition.

We can see that, according to the results obtained, almost 80% of the answers regarding the definition of Urban Agriculture are correct, which means that our surveyed population has a clear idea of the meaning of this concept (Figure 3).

The graph presented in Figure 4 illustrates an important trend: about 88% of respondents say it is important to integrate urban agriculture in cities to promote health and sustainability of the food system. However, when it comes to assessing support for these initiatives, the data highlights an interesting observation. A significant proportion of participants indicate that they are 'likely' to support these initiatives, although they do not express absolute certainty (Figure 5). This remarkable aspect draws attention to the need for further investigation and action to address the underlying concerns or uncertainties of respondents.

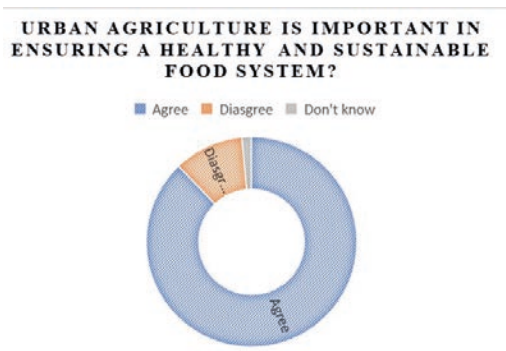


Figure 4. Urban Agriculture and ensuring a healthy food system.

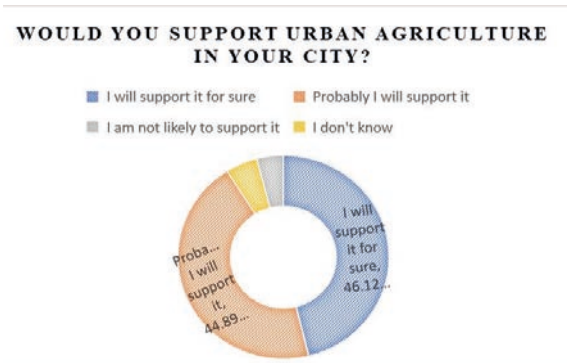


Figure 5. Supporting or not Urban Agricultural practices

By acknowledging this differentiation, we can better understand the attitudes and multiple perspectives surrounding the involvement of urban agriculture in urban environments, which allows for informed decision making and policy development in this area.

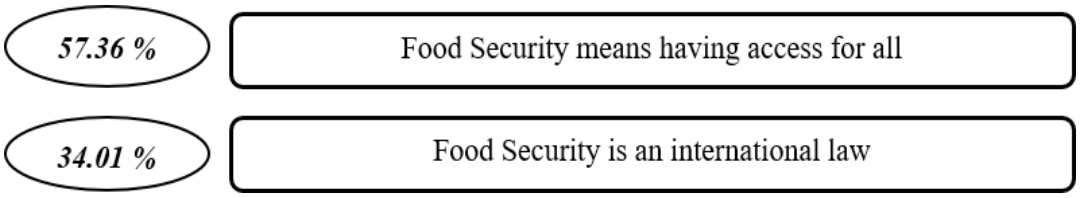


Figure 6. People knowledge about Food Security's definition

Regarding the meaning of food security, only half of the surveyed population knows the correct answer, while 34% of the answers are wrong and think that food security is an international law, which is not the case (Figure 6). More information on the resolution of these issues will be addressed and discussed in the discussion section.

3.2.Involvement of the respondents

This part will allow us to better understand whether people think that the two concepts of Urban Agriculture and Food Security are related, as well as whether they are interested in the involvement of UA in their city, and whether they have already been involved in UA projects. This would allow us to better interpret our results and draw conclusions that are relevant to our research topic.

We can see in the graphs below (Figure 5), that most of the responses agree and would support the implementation of initiatives in their cities, but most of them have never been involved in an urban agriculture initiative (Figure 7), think that this should be taken into consideration by organizing more activities, workshops and other inclusive work.



Figure 7: Results from the survey about urban Agriculture and its relation to the Food Security concept

Regarding the link between the two concepts, we find that 70% of the responses agree and believe that urban agriculture and food security are linked (Figure 7) and that this link will ensure a healthy and sustainable food system (Figure 4).

4. Discussion

From the in-depth analysis of the results presented above, there is clear evidence that there is an urgent need for action to create a healthy and sustainable urban environment that meets the needs of current and future populations. Here are the common points that underline the crucial measures that should be implemented urgently.

According to the answers obtained from the questionnaire that we have implemented; we can conclude the following:

The results of the survey reveal an interesting pattern: the majority of respondents are familiar with the concept of urban agriculture, although this remains at a theoretical level.

However, when it comes to practical implementation, there is a notable lack of active engagement. It is interesting to note that despite this gap, the respondents are clearly willing to participate in urban agriculture initiatives.

This observation highlights a challenging aspect of our current landscape: urban agriculture has inevitably become part of our daily lives, with widespread public awareness. Nevertheless,

the limited awareness or possibly limited dissemination of information about urban agriculture is evident:

For example, most of the responses obtained on the knowledge of urban agriculture claim to have heard of it, know the definition, but have never been directly involved in such projects. This is probably due to the fact that the term is relatively new in their environment and barely used in everyday life in a not very common way. Furthermore, most of the respondents associate urban agriculture with sustainability and bioproducts, which is real, but less with personal well-being and health issues, which is essential, since urban agriculture is seen more as a public good for society than as an individual good [14].

Regarding food security, we can see that it is a term that is not really well understood by our population, contrary to Urban Agriculture where almost all the answers have defined it well. According to this questionnaire, only half of the respondents understand exactly the definition of food security, while the other half have wrong answers, something that attracts our attention in this research, since it is a term that should be very common in our daily life today, given its importance and usefulness in our daily life.

In terms of information sources, the main source of public information on urban agriculture is social media, which is characteristic of today's generations. This means that this should be widely developed to be able to target a larger population and thus increase the number of people who are aware of the subject and all contribute to a well sustainable future for the whole population, since, according to the questionnaire, it was well noted that the main obstacles to the implementation of urban agriculture initiatives are the lack of public knowledge about the mechanisms of implementation of these initiatives.

5. Conclusion

Urban agriculture has become a key research area because of its relevance to current challenges and future considerations. The changing living conditions, including drought, climate change and increasing urbanisation, require a closer look at the role of urban agriculture. Indeed, several studies highlight the importance of urban agriculture in reducing the effects of climate change and enhancing food security in urban areas. In this regard, the incorporation of agricultural practices in urban spaces has been recognised as a strategic approach to promoting sustainable urban development.

In the current context, increasing awareness of the importance of urban agriculture and ensuring food security is of fundamental importance. To achieve this effectively, the following points must be given due consideration:

- Education and awareness: It is necessary to implement educational programmes and awareness campaigns that highlight the importance of urban agriculture and its role in achieving food security. Examples include educational initiatives in schools, community workshops and public awareness events to disseminate information and promote understanding among the population.
- Encourage the establishment of local shops: The creation of shops run by local producers can make a significant contribution to the development of urban agriculture and enhance food security. To achieve this, it is important to ensure financial support as well as to provide training and technical assistance, as well as stimulating new calls for projects, to encourage and support local producers to establish independent local shops.
- Ensure urban planning of cities by experts: Expert urban planning is crucial for the successful integration of urban agriculture and the creation of sustainable urban environments. To achieve this efficiently, urban planning needs to draw on the expertise of urban planners, architects, designers and other skilled professionals who have

knowledge and experience in incorporating agriculture into urban spaces, since collaboration between these professionals and the stakeholders is essential for developing inclusive and sustainable urban plans.

- Nowadays, we live in a world concerned with the mental health and well-being of individuals, including the growing population in modern urban areas. There is a growing awareness that the connection with nature, which can be reduced in urban areas, contributes significantly to our mental health and well-being, hence the interest in reconnecting individuals with nature, to keep this connection that can only bring good to humans. This article allowed us to know what people's perception of urban agriculture is, its effects and its contribution to the population, which also allowed us to know if people know the link between it and food security. In general, the responses were positive, showing that our respondents are aware of these two concepts, are familiar with them in their daily lives, and tend to know more about them. This led us to better integrate the subject, and to carry out more in-depth surveys with some national and international initiatives, which will be explained in the article " Establishing a Sustainable and Healthy Local Food System through the Establishment of Urban Spaces within two cities in Spain".

Acknowledgements:

The present work is related to FUSILLI Project, which is based on food and natural resources. This project is funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No.101000717. FUSILLI mainly focuses on supporting cities to facilitate their transition to more sustainable food systems, in accordance with FOOD2030 priorities. https://fusilli-project.eu

References

48. FAO – Food and Agricultural Organisation; Sustainable Healthy Diets—Guiding Principles: Geneva, Switzerland, 2019.
49. Chappell, M. J., & LaValle, L. A. Food security and biodiversity: can we have both? An agroecological analysis. Agriculture and human values. 2011. 28(1), 3-26
50. FAO "Food Security," Policy Brief, Food Security, 2007, pp. 1–4.
51. Poggi, S., Vinatier, F., Hannachi, M., Sanz, E. S., Rudi, G., Zamberletti, P., ... & Papaïx, J. (2021). How can models foster the transition towards future agricultural landscapes?. In Advances in Ecological Research (Vol. 64, pp. 305-368). Academic Press.
52. CALDAS, E. de L.; JAYO, M. Agriculturas urbanas em São Paulo: histórico e taxonomia. Confins, Paris, v.29, 2019.
53. Stefani, M. C., Orsini, F., Magrefi, F., Sanyé-Mengual, E., Pennisi, G., Michelon, N., ... & Gianquinto, G. (2018). Toward the creation of urban foodscapes: case studies of successful urban agriculture projects for income generation, food security, and social cohesion. Urban Horticulture: Sustainability for the Future, 91- 106.
54. Scherb A, Palmer A, Frattaroli S, Pollack K. Exploring food system policy: A survey of food policy councils in the United States. Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development. 2012 Aug 24;2(4):3-14.
55. Coff, C., & Kemp, P. (2014). Food ethics and policies. Encyclopedia of Food and Agricultural Ethics, 1- 8. doi:10.1007/978-94-007-6167-4_149-1.
56. Karami, E., & Keshavarz, M. (2010). Sociology of sustainable agriculture. Sociology, organic farming, climate change and soil science, 19-40.
57. Grebitus, C., Chenarides, L., Muenich, R., & Mahalov, A. (2020). Consumers' perception of urban farming—An exploratory study. Frontiers in Sustainable Food Systems, 4, 79.
58. Haller, T., Crole-Rees, A., & Dumondel, M. (2013). Attitudes towards growing food in cities: the case of Lausanne, Switzerland. Journal of Socio-Economics in Agriculture, 6(1), 201-223.

59. Chimbwanda, F. (2016). Perceptions and attitudes of participants toward urban gardening. A case study of nutrition gardens in Mucheke town, Masvingo.
60. Nadal, A., Cerón-Palma, I., García-Gómez, C., Pérez-Sánchez, M., Rodríguez-Labajos, B., Cuerva, E., ... & Rieradevall, J. (2018). Social perception of urban agriculture in Latin-America. A case study in Mexican social housing. Land use policy, 76, 719-734.
61. Gundersen C. Food insecurity is an ongoing national concern. Adv Nutr 2013 Jan 01;4(1):36-41 [FREE Full text] [doi: 10.3945/an.112.003244]



Analysis of forest mass growth based on data obtained from LiDAR flights.

E. Tarancón Andrés[1], E. Martínez Cámara[2], D. Arancón Pérez[3], JC. Gómez Chomón[4], T. Santamaría Palacios[5], J. Santamaría Peña[6].

[1] University of La Rioja; efren.tarancon@unirioja.es
[2] University of La Rioja; eduardo.martinezc@unirioja.es
[3] University of La Rioja; david.arancon@unirioja.es.
[4] University of La Rioja; jose-carlos.gomezc@unirioja.es.
[5] University of La Rioja; tsantamaria@larioja.org
[6] University of La Rioja; jacinto.santamaria@unirioja.es.

Abstract: This paper presents a methodology for calculating the forest mass growth of a specific geographical area in La Rioja. The proposed methodology and the resulting calculations yield reasonable values, which can be utilized and applied in future works. To achieve our objective and validate it, we have used real point cloud data obtained from PNOA space flights through LiDAR technology, from two different zones in La Rioja on different dates (2010 and 2016). The Cloud Compare software was used in the methodology, which allowed us to compare the point clouds from different dates of the same zone and obtain the volume difference, achieving the proposed objective and providing satisfactory values and results. The results obtained can be appreciated not only by the generic volume figures of the study area but also by the mapped points that show which areas maintain the same elevation and which have changed in height and by how much. We can indicate that based on our work model, lines of research remain open, such as calculating the CO_2 absorption carried out by the forest mass during the growth period, the loss of mass due to a fire, areas where possible reforestation can take place, analysing the growth of different forest or plant species, and their sustainability in the face of the challenges of climate change that have been intensifying in recent years.

Palabras clave: Lidar, Cloud point, Aerial Orthophotography, forest growth.

1. Introduction

In this document, we present the calculation methodology used to assess the forest growth that has occurred in a specific area of La Rioja. The methodology consists of comparing point clouds of the same area, but taken at different times (2010 and 2016).

We also establish the validity of this methodology by comparing it with another area in the Autonomous Community where there has been no change in forest mass due to the almost non-existent presence of forests, and any variation in it is negligible over the years.

For our study, we relied on existing data from space flights carried out under the National Plan for Aerial Orthophotography (PNOA) and generated using LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) technology, which is available in the databases of the Government of La Rioja (IDErioja) [1] Spatial Data Infrastructure of the Government of La Rioja.

The software used in the calculations was "Cloud compare" [2], which allows us to calculate the difference in volume between two point clouds or Digital Terrain Models, indicating the average deviation of the points, as well as generating a new point cloud that shows the evolution and development in heights of the area under study [3–5].

After loading the relevant data into the software and performing the necesary calculations, we present the results obtained and an analysis of them, which has allowed us to draw the conclusions detailed in this work.

2. Materials and methods

The study area, which is almost entirely covered by Scots pines the predominant species, and from which we aim to obtain its growth [6], has been named Scenario 1 (in the municipality of Villoslada de Cameros).

On the other hand, the area with which we want to verify that our methodology and calculations work has been named Scenario 2, and corresponds to a low-cultivation area without forest species (in the municipality of Aldeanueva de Ebro).

After selecting both areas, the data files associated with the two scenarios were downloaded from the IDErioja website, which are shown in Figure 1.



Figure 1. Raster Cartography and selected grids of Scenarios 1 and 2.

In this case, the database generated by PNOA flights offers us point clouds of various dates. These data are divided into grids or surface areas of 2 km on each side, which means 4 km2 of surface area to study.

For our study, we selected the flights from 2010 and 2016, as they offer us point cloud files obtained using LIDAR technique with Orthometric Height (some data from the base are offered with Ellipsoidal Heights), which makes the comparison of the clouds easier.

The point cloud files obtained from the base are in "laz" format, which is compatible with the selected calculation software and contains numerous points within the selected grids.

Table 1 establishes the main data of the selected scenarios.

Table 1. Starting data for the compared scenarios.

Data	Scenario 1 (Villoslada de Cameros)	Scenario 2 (Aldeanueva de Ebro)
Initial flight date	03-08-2010	03-08-2010
Initial flight date	26-07-2016	26-07-2016
Study Area	524-4656 block	592-4672 block
ETRS89 UTM30 Coordinates	592749.53, 4671056.00	592949.16, 4671208.71
2010 Point Cloud	20350849 points	3340059 points
2016 Point Cloud	22754450 points	11179503 points

After downloading the four working files, two for each scenario and flight, they are imported into the calculation program. When importing them, the software offers us the possibility to georeference or move them. In the case at hand, as the displacement of the clouds is done uniformly, we chose to move them so that the calculation algorithms are simplified.

In the following Figures 2 and 3, we can see as an example the point clouds imported from the 2010 and 2016 flights in the desired area for forest mass calculation.

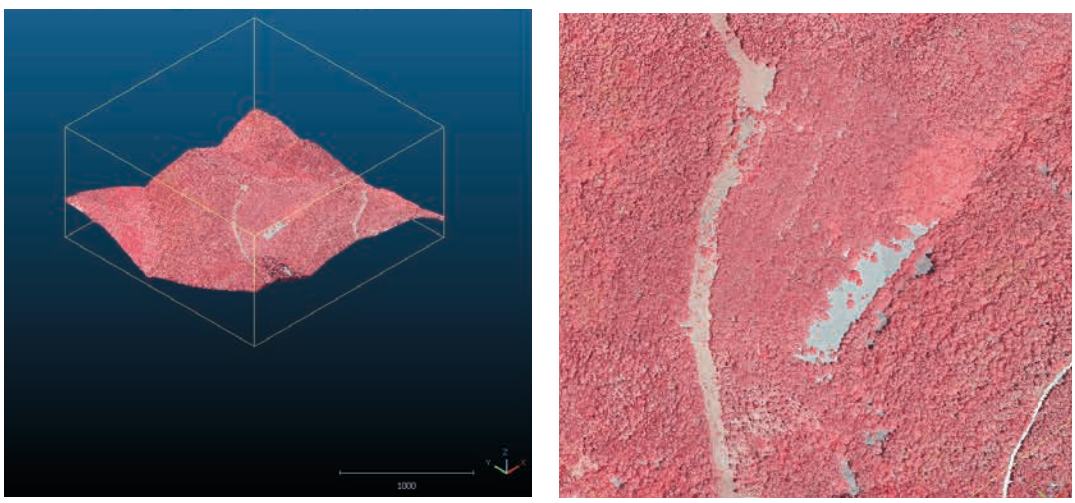


Figure 2. Detail of the point cloud from the 2016 flight of scenario 1.

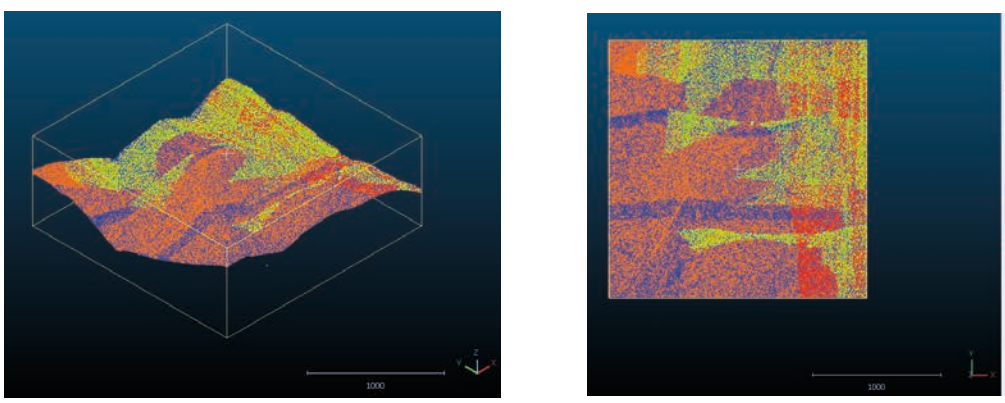


Figure 3. Detail of the point cloud from the 2010 flight of scenario 1.

Once the point clouds are positioned, the software provides us with the volume in cubic meters between them and gives the option to export and create a new point cloud that expresses the values in Z coordinate (meters of height) for both.

After performing the calculations in both scenarios, the main results and analysis are described below.

3. Results and discussion

Figure 4 shows the volumes calculated between the point clouds from 2010 and 2016 for both scenarios.

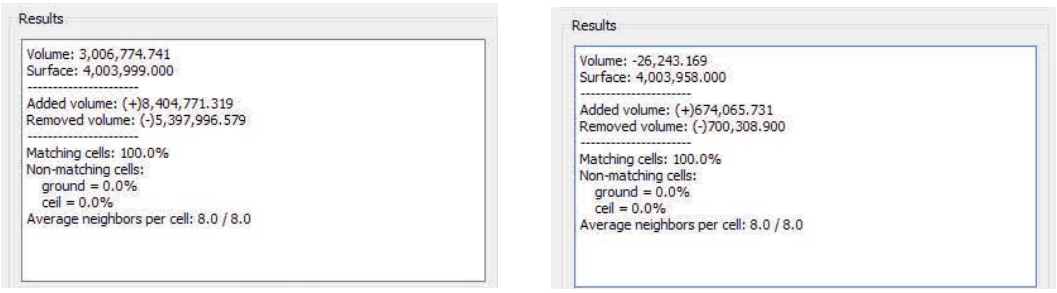


Figure 4. Results of the volume calculation between the point clouds of both scenarios.

In both scenarios, it is confirmed that the study surface is defined in the 4 km² models (4003999 m² and 4003958 m²), so both studies have the same surface area. On the other hand, a significant difference is observed in the calculated volume, being 3006774.741 m³ in the desired area of forest growth analysis, compared to -26243.169 m³ in scenario 2, which indicates that in scenario 2, where there was no forest mass, the growth has been much lower on average and even negative, a circumstance that may be motivated by possible soil erosion or herbaceous crop harvesting.

Expressed as a percentage, scenario 2 is not even -0.87% of the volume of scenario 1.

In Figure 5, the Gaussian distributions of the calculated values are shown. We can see the mean and deviation of the points for both scenarios.

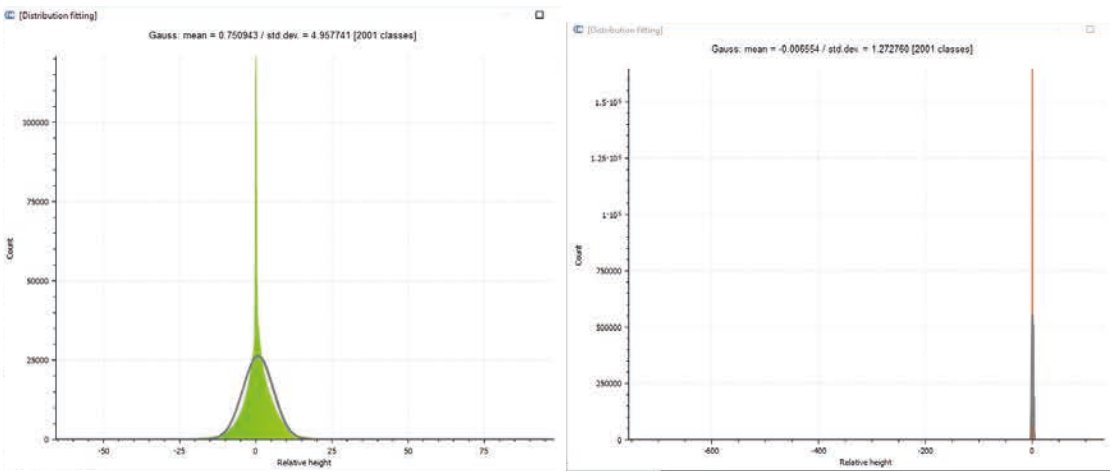


Figure 5. Means and deviations of the points for both scenarios.

In scenario 2, the mean deviation of points is -0.006554 meters, compared to 0.750943 meters for scenario 1, which suggests that there has been no change in the average volume in scenario 2 compared to scenario 1, which implies an average growth of approximately 75 centimeters per

m^2 , a result that is consistent with the growth of Scots pine, the forest species chosen for this study.

In Figures 6 and 7, the orthophotos of the study areas and the resulting point cloud obtained by subtracting the data from 2010 and 2016 for both scenarios are presented, as well as the scale and point distribution.

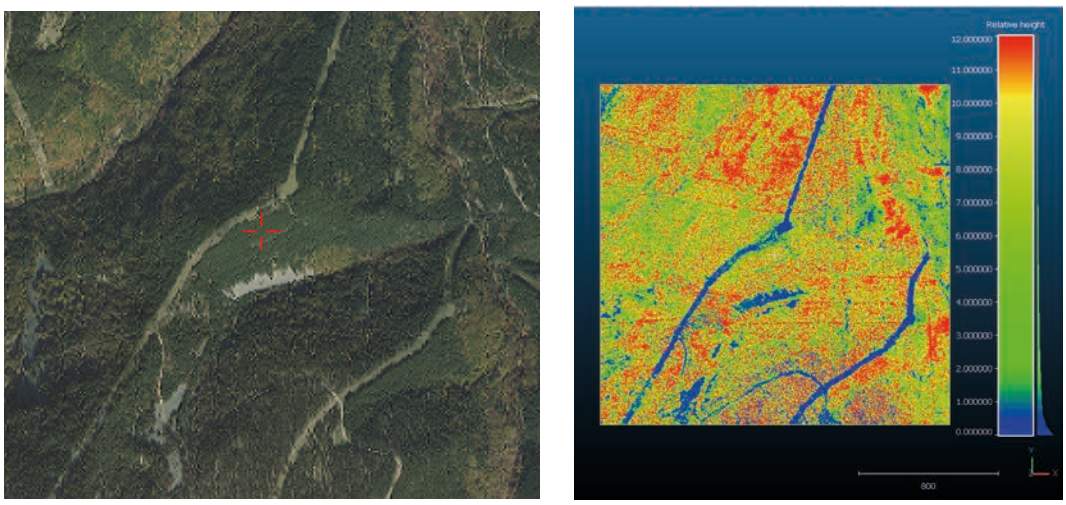


Figure 6. Orthophoto and Point Map resulting from the calculation of scenario 1.

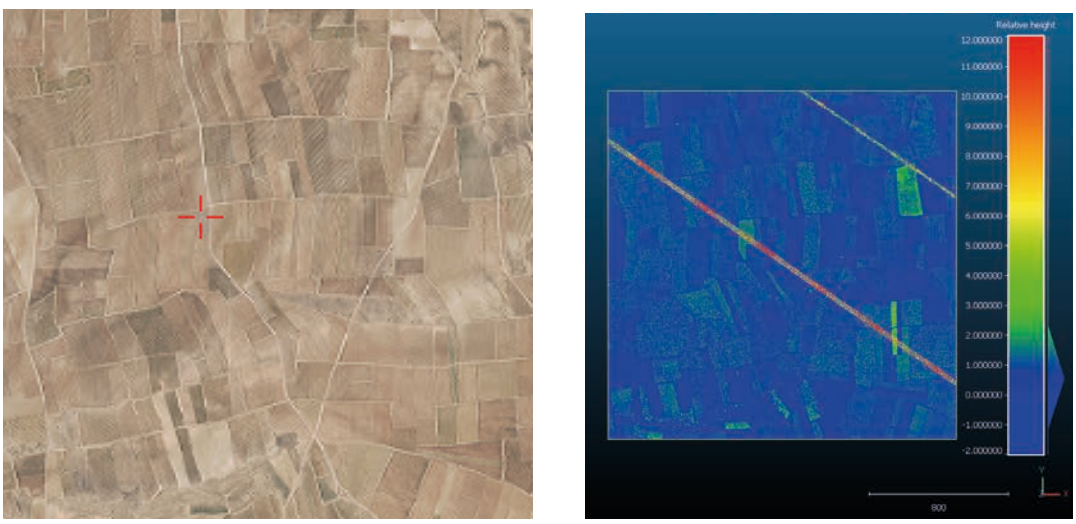


Figure 7. Orthophoto and Point Map resulting from the calculation of scenario 2.

In scenario 1, it can be observed that in areas without vegetation, the difference in heights is practically zero (blue color), and one can see roads, ravines, and rocky areas. The green and yellow colors indicate areas with height differences from one to ten meters, while the red color indicates areas with the highest difference in heights between both flights.

It is worth noting that the chosen species, Scots pine, can reach heights of 30-40 meters and a circumference of 5 meters, growing about 6 meters in height in ten years. Its crown is conical in the first years and becomes irregular and wide later on, which justifies the presence of points with heights of 12 meters (red areas) due to growth in width. However, if we look at the percentage distribution of points (see the graphical scale), the majority are distributed between 0 to 5 meters,

reaching up to 7 meters, which is consistent with the growth of the forest species chosen, which occupies almost the entire selected area.

On the other hand, in scenario 2, it is noted that there are practically no significant changes in height, with almost the entire chromatic map generated around the blue color representing the zero height mark. There are some plots that reach green tones, which may be due to cultivation activities conducted on them, and two alignments stand out where the heights go above 5 meters and up to 12 meters, which are caused by the two power lines that cross the area.

4. Conclusions

The methodology applied and the results obtained lead us to conclude that the LIDAR files obtained from PNOA flights allow us to calculate the volume of forest mass in a given area over a period of time. Likewise, the software used provides us with a point map that allows us to observe areas with greater forest mass growth and those where vegetation growth has been low or nonexistent. Therefore, we can say that this methodology opens up several research avenues to be developed, such as:

- Calculations of forest mass lost after a fire and which are the most affected points, which would allow future reforestation management of the areas, or see the loss of forest mass after logging.
- Comparison of forest mass growth between different species and see which ones give a greater volume of forest mass, analyzing their yields.
- Analyze the growth of agricultural plantations, evaluating their performance and sustainability in the face of the climate change being experienced in recent years.
- Conduct studies on CO2 absorption based on the volume of forest or agricultural mass between areas and between plant species.

5. Acknowledgments

We want to highlight and thank the Government of La Rioja for updating the databases and providing facilities for file downloads from the IDErioja platform, which allows us to carry out work like this with real data and not simulations.

References

1. IDERioja Infraestructura de Datos Espaciales Gobierno de La Rioja Available online: https://www.iderioja.larioja.org (accessed on 22 March 2023).

2. Danielgm Cloud Compare Available online: https://www.danielgm.net/cc/release/ (accessed on 22 March 2023).

3. Guerra-Hernández, J.; Pascual, A. Using GEDI Lidar Data and Airborne Laser Scanning to Assess Height Growth Dynamics in Fast-Growing Species: A Showcase in Spain. *For Ecosyst* **2021**, *8*, doi:10.1186/S40663-021-00291-2.

4. Rodríguez-Puerta, F.; Gómez-García, E.; Martín-García, S.; Pérez-Rodríguez, F.; Prada, E. UAV-Based LiDAR Scanning for Individual Tree Detection and Height Measurement in Young Forest Permanent Trials. *Remote Sens (Basel)* **2022**, *14*, doi:10.3390/RS14010170.

5. Asenova, M.; Donchev, G.; Evangelov, E. PERSONAL LASER SCANNING TECHNOLOGY FOR 3D MAPPING AND FOREST INVENTORY. *22nd SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings 2022, Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing* **2022**, *22*, 347–354, doi:10.5593/SGEM2022/2.1/S10.41.

6. Saremi, H.; Kumar, L.; Turner, R.; Stone, C. Airborne LiDAR Derived Canopy Height Model Reveals a Significant Difference in Radiata Pine (Pinus Radiata D. Don) Heights Based on Slope and Aspect of Sites. *Trees* **2014**, *28*, 733–744.



Establishing a Sustainable and Healthy Local Food System through the Establishment of Urban Spaces within two cities in Spain

O.F. Boukharta[1], L.C. Santamarta[2], L.M. Navas Gracia[1]

[1] TADRUS Research Group, Department of Agricultural and Forestry Engineering, University of Valladolid, Spain; ouiamfatiha.boukharta@uva.es , luismanuel.navas@uva.es

[2] International Department, Harper Adams University, Newport TF10 8NB, UK, lchico-santamarta@harper-adams.ac.uk

Abstract:

Addressing the food sector in cities has become a topical issue of major importance, particularly in view of continuing population growth. Indeed, this research paper aims to provide empirical findings on the link between Urban Agriculture and Food Security in two Spanish cities. The two initiatives evaluated are "Estrategia Alimentaria de Valladolid" and «Alimenta Conciencia» in Segovia. This work was carried out through interviews with the project managers, which enabled us to find out how the different projects assess local production and its interaction within the cities. Based on the interviews conducted, it emerged that the two initiatives had a number of points in common, such as the desire to ensure that people are properly educated and aware of the value of integrating the food sector into cities, as well as on the proper organization of activities and workshops in, and above all, the encouragement of small organizations and start-ups linked to local production and consumption, as they form the basis of any future project.

Keywords: Urban Agriculture, Food Security, Interviews, Spain

1. Introduction

The United Nations Human Settlements Program [1] has estimated that 60% of the population will reside in urban areas by 2030. This will result in increased pressure on urban resources, particularly in cities in low- and middle-income countries, putting pressure on urban Food Security [2]. In addition, rapid urbanization and industrial agricultural production of food has led to a growing disconnection between urban residents and their food sources [3].

Although Urban Agriculture is increasingly seen by policy makers and urban researchers as a very promising pillar of Food Security, it is also increasingly seen as an essential component of Food Security, and researchers as a very promising pillar of informal food supply systems [4,5], the evidence of its impact on urban Food Security is still very anecdotal and contested. Thornton argued that it has become necessary to discuss the efficiencies of Urban Agriculture to improve the livelihoods of poor urban households [6].

We are in an era of concern for people's mental health and well-being. Indeed, in 2017, and according to the World Health Organization, depression is now the leading cause of ill health and

disability worldwide, with over 300 million people affected [7]. There is a growing realization that connection with nature, which can be reduced in urban environments, is an important contributor to our mental health and well-being [8, 9].

Over the past two decades, Urban Agriculture, which involves growing plants and raising livestock in cities, has attracted increasing interest. Recognized for its potential socio-cultural, public health, environmental and economic development benefits [10], and through initiatives such as the Milan Urban Food Pact, which promotes local food production as a way to address Urban Agriculture, Urban Agriculture has gained increasing interest. Indeed, initiatives such as the Milan Urban Food Policy Pact promote local food production as a way to address the problemof access to fresh food in cities [11].

Urban Agriculture has emerged simultaneously in many cities around the world, colonizingvarious interstices of the urban scene and adopting different forms and social patterns [4,12]. Indeed, several types of Urban Agriculture can be defined in the European context, such as community gardens, allotments, home gardening in one's own garden or on one's balcony, etc.

Considering the current situation, this study aims to provide empirical findings on the link between Urban Agriculture and Food Security through two Urban Agriculture studies carried out in Spain, in the cities of Valladolid and Segovia. The objective of this paper is therefore to determine the significance of Urban Agriculture in addressing household food insecurity.

2. Methodology

This study adopted the conceptual framework of Gamhewage et al., and illustrated in Figure 1 [13]. However, the decision to participate in Urban Agriculture is affected by three categories of factors. These include socio-economic factors, perception of Urban Agriculture and constraints that hinder efforts to participate (Figure 1). Socio-economic factors influence the availability of resources such as human resources, time, investment, access to land (space for Urban Agriculture) and practical knowledge of Urban Agriculture. Socio-economic factors are influenced by demographic characteristics, livelihood characteristics and capacity characteristics [14].

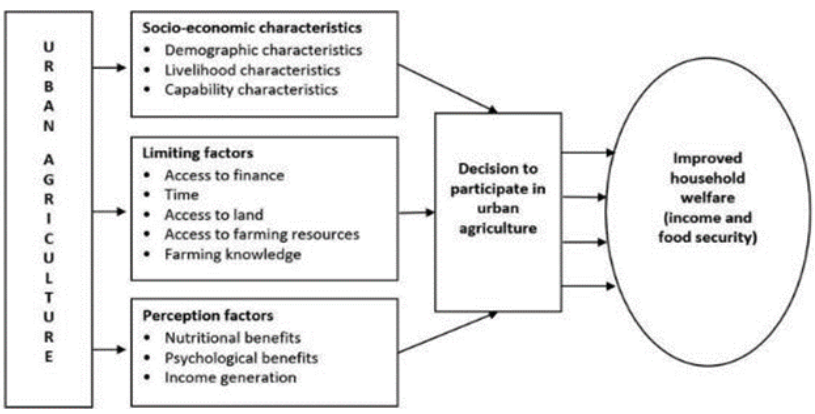


Figure 1. Conceptual framework for participation in Urban Agricultural practices (Source: Gamhewage et al. 2015).

Qualitative methodology was chosen to investigate the subjective experiences of the program participants because it allows for exploratory enquiry, clarification of ambiguities, discovery of unanticipated findings and information- rich material to enable a deep understanding of the phenomenon under investigation [15].

2.1. Interviews

This paper draws from semi-structured interviews, participant observation, and discourse analysis of public documents during the month of May 2022. Indeed, in-depth interviews were conducted at with project managers of three initiatives to better understand changes that may have occurred in gardeners' lives during their implementation within those initiatives as well as their experiences and techniques in a collective learning process, by talking, sending messages through social networks or merely observing. However, to make the analysis clearer and concrete, we conducted and analysed field observations.

2.2. Content of the interviews

Several questions were posed to examine perceptions of how gardens influenced social capital and Food Security. Furthermore, our interviewees were asked about what they considered to be the key successes and challenges related to the community garden projects they are involved in. Indeed, we selected 3 initiatives of including urban agricultural practices in their planning, representative of the different typologies identified in the preliminary inventory, to develop in-depth interviews and field visits. Third, we conducted and analysed interviews and field.

We asked gardeners to identify benefits provided at individual. Examples of questions may include: What are the objectives of your initiative, if you could describe them in your own words? What kind of activities/tasks are you organizing or doing at the moment? What is the main lesson you personally have learned so far from your work on Food Security and urban inclusion in this project? As well as other questions related to the neighbourhood, the contribution to the city itself and on the identified benefits of the project.

Interviews conducted were recorded in Spanish, and later professionally transcribed into English for analysis using a transcription service and verification from an expert. Moreover, the interviews were conducted in two modalities: in person and online through the Teams software.

3. Results

By carrying out interviews with the project managers of the two initiatives, "Alimenta Conciencia de Segovia" and "Estrategia Alimentaria de Valladolid", we were able to obtain a considerable amount of information about the two projects and about the current situation in Spain, as well as gathering, through their own statements, information about the activities carried out, the objectives they would like to achieve and the obstacles they are encountering.

The following sections illustrate the previous points in further detail, enabling us to gain a better understanding of each of the two initiatives and to draw appropriate and relevant conclusions.

3.1. «Alimenta Conciencia» In Segovia

3.1.1. Presentation and objectives

Segovia is an active city in terms of health and equity, education, and participation. To achieve a sustainable and healthy food system, Segovia's sustainable food strategy has the objectives of coordinating between the different administrations and promoting better administrative coordination.

The main objectives of this initiative are to better know what is produced and consumed and how they affect the local economy and depopulation, as well as promoting a more sustainable, local, healthy, and seasonal diet.

The interview was conducted with Ana Teresa López Pastor, coordinator of the «Alimenta Conciencia» project. With the aim of combating food insecurity and promoting awareness, this innovative initiative was launched in 2019. However, due to the far-reaching effects of the Covid-19 pandemic, the expected timeframe for completion of the project has been postponed from 2022 to the end of 2023. This delay was imposed due to major unexpected challenges posed by the pandemic, such as limited access to resources, restricted supply chains and the necessity to adjust project activities to ensure the safety of the participants.

According to the interviews done with Ana Teresa, her motivations about this project are the following: “I am aware of the importance of food in this area”, which means to ensure a sustainable development; and: “I have a conception of the university academy as an information transfer”, which means to contribute as much as possible to a better world for all.

These challenging objectives are being achieved through a carefully designed framework, consisting of four key steps:

Collaboration and Cooperation:

With all social actors involved in the project. Recognizing that the success of such an initiative depends on collective efforts, Ana Teresa stresses that meaningful engagement and partnerships are essential to the global impact of the project.

Moreover, in their opinion, without strong cooperation and collaboration, the project's objectives would be ineffective and the potential impact would be diminished. By building a network of interconnected social actors, projects can leverage collective knowledge, pool resources, and create synergies beyond individual efforts.

Increase organic production: Ana Teresa López Pastor envisions the future of the «Alimenta Conciencia» project, oriented towards organic farming. Organic farming offers many benefits, including environmental sustainability, improved soil regeneration and the production of healthier food for consumers.

Consumption: Ana Teresa explained an important aspect of the Alimenta Conscencia project: local consumption, while encouraging citizens to give priority to products grown in the city or nearby, known as "Segovia Eco Kilo 0". Emphasize the purpose of increasing. In fact, there are many benefits to encouraging citizens to consume local products. First, it supports the local economy by directly contributing to the livelihoods of local farmers and producers, sustaining rural communities, and creating jobs.

Communication and education: fundamental aspects of the «Alimenta Conciencia» project. Indeed, the project aims to raise awareness and encourage people to adopt sustainable practices, ensuring a more sustainable and healthier future for current and future generations. Indeed, various educational and educational activities such as school workshops and programs about building sustainable local food systems are realized.

3.1.2. Current steps and activities in line with the project

The city of Segovia is deeply involved in a series of actions and activities that are aligned with the objectives of the «Alimenta Conciencia» project. These initiatives aim to promote a sustainable and healthy food system in and around the city (Table 1).

Table 1. Actions and activities developed by «Alimenta Conciencia» – Segovia City

	Actions and activities
1	3 local stores in Segovia
2	Working on sustainable gastronomic tourism
3	Working with restaurants
4	Organizing several awareness raising activities
5	Explore the distribution opportunities to develop food products
6	Working with students on Food Security and sustainable development projects

Table 1 clearly shows that the «Alimenta Conciencia» project aims to implement measures and activities to ensure a more sustainable and healthier food system. This was achieved by establishing three local shops in Segovia, which encouraged farmers in the province to sell their local produce in these shops and encouraged consumers to go to other markets. Indeed, we are striving to According to Ana Teresa, it is necessary to carry out many educational activities to students to clarify the importance of local healthy food.

3.1.2. Main challenges and problems faced

The main challenge «Alimenta Conciencia» wants to ensure is mainly to share more knowledge and a more positive attitude towards these food systems. Another very important aspect is to change the way of consumption, switching to the consumption of local and neighborhood products (Segovia Eco Km0) instead of buying products in non-local stores outside the city.

Regarding the problems encountered during the project, Ana Teresa emphasized the lack of economic resources, which is above all a problem in driving action, but at the same time the lack of participants, people usually stressed that although they wanted to participate, they did not necessarily participate actively.

Finally, Ana Teresa highlighted another aspect related to the war in Ukraine. In fact, she acknowledged, this has caused a global food crisis and led to higher product prices. Today, however, it is necessary to create a healthy and comfortable environment in order to provide people with local products.

3.2. «Estrategia Alimentaria de Valladolid»

3.2.1. Presentation and objectives

The city of Valladolid has developed a process of reflection on the local agri-food system. This process of research and reflection has led to a participatory process for drafting a Food Strategy for the city, which will then be translated into an action plan. At the same time, the strategy has begun its implementation phase, which is currently underway.

This project was launched by the City Council of Valladolid, the Fondation Entretantos and the University of Valladolid.

The principal objective of the project is to promote a space for collective transformation of the food system, work with other sectors for a more prolonged use of processed foods, as well as broadening the sales channels, opening a niche in collective catering and even the possibility of developing new allergen-free products and innovation. This would generate very positive learning, relationships, and synergies for the local food system.

The interview was done with María Sánchez Esteban, the councilor for the environment and the fourth deputy mayor of the City Council of the city of Valladolid.

Indeed, Maria Sanchez Esteban mentioned that the project started on 2016, and highlighted its main objectives, which are:

- "People who work the land are the local producers of Valladolid and the surrounding area of Castilla y León and can develop their activities in a responsible manner. »; and,

- "People can have access to food close to their homes, without travelling "Km 0".

Furthermore, she highlighted that the city of Valladolid and its surroundings have been developing a process of reflection on the local agri-food system over the last few years so as to start launching a participatory process for the development of a food strategy of its own and ensure new strategies such as "Valladolid's Agri-Food Strategy: participatory process".

3.2.2. Activities organized

Table 2 shows the main activities carried out by the «Estrategia Alimentaria de Valladolid» initiative. in the words of our interviewee Maria Sanchez. She points out that one of the main activities organized is the setting up of local markets. This market will connect the community by showcasing the diversity of the city's products, creating a thriving and dynamic local market for vendors and visitors alike. The second activity highlighted by Maria Sanchez is the planification of educational activities, with the aim of emphasizing the importance of good nutrition.

Table 2. Activities organized by «Estrategia Alimentaria de Valladolid».

Main activities	Explication
Local markets	Organization of a local markets once a month that brings together several local producers in the city of Valladolid.
Pedagogical activities	Organize pedagogical activities within educational systems to ensure a well insertion and participation of children within theimportance of eating healthy and locally and to show them how to plant a certain fruit or vegetable
Encourage local consumption	Organize activities and workshops open to the public to explain the importance of eating locally for our health and wellbeing, as well as encourage them to start cultivating their own fruits and vegetable in their gardens and/or balconies etc., if possible.

These activities will enable students to learn more about good nutrition and the positive impact it has on our well-being. To achieve this, several practical exercises are organized, such as practical advice on meat planning from experts, nutritional information and healthy cooking techniques, together with how these can improve our health and our daily lives. The final main activity is to encourage local consumption by supporting local businesses and raising awareness of the benefits of buying local produce. To achieve this, various events are organized, as well as open days and activities, to show local people the positive impact on the environment and its impact on our daily lives (Table 2).

3.2.2. Challenges encountered

According to Table 3, Valladolid City Council plans to set up permanent local markets where farmers can sell their produce to consumers. It will also encourage them to open their own businesses in the city, and to put a stain on a piece of land to make it easier for them to access property and sell their local produce to residents. In addition, the project aims to organise more activities to share knowledge and raise awareness, to highlight the importance of eating locally and to encourage local people to buy from local markets.

Table 3. Main challenges encountered by «Estrategia Alimentaria de Valladolid».

Main challenges	Explication
Implementation of markets	Implement local places for markets that encourage local producers of the city of Valladolid and its surrounding to sell their products.

Share knowledge and awareness	Organize more activities to children to help them to know the importance of eating healthy and locally
Own business	Putting a stain in a land bank so that local producers can take it to their business in Valladolid
Local consumption	That people eat healthy and locally without worrying about the origin of food and if it's healthy or not, and specially, encourage them to buy from the near province, and not going to other cities to by their local products

4. Discussion and conclusion

The involvement of the food sector in cities has become a topical issue of major importance, especially in view of continuing population growth [1]. This research has enabled us to assess the situation in two Spanish cities. The initiatives evaluated were "Estrategia Alimentaria in Valladolid" and «Alimenta Conciencia» in Segovia. In fact, this work enabled us to find out how the various initiatives assess local production and its interaction within the two cities of Valladolid and Segovia.

Based on the interviews carried out, it emerged that the two initiatives had several points in common. Indeed, both projects are willing to ensure that people are properly educated and aware of the value of integrating the food sector into cities, we need to organize more and more activities and workshops along these lines [16]. In addition, small organizations and start- ups need to be supported, as they are the foundation of any future project [17].

Both initiatives also confirmed that there is a lack of local production and sales in the two cities of Segovia and Valladolid because farmers don't have their own premises, so one of the fundamental actions that needs to be taken is to encourage them to open their own premises and sell their products to residents, instead of having to travel to another city [18].

A very important point also mentioned was to ensure good urban planning by experts. This means that several factors need to be taken into account to achieve this, such as knowing the history and origin of the area to be treated, checking and respecting the right space indicators to implement these urban practices, evaluating the productivity and space required for this, checking all environmental aspects such as soil type, water availability etc., before starting the management of the land, as well as assessing the economic contribution of involving such projects, from the point of view of feasibility and job creation for job seekers, together with a recreational and social integration venue.

Finally, a very important point cited by the initiatives surveyed was the economic aspect. Indeed, project funding and financial support are very important when it comes to setting up a project, hence the need for an increasing number of project grants and public calls for project proposals, a feature that is fully endorsed by the initiatives evaluated.

Acknowledgement

The present work is related to FUSILLI Project, which is based on food and natural resources. This project is funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No.101000717. FUSILLI mainly focuses on supporting cities to facilitate their transition to more sustainable food systems, in accordance with FOOD2030 priorities. https://fusilli-project.eu/

References

62. UN-Habitat (United Nations Human Settlements Programme), 2011. Third United Nations conference on housing and sustainable urban development (Habitat III), 44813 (August). https:// unhabitat.org/habitat-iii
63. Smit, W, 2016. Urban governance and urban food systems in Africa: examining the linkages. Cities 58, 80–86. doi:10.1016/j.cities.2016.05.001
64. Clement, M. 2010. Urbanization and the natural environment: An environmental sociological review and synthesis. Organization and Environment, 23(3), 291.
65. Mougeot, L. J. A. (Ed.). (2005). AGROPOLIS. The social, political and environmental dimensions of Urban Agriculture. London: Earthscan.
66. Paganini, N, Lemke, S & Raimundo, I, 2018. The potential of Urban Agriculture towards a more sustainable urban food system in food-insecure neighbourhoods in Cape Town and Maputo. Economia Agro-Alimentare/Food Economy 20(3), 399–421. doi:10.3280/ECAG2018-003008
67. Thornton, AC, 2012. Urban Agriculture in South Africa: a study of the Eastern Cape province. Edwin Mellen Press, New York.
68. World Health Organization. Fact Sheet: Depression; World Health Organization (WHO): Geneva, Switzerland, 2017; p. 4.
69. Capaldi, C.; Passmore, H.; Nisbet, E.; Zelenski, J.; Dopko, R. Flourishing in nature: A review of the benefits of connecting with nature and its application as a wellbeing intervention. Int. J. Wellbeing 2015, 4
70. Uhlmann, K.; Lin, B.; Ross, H. Who Cares? The Importance of Emotional Connections with Nature to Ensure Food Security and Wellbeing in Cities. Sustainability 2018, 10, 1844.
71. Santo, R., Palmer, A., Kim, B., 2016. Vacant Lots to Vibrant Plots: A Review of the Benefits and Limitations of Urban Agriculture. Johns Hopkins Center for a Livable Future., Baltimore, MD.
72. Milan Urban Food Policy Pact. Milan urban food policy pact. (2015).
73. McClintock, N., & Simpson, M. (2014). A survey of Urban Agriculture organizations and businesses in the US and Canada: Preliminary results. http://web.pdx.edu/~ncm3/ files/PSU_UA_Survey.pdf, Accessed date: July 2018.
74. Gamhewage, M. I., Sivashankar, P., Mahaliyanaarachchi, R. P., Wijeratne, A. W., & Hettiarachchi, I. C. (2015). Women participation in Urban Agriculture and its influence on family economy-Sri Lankan experience.
75. Swanepoel, J. W., Van Niekerk, J. A., & Tirivanhu, P. (2021). Analysing the contribution of Urban Agriculture towards urban household Food Security in informal settlement areas. Development Southern Africa, 38(5), 785-798.
76. Liamputtong P, Ezzy D. Qualitative research methods: a health focus. Melbourne: Oxford University Press; 1999.
77. Pollard, G., Roetman, P., Ward, J., Chiera, B., & Mantzioris, E. (2018). Beyond productivity: Considering the health, social value and happiness of home and community food gardens. Urban Science, 2(4), 97.
78. Thiesen, T., Bhat, M. G., Liu, H., & Rovira, R. (2022). An ecosystem service approach to assessing agro-ecosystems in urban landscapes. Land, 11(4), 469.
79. Romagny, B., Aderghal, M., Auclair, L., Ilbert, H., & Lemeilleur, S. (2023). From rural to urban areas: new trends and challenges for the commons in Morocco. The Journal of North African Studies, 28(1), 57-74.

Perfil fitoquímico y actividad antimicrobiana de un extracto amoniacal de carpóforos de *Ganoderma lucidum*

E. Sánchez-Hernández[1], A. Teixeira[2,3], C. Pereira[2,3], A. Cruz[2,3], J. Martín-Gil[1], R. Oliveira[2,3], y P. Martín-Ramos[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia; eva.sanchez.hernandez@uva.es (E.S.-H.); mgil@iaf.uva.es (J.M.-G.); pmr@uva.es (P.M.-R.).
[2] Department of Biology, School of Sciences, University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal; anaspereirateixeira@gmail.com (A.T); catarinavalepereira@gmail.com (C.P.); cruzadriana73@gmail.com (A.C.); ruipso@bio.uminho.pt (R.O).
[3] Centre of Molecular and Environmental Biology (CBMA), University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal

Abstract: Mushroom extracts have potential as a source of new antimicrobial agents. In this study, chemical profiling of an aqueous ammonia extract from the carpophores of *Ganoderma lucidum* (Curtis.) P. Karst., which grows on *Quercus ilex* L. trees. Gas chromatography-mass spectrometry was used for the analysis. The major chemical compounds identified in the extract were oleic acid, 1,2,3,4-butanetetrol, monomethyl azelate, undecane, and palmitic acid. The antimicrobial activity of the *G. lucidum* extract was evaluated against *Phytophthora cinnamomi, Botryosphaeria dothidea, Diplodia corticola*, and *Dothiorella iberica* for its valorization. Minimum inhibitory concentration (MIC) values obtained from *in vitro* tests against *P. cinnamomi* and the Botryosphaeriaceae fungi were found to be 187.5 and 187.5–1000 μg·mL^{-1}, respectively. The results demonstrated that the combination of *G. lucidum* extract with chitosan oligomers (COS) synergistically enhanced the antimicrobial activity. The MIC values of the conjugate complex were 78.12 and 375–500 μg·mL^{-1}, respectively, which are among the best reported to date for natural products against these phytopathogens. Subsequent *ex-situ* testing of the conjugate complex on *Q. ilex* excised stems artificially inoculated with *P. cinnamomi* showed high protection at a dose of 782 μg·mL^{-1}, indicating the potential use of this resource from the same *dehesa* ecosystem for holm oak protection. These findings support the adoption of sustainable and circular economy approaches.

Palabras clave: *Botryosphaeriaceae*; dehesa; encina; *Phytophthora cinnamomi*; reishi.

1. Introducción

Los cuerpos fructíferos, el micelio y las esporas de los hongos medicinales son valiosas fuentes de productos bioactivos [1]. *Ganoderma lucidum* es un hongo oscuro, de gran tamaño, con un exterior brillante y una textura leñosa. Se ha utilizado para mejorar la salud y la longevidad en Japón y China, donde se conoce como "reishi" o "mannentake", y "lingzhi", respectivamente. *Ganoderma lucidum* contiene metabolitos secundarios tales como fenoles, esteroides, terpenoides, nucleótidos, glicoproteínas y polisacáridos [2]. Su composición en polisacáridos contribuye significativamente a las propiedades inmunomoduladoras, antioxidantes, antitumorales y antibacterianas [3]. Por otro lado, su contenido en triterpenos es responsable de su actividad antitumoral, antiinflamatoria, antioxidante, antihepatitis, antimalárica, hipoglucémica, antimicrobiana y antiinflamatoria [4]. Además, su contenido en polifenoles influye en sus propiedades antioxidantes, antimicrobianas y antiinflamatorias [5].

Estudios previos han demostrado la actividad antimicrobiana de extractos de *G. lucidum* en distintos disolventes, tanto frente a patógenos humanos [6] como frente a ciertos fitopatógenos que afectan a cultivos agrícolas [7], pero no frente a fitopatógenos forestales. En cuanto a estos últimos,

el género *Phytophthora* es una amenaza para la seguridad alimentaria mundial y para la salud, la función y la biodiversidad de los ecosistemas [8]. La dehesa se está viendo afectada por la pérdida de arbolado debida a la enfermedad causada por *Phytophthora cinnamomi* Nirenberg & O'Donnell, agravada por el cambio climático [9]. Además de *P. cinnamomi*, los árboles de la dehesa también están amenazados por cancros de origen fúngico, como los causados por hongos ascomicetos del género *Botryosphaeria*, incluyendo *Botryosphaeria dothidea* (Moug. ex Fr.) Ces. De Not., *Diplodia corticola* Phillips, Alves & Luque, y *Dothiorella iberica* Phillips, Luque & Alves. Estos hongos se han asociado con el decaimiento de encinas y alcornoques, aunque *B. dothidea* también se ha encontrado en otras especies del género *Quercus* como *Quercus robur* L. y *Quercus rubra* Michx. L. [10].

Teniendo en cuenta que el uso de fungicidas está desaconsejado en la estrategia forestal de la Unión Europea para 2030 (Gestión Forestal Sostenible en Europa, 2022/2016(INI)) y que el artículo 14 de la Directiva 2009/128/CE promueve el uso de formulaciones basadas en ingredientes naturales como nuevas técnicas de protección, el estudio que aquí se presenta tiene como objetivos: *(i)* estudiar las especies químicas presentes en el extracto acuoso amoniacal de *G. lucidum* mediante cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC–MS); y *(ii)* explorar las oportunidades de valorización de este extracto para el control de los fitopatógenos anteriormente mencionados.

2. Materiales y métodos

2.1. Reactivos y aislados fúngicos

El hidróxido de amonio (solución acuosa al 50% *v/v*) se adquirió a Alfa Aesar (Ward Hill, MA, EE.UU.). El ácido acético (80% en H_2O, grado *purum*) y el agar de dextrosa de patata (PDA) fueron suministrados por Sigma Aldrich Química S.A. (Madrid). El quitosano de alto peso molecular y la enzima Neutrase™ 0,8 L se adquirieron a Hangzhou Simit Chemical Technology Co., Ltd. (Hangzhou, China) y Novozymes A/S (Bagsværd, Dinamarca), respectivamente. El coadyuvante Alkir® se compró a De Sangosse Ibérica (Valencia).

El aislado de *P. cinnamomi* fue suministrado por el Centro de Sanidad Forestal de Calabazanos (Villamuriel de Cerrato, Palencia); el de *D. corticola* (aislado CAA500) fue proporcionado por el Departamento de Biología de la Universidade do Minho (Braga, Portugal); mientras que los de *B. dothidea* (ITACYL_F141) y *D. iberica* (ITACYL_F066) fueron facilitados por el Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITACYL, Valladolid). Todos los aislados de aislados se suministraron como subcultivos en PDA y se refrescaron.

2.2. Recogida de muestras

Los carpóforos de *G. lucidum* que crecían sobre *Q. ilex* se recogieron en octubre de 2021 en la finca El Royal, en El Tejado de Béjar, Salamanca (40°26′42,4″ N 5°33′09,4″ O). Distintos especímenes (n = 20) se mezclaron para obtener muestras representativas, que se secaron a la sombra, se pulverizaron hasta obtener un polvo fino en un molino triturador, se homogeneizaron y se tamizaron (malla de 1 mm).

2.3. Proceso de extracción, de preparación de oligómeros de quitosano y de preparación de complejos conjugados

Se eligió un medio de extracción acuoso con amoníaco debido a la textura leñosa de *G. lucidum* para lograr la disolución de los polifenoles y otros compuestos bioactivos de interés. Investigaciones recientes sobre extractos acuosos de amoniaco de corteza [11-14] o de hojas y flores [15] apoyan esta decisión. Brevemente, 67,3 g de polvo de carpóforo de *G. lucidum* se digirieron primero en una solución acuosa de amoníaco (140 mL de H_2O + 20 mL de NH_3) durante 2 h, luego se sonicaron durante 10 min usando un ultrasonicador tipo sonda (modelo UIP1000hdT; Hielscher Ultrasonics, Teltow, Alemania). La solución se dejó reposar 24 h, se

neutralizó con ácido acético, se centrifugó a 9000 rpm durante 15 min y el sobrenadante se filtró con papel Whatman n.º 1. El rendimiento de la extracción fue del 4,2%. Se liofilizaron alícuotas del extracto para la caracterización por GC–MS, que se realizó en metanol.

Los oligómeros de quitosano se prepararon usando el método descrito en [16], resultando en una solución con oligómeros con un peso molecular < 2 kDa. El complejo conjugado COS–*G. lucidum* se obtuvo combinando las soluciones (ambas a una concentración de 3000 μg·mL^{-1}) en una proporción 1:1 (*v*/*v*), seguida de sonicación durante 15 min.

2.4. Procedimientos de caracterización de G. lucidum

El extracto acuoso amoniacal de los carpóforos de *G. lucidum* se analizó por GC–MS en los Servicios de Apoyo a la Investigación (STI) de la Universidad de Alicante utilizando un cromatógrafo de gases Agilent Technologies modelo 7890A acoplado a un espectrómetro de masas de cuatro polos modelo 5975C. Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: volumen de inyección = 1 μL; temperatura del inyector = 280 °C, en modo *splitless*; temperatura inicial del horno = 60 °C, durante 2 min, seguida de una rampa de 10 °C/min hasta una temperatura final de 300 °C, durante 15 min. La columna cromatográfica utilizada para la separación de los compuestos fue una columna HP-5MS UI de Agilent Technologies con una longitud de 30 m, un diámetro de 0,250 mm y un espesor de película de 0,25 μm. Las condiciones del espectrómetro de masas fueron las siguientes: temperatura de la fuente de impacto de electrones del espectrómetro de masas = 230 °C; temperatura del cuadrupolo = 150 °C; energía de ionización = 70 eV. La identificación de los componentes se basó en la comparación de sus espectros de masas y tiempos de retención con los de los compuestos auténticos y en el cotejo informático con la base de datos del National Institute of Standards and Technology (NIST11).

2.5. Actividad antimicrobiana in vitro

Las actividades antifúngicas y antioomicéticas del extracto de carpóforos de *G. lucidum*, de los oligómeros de quitosano y del complejo conjugado se examinaron mediante el método de dilución en agar, según los procedimientos estandarizados del EUCAST. Se añadieron alícuotas de las soluciones madre al medio de PDA para obtener concentraciones finales de tratamiento en el rango de 15,62 a 1500 μg·mL^{-1}. Se transfirieron tapones de micelio del margen de cultivos de *B. dothidea*, *D. corticola*, *D. iberica* y *P. cinnamomi* a placas con los diferentes tratamientos (3 placas por concentración, con 2 réplicas). El control consistió en sustituir el extracto por el disolvente utilizado para la extracción en el medio de PDA. La inhibición del crecimiento se estimó tras incubación en la oscuridad a 25 °C durante una semana, mediante la fórmula $((d_c - d_t)/d_c) \times 100$, donde d_c es el diámetro medio de la colonia en el control y d_t es el diámetro medio de la colonia tratada. Las concentraciones efectivas (CE_{50} y CE_{90}) se estimaron mediante el análisis PROBIT en SPSS Statistics v.25 (IBM; Armonk, NY, EE.UU.). El grado de sinergia se estimó mediante el método de Wadley.

2.6. Pruebas de protección ex-situ contra P. cinnamomi

Dadas las restricciones que se aplican a los ensayos *in vivo* con *P. cinnamomi*, la eficacia del tratamiento más activo en los ensayos *in vitro* (es decir, el complejo conjugado de COS y extracto de carpóforo, COS–*G. lucidum*) se investigó mediante inoculación artificial de ramas de encina en condiciones controladas de laboratorio. La inoculación se realizó según el procedimiento propuesto por Matheron and Mircetich [17], con las modificaciones descritas en [11,12,15]. Las ramas jóvenes (1,5 cm de diámetro) de plantas sanas de *Q. ilex* se cortaron en secciones de 10 cm de longitud utilizando un cuchillo de injertar esterilizado. Los trozos de rama se envolvieron inmediatamente en papel absorbente estéril humedecido. En el laboratorio, se sumergieron primero en una solución de NaClO al 3% durante 10 min, luego en etanol al 70% durante 10 min,

y después se enjuagaron cuatro veces con agua destilada, para evitar contaminantes superficiales. Algunos de los segmentos de rama (n = 15) se sumergieron durante 1 h en agua destilada como control, mientras que los segmentos restantes se sumergieron durante 1 h en soluciones acuosas del complejo conjugado, a tres concentraciones: concentración mínima inhibitoria (CMI), CMI×5 y CMI×10 (n = 15 segmentos/concentración). Se añadió un coadyuvante (Alkir®, 1% *v/v*) a todas las soluciones, incluido el control, para facilitar la humectación y la penetración del tratamiento en la corteza. Tras la inmersión, se dejaron secar y se retiró cuidadosamente la corteza con un bisturí para dejar al descubierto el cambium. A continuación, la corteza se colocó en una placa de Petri de agar y se inoculó colocando un tapón (⌀ = 5 mm) del margen de un cultivo de *P. cinnamomi* en el centro de la superficie interna de la corteza, seguido de incubación en una cámara húmeda durante 4 días a 24 °C y 95-98% de humedad relativa. La eficacia de los tratamientos se evaluó midiendo la longitud de los cancros que se desarrollaron en los lugares de inoculación. Por último, el oomiceto se volvió a aislar de las lesiones y se identificó morfológicamente para cumplir los postulados de Koch.

2.7. Análisis estadístico

Los resultados de inhibición del crecimiento micelial *in vitro* y de las longitudes de necrosis *ex situ* se sometieron a análisis estadístico mediante análisis de varianza de una vía (ANOVA). Las comparaciones *post-hoc* de las medias se realizaron mediante la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Los requisitos de homogeneidad y homocedasticidad se comprobaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene. El análisis estadístico se realizó con el programa SPSS Statistics v.25.

3. Resultados y discusión

3.1. Elucidación de los fitoconstituyentes del extracto

Los principales componentes del extracto de carpóforo de *G. lucidum* fueron: acetamida (28,3%); ácido 9-octadecenoico y su éster metílico (8%); 1,2,3,4-butanetetrol (4,8%); ácido nonanodioico, éster monometílico (4,8%); ácido n-hexadecanoico (ácido palmítico) y su éster metílico (4,6%); y undecano (4,5%).

La presencia de acetamida puede deberse a la descomposición del acetato amónico formado al neutralizar el exceso de amoniaco del extracto con ácido acético. Los derivados de las acetamidas son agentes antimicrobianos [18]. El ácido oleico, o ácido 9-octadecenoico, ha demostrado actividad antifúngica contra patógenos del suelo que afectan a la familia de las cucurbitáceas, a saber, *Fusarium equiseti* (Corda) Sacc, *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* (E.F. Sm.) Snyder & H.N. Hansen, *Neocosmospora falciformis* (Carrión) Summerb. & Schroers, *Neocosmospora keratoplastica* Geiser, O'Donnell, Short & Zhang, *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid, y *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary [19], corroborando la actividad reportada previamente por Walters et al. [20] contra *Crinipellis perniciosa* (Stahel) Singer y *Pythium ultimum* (Trow) Uzuhashi, Tojo y Kakishima. El 1,2,3,4-butanetetrol es un componente no cariogénico que se encuentra en las setas Shiitake [21], pero no se dispone de información sobre la actividad antimicrobiana, antibacteriana o antifúngica de este compuesto. El éster monometílico del ácido nonanodioico es eficaz en el tratamiento del acné y de diversos trastornos cutáneos [22]. No se dispone de información clara sobre su mecanismo de acción del undecano como agente antimicrobiano, pero un estudio informó de que la undecan-3-ona mostraba una elevada actividad fungistática [23].

3.2. Actividad antimicrobiana in vitro

En la Figura 1 se presentan los resultados de la prueba de susceptibilidad antifúngica/antioomicética. El extracto acuoso amoniacal de carpóforos de *G. lucidum* mostró una mayor actividad que los oligómeros de quitosano, con CMIs en el rango de 187,5 a 1000 y de 750 a

1500 μg·mL⁻¹, respectivamente. *Phytophthora cinnamomi* fue el fitopatógeno más sensible en ambos casos, con valores de CMI de 187,5 y 750 μg·mL⁻¹ para el extracto de *G. lucidum* y COS, respectivamente. La formación de complejos conjugados mejoró la actividad: el conjugado COS–*G. lucidum* produjo una inhibición completa de los patógenos de la familia Botryosphaeriaceae a concentraciones en el rango de 375 a 500 μg·mL⁻¹, mientras que el valor de inhibición para *P. cinnamomi* fue de 78,12 μg·mL⁻¹. Las concentraciones efectivas (CE_{50} y CE_{90}), presentadas en la Tabla 1, permiten observar más claramente esta mejora de la actividad antimicrobiana, que se cuantificó según el método de Wadley. Los valores del factor de sinergia se situaron entre 1,98 y 3,63. Como fueron superiores a 1, puede deducirse un comportamiento sinérgico en todos los casos.

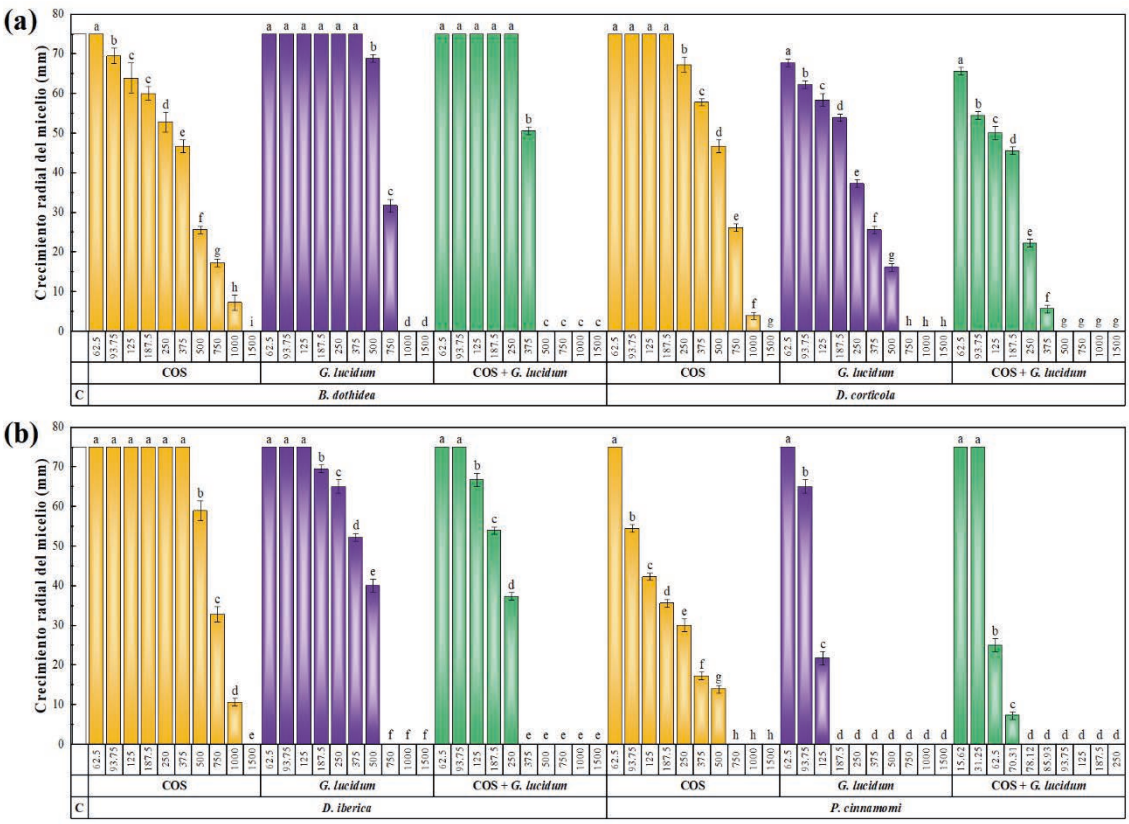


Figura 1. Inhibición del crecimiento micelial para oligómeros de quitosano (COS), extracto acuoso amoniacal de carpóforos de *G. lucidum*, y su complejo conjugado (COS-*G. lucidum*) contra (**a**) *B. dothidea* y *D. corticola*, y **(b**) *D. iberica* y *P. cinnamomi*.

Tabla 1. Concentraciones efectivas (en μg·mL⁻¹) contra *B. dothidea*, *D. corticola*, *D. iberica* y *P. cinnamomi* de los oligómeros de quitosano (COS), el extracto acuoso amoniacal de carpóforos de *G. lucidum* y su complejo conjugado (COS-*G. lucidum*). Los factores de sinergia (FS) se estimaron según el método de Wadley.

Patógeno	Tratamiento							
	COS		*G. lucidum*		COS–*G. lucidum*			
	CE_{50}	CE_{90}	CE_{50}	CE_{90}	CE_{50}	FS	CE_{90}	FS
B. dothidea	428.5	956.9	692.7	938.2	404	1.31	479.2	1.98
D. corticola	592.8	969.5	256	621.6	206.5	1.73	350.7	2.16
D. iberica	697.3	1201.7	476.4	703.8	249.6	2.27	345.6	2.57
P. cinnamomi	166.4	595.3	112.6	169.4	50.2	2.68	72.6	3.63

El uso de diferentes aislados con distintos perfiles de susceptibilidad dificulta la comparación de la actividad del extracto acuoso amoniacal de *G. lucidum* con la de otros extractos de plantas descritos en la bibliografía. En cuanto a *B. dothidea*, la eficacia del extracto puro es comparable a la de un extracto herbal compuesto por siete plantas medicinales chinas [24], mientras que la actividad del complejo conjugado es intermedia entre las de los conjugados COS–*Urtica dioica* L. y COS–*Equisetum arvense* L. [25], ensayados contra el mismo aislado. Respecto a *D. corticola*, el extracto muestra la mayor actividad hasta la fecha, superior a la de extractos de, por ejemplo, *Plantago major* L., *Medicago* sp. L., *Melilotus indicus* (L.) All., y *U. dioica* [26]. En cuanto a *D. iberica*, sólo se dispone de datos de los conjugados COS–*U. dioica* y COS–*E. arvense* [25] (ensayados contra el mismo aislado), que mostraron una actividad menor, con valores de CMI al menos dos veces superiores a los del complejo conjugado COS–*G. lucidum*. En lo que se refiere a la actividad contra *P. cinnamomi* (CMI = 187,5 μg·mL^{-1} para el extracto de *G. lucidum*), sólo es inferior a las referidas para un extracto acuoso amoniacal de corteza de encina (CMI = 78,12 μg·mL^{-1}) [11] y un extracto acuoso de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (CE_{90} = 121.7 μg·mL^{-1}) [27], y comparable a los del extracto de *Flourensia cernua* (CE_{90} = 193,4 μg·mL^{-1}) [27] y el aceite esencial de *Thymus vulgaris* L. (CMI = 200 μg·mL^{-1}) [28].

3.3. Ensayos ex-situ contra P. cinnamomi

Al ser el complejo conjugado COS–*G. lucidum* el producto más activo en las pruebas *in vitro*, se procedió a su ensayo *ex-situ* como tratamiento protector frente a *P. cinnamomi* sobre ramas de encina. Se utilizaron tres concentraciones diferentes, correspondientes a la CMI, la CMI×5 y la CMI×10 (es decir, 78, 391 y 782 μg·mL^{-1}, respectivamente). Los resultados se presentan en la Tabla 2, que recoge una comparación de las longitudes de los cancros. A la dosis más baja no se observó ningún efecto protector, con longitudes de cancro comparables a las del control positivo. A la dosis intermedia, se observaron longitudes de cancro significativamente menores que las del control. Fue preciso aumentar la concentración hasta 10 veces la CMI para lograr una protección eficaz, sin diferencias significativas en comparación con el control negativo. No obstante, a esta concentración aún se observaron pequeños cancros en cuatro de las quince réplicas, lo que sugiere que pueden ser necesarias dosis más altas en condiciones de campo.

Tabla 2. Análisis de las diferencias en las longitudes de necrosis entre los tratamientos con un intervalo de confianza del 95% ($p < 0,0001$).

Tratamiento	LN (Longitud de la necrosis (mm))	Grupos
Control positivo	40.467	A
MIC	37.400	A
MIC×5	13.067	B
MIC×10	1.800	C
Control negativo	0.000	C

La eficacia del complejo conjugado COS–*G. lucidum* como tratamiento protector contra *P. cinnamomi* fue similar a la del extracto acuoso amoniacal no conjugado de corteza *Q. ilex* [11], aunque este último se ensayó en sobre ramas de *Prunus amygdalus* × *P. persica* en lugar de sobre ramas de *Q. ilex*. Por otra parte, la actividad del complejo conjugado COS–*G. lucidum* fue superior a la del extracto amoniacal no conjugado de flores de *Sambucus nigra* L. [15] y a la del complejo conjugado de extracto amoniacal acuoso de corteza de *Quercus suber* L. con COS [12], aunque estos se ensayaron contra *Phytophthora cactorum* (Lebert & Cohn) J.Schröt. y *Phytophthora megasperma* Drechsler, respectivamente, por lo que la comparación debe ser interpretada como una aproximación.

4. Conclusiones

El análisis por GC–MS del extracto acuoso amoniacal de los carpóforos de *G. lucidum* mostró que el ácido oleico y su éster metílico, el 1,2,3,4-butanetetrol, el monometil azelato, el undecano y el ácido palmítico y su éster metílico son sus principales constituyentes, para la mayoría de los cuales se han referido propiedades antimicrobianas. La actividad del extracto se ensayó primero *in vitro*, dando como resultado valores de CMI de 187,5 μg·mL^{-1} contra *P. cinnamomi* y en el rango de 187,5-1000 μg·mL^{-1} contra los hongos Botryosphaeriaceae. La formación de complejos conjugados con COS mejoró la actividad, con inhibición completa de *P. cinnamomi* a 78,12 μg·mL^{-1} y a concentraciones en el rango de 375 a 500 μg·mL^{-1} para los tres taxones fúngicos. Pruebas adicionales del complejo conjugado COS–*G. lucidum* como tratamiento protector contra *P. cinnamomi* en ramas de encina condujeron a una alta protección a una dosis de 782 μg·mL^{-1}. Dado que esta eficacia se encuentra entre las mayores reportadas hasta la fecha para productos naturales, *G. lucidum* puede considerarse una fuente prometedora de productos bioactivos para la protección de especies de *Quercus* contra el oomiceto responsable de su declive en la dehesa.

5. Agradecimientos

A J.Á. Arranz Sanz y P. Zamora Brauweiler del Centro de Sanidad Forestal de Calabazanos, por proporcionarnos los aislados de fitopatógenos. A P. Blasco y P. Candela, de los Servicio Técnicos de Investigación de la Universidad de Alicante, por la realización de los análisis de GC–MS.

Esta investigación ha sido financiada por la Unión Europea a través del Programa Horizonte Europa (HORIZON-CL6-2022-FARM2FORK-01), con el proyecto '*Agro-ecological strategies for resilient farming in West Africa* (CIRAWA)', ID 101084398.

Referencias

1. Wang, X.-M.; Zhang, J.; Wu, L.-H.; Zhao, Y.-L.; Li, T.; Li, J.-Q.; Wang, Y.-Z.; Liu, H.-G. A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China. *Food chemistry* **2014**, *151*, 279-285.
2. Wachtel-Galor, S.; Yuen, J.; Buswell, J.A.; Benzie, I.F. Ganoderma lucidum (Lingzhi or Reishi). *Herbal Medicine: Biomolecular and Clinical Aspects. 2nd edition* **2011**.
3. Seweryn, E.; Ziała, A.; Gamian, A. Health-promoting of polysaccharides extracted from Ganoderma lucidum. *Nutrients* **2021**, *13*, 2725.
4. Bishop, K.S.; Kao, C.H.; Xu, Y.; Glucina, M.P.; Paterson, R.R.M.; Ferguson, L.R. From 2000 years of Ganoderma lucidum to recent developments in nutraceuticals. *Phytochemistry* **2015**, *114*, 56-65.
5. Stojković, D.S.; Barros, L.; Calhelha, R.C.; Glamočlija, J.; Ćirić, A.; Van Griensven, L.J.; Soković, M.; Ferreira, I.C. A detailed comparative study between chemical and bioactive properties of Ganoderma lucidum from different origins. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* **2014**, *65*, 42-47.
6. Sridhar, S.; Sivaprakasam, E.; Balakumar, R.; Kavitha, D. Evaluation of antibacterial and antifungal activity of *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst fruit bodies extracts. *World Journal of Science and Technology* **2011**, *1*, 8-11.
7. Yang, X.; Sun, S.; Chen, Q.; Zhang, Z.; Wang, J.; Liu, Y.; Wang, H. A polysaccharide of *Ganoderma lucidum* enhances antifungal activity of chemical fungicides against soil-borne diseases of wheat and maize by induced resistance. *Agriculture* **2022**, *12*, 55.

8. Burgess, T.I.; López-Villamor, A.; Paap, T.; Williams, B.; Belhaj, R.; Crone, M.; Dunstan, W.; Howard, K.; Hardy, G.E.S.J. Towards a best practice methodology for the detection of Phytophthora species in soils. *Plant Pathology* **2021**, *70*, 604-614.
9. Benito Garzón, M.; Sánchez de Dios, R.; Sainz Ollero, H. Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. *Applied vegetation science* **2008**, *11*, 169-178.
10. Sánchez, M.; Venegas, J.; Romero, M.; Phillips, A.; Trapero, A. Botryosphaeria and related taxa causing oak canker in southwestern Spain. *Plant disease* **2003**, *87*, 1515-1521.
11. Sánchez-Hernández, E.; Balduque-Gil, J.; Barriuso-Vargas, J.J.; Casanova-Gascón, J.; González-García, V.; Cuchí-Oterino, J.A.; Lorenzo-Vidal, B.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Holm oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) bark aqueous ammonia extract for the control of invasive forest pathogens. *Int. J. Mol. Sci.* **2022**, *23*, 11882, doi:10.3390/ijms231911882.
12. Sánchez-Hernández, E.; González-García, V.; Casanova-Gascón, J.; Barriuso-Vargas, J.J.; Balduque-Gil, J.; Lorenzo-Vidal, B.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Valorization of Quercus suber L. Bark as a Source of Phytochemicals with Antimicrobial Activity against Apple Tree Diseases. *Plants* **2022**, *11*, 3415.
13. Sánchez-Hernández, E.; González-García, V.; Correa-Guimarães, A.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Phytochemical profile and activity against *Fusarium* species of *Tamarix gallica* bark aqueous ammonia extract. *Agronomy* **2023**, *13*, 496, doi:10.3390/agronomy13020496.
14. Sánchez-Hernández, E.; Martín-Ramos, P.; Martín-Gil, J.; Santiago-Aliste, A.; Hernández-Navarro, S.; Oliveira, R.; González-García, V. Bark extract of *Uncaria tomentosa* L. for the control of strawberry phytopathogens. *Horticulturae* **2022**, *8*, 672, doi:10.3390/horticulturae8080672.
15. Sánchez-Hernández, E.; Balduque-Gil, J.; González-García, V.; Barriuso-Vargas, J.J.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Phytochemical Profiling of *Sambucus nigra* L. Flower and Leaf Extracts and Their Antimicrobial Potential against Almond Tree Pathogens. *International Journal of Molecular Sciences* **2023**, *24*, 1154-1171, doi:10.3390/ijms24021154.
16. Sánchez-Hernández, E.; Langa-Lomba, N.; González-García, V.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Santiago-Aliste, A.; Torres-Sánchez, S.; Martín-Ramos, P. Lignin–chitosan nanocarriers for the delivery of bioactive natural products against wood-decay phytopathogens. *Agronomy* **2022**, *12*, 461, doi:10.3390/agronomy12020461.
17. Matheron, M.; Mircetich, S. Seasonal variation in susceptibility of *Juglans hindsii* and paradox rootstocks of English walnut trees to *Phytophthora citricola*. *Phytopathology* **1985**, *75*, 970-972.
18. Alsamarrai, A.S.H.; Abdulghani, S.S. Microwave-assisted synthesis, structural characterization and assessment of the antibacterial activity of some new aminopyridine, pyrrolidine, piperidine and morpholine acetamides. *Molecules* **2021**, *26*, 533, doi:10.3390/molecules26030533.
19. Sánchez-Hernández, E.; Martín-Ramos, P.; Navas Gracia, L.M.; Martín-Gil, J.; Garcés-Claver, A.; Flores-León, A.; González-García, V. *Armeria maritima* (Mill.) Willd. flower hydromethanolic extract for cucurbitaceae fungal diseases control. *Molecules* **2023**, *28*, 3730, doi:10.3390/molecules28093730.
20. Walters, D.; Raynor, L.; Mitchell, A.; Walker, R.; Walker, K. Antifungal activities of four fatty acids against plant pathogenic fungi. *Mycopathologia* **2004**, *157*, 87-90, doi:10.1023/b:myco.0000012222.68156.2c.

21. Avinash, J.; Vinay, S.; Jha, K.; Das, D.; Goutham, B.S.; Kumar, G. The Unexplored Anticaries Potential of Shiitake Mushroom. *Pharmacogn Rev* **2016**, *10*, 100-104, doi:10.4103/0973-7847.194039.
22. Khairudin, N.; Basri, M.; Fard Masoumi, H.; Samson, S.; Ashari, S. Enhancing the bioconversion of azelaic acid to its derivatives by response surface methodology. *Molecules* **2018**, *23*, 397, doi:10.3390/molecules23020397.
23. Gibka, J.; Kunicka-Styczyńska, A.; Gliński, M. Antimicrobial activity of undecan-3-one, undecan-3-ol and undec-3-yl acetate. *Central European Journal of Immunology* **2009**, *34*, 154-157.
24. Shi, H.; Zhou, X.; He, X.; Wang, R.; Liang Zeng, E.; Zhou, W. Study on the antifungal mechanism of Chinese herbal extract on Botryosphaeria dothidea. *Journal of Food Processing and Preservation* **2022**, *46*, e16631.
25. Langa-Lomba, N.; Buzón-Durán, L.; Martín-Ramos, P.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Sánchez-Hernández, E.; González-García, V. Assessment of conjugate complexes of chitosan and *Urtica dioica* or *Equisetum arvense* extracts for the control of grapevine trunk pathogens. *Agronomy* **2021**, *11*, 976, doi:10.3390/agronomy11050976.
26. Ferreira, C.S.d.S. Survey of antifungal activity of plant extracts for the development of natural products for agriculture. University of Minho, Portugal, 2021.
27. Castillo-Reyes, F.; Clemente-Constantino, J.A.; Gallegos-Morales, G.; Rodríguez-Herrera, R.; Noé, C. In vitro antifungal activity of polyphenols-rich plant extracts against *Phytophthora cinnamomi* Rands. *African Journal of Agricultural Research* **2015**, *10*, 4554-4560.
28. Giamperi, L.; Fraternale, D.; Ricci, D. The *in vitro* action of essential oils on different organisms. *J. Essent. Oil Res.* **2002**, *14*, 312-318.



Impacto ambiental del cultivo de pomelo regado con agua de mar desalinizada en el sureste de España

S. Ben Abdallah[1], B. Gallego-Elvira[1], A. Imbernón-Mulero[1], V. Martínez-Alvarez[1], J. F. Espin-Espin[1], J. F. Maestre-Valero[1]

[1]Departamento de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203 Cartagena, España; saker.benabdallah@upct.es

Abstract: Citrus production is a globally important activity in the agri-food sector. The irrigated citrus area with desalinated seawater in Spain, Europe's leading citrus producer, has increased dramatically in the last decade. Seawater desalination has alleviated water scarcity, but faces environmental challenges due to its high energy consumption. Conventional production may exacerbate this impact through the intensive use of energy, water and chemical inputs. This work aims to assess the environmental footprint of organic and conventional grapefruit systems irrigated with desalinated seawater. Life Cycle Assessment methodology has been used to quantify and compare the impacts of the grapefruit production systems. Six impact categories have been selected: carbon footprint; freshwater ecotoxicity; freshwater eutrophication; terrestrial acidification; stratospheric ozone depletion; and ozone formation, terrestrial ecosystems. To enable a fair comparative assessment between organic and conventional woody crops, the selected systems had similar characteristics (cultivar and planting density). Results show that organic grapefruit system had lower environmental impacts than the conventional system in all selected categories and both, mass and land, functional units.

Palabras clave: cítricos, ecológico, convencional, desalinización, huella ambiental.

1. Introducción

La producción de cítricos es un importante sector agroalimentario de relevancia mundial, con más de 150 millones de toneladas de cítricos producidas en 2021 [1]. España es el primer productor de cítricos en Europa y la región mediterránea, con el 4,2% de la producción mundial, seguido de Egipto, Turquía e Italia con el 3,2%, 3% y 2%, respectivamente [2]. Se trata de un negocio rentable en general, que proporciona productos diversificados con altos valores nutricionales y beneficios para la salud [3], pero con una notable huella ambiental, mayor a la de otros sistemas agrícolas [4]. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) se ha utilizado para evaluar los impactos ambientales de diferentes cultivos de cítricos en varias regiones del mundo, con la excepción del pomelo [2]. Las primeras fases del ciclo de vida de los sistemas de cultivo (árboles improductivos y jóvenes) no se han tenido en cuenta en la mayoría de los estudios, pero deberían incluirse [2].

La transición de sistemas de cultivo convencionales intensivos a modelos de producción ecológica más respetuosos con el medio ambiente ha demostrado su potencial para reducir la huella ambiental de muchos cultivos leñosos ([5]; [6]; [7]; [8]; [9]; etc.). Sin embargo, los sistemas ecológicos no siempre obtienen mejores resultados en el ACV que los sistemas convencionales, en particular cuando los análisis se basan en la producción total (en kg o t), debido a la agricultura ecológica presenta una productividad generalmente más baja. De hecho, muchos estudios de ACV han presentado resultados para sistemas con diferentes características agronómicas, a menudo con una productividad mucho mayor en los sistemas convencionales debido a una mayor densidad de plantación y/o al uso de cultivares más productivos (p. ej. [8]; [9]; [10]). Además de las diferencias de productividad, se han identificado otras deficiencias en el ACV de los sistemas ecológicos, en concreto la falta de inventarios de fabricación representativos de productos fitosanitarios (PPP) y fertilizantes ecológicos ([11]).

Un aspecto que añade complejidad a la producción de fruta ecológica es la integración de recursos hídricos no convencionales para hacer frente a la actual crisis mundial de escasez de agua ([12]; [13]). La integración de agua de mar desalinizada (AMD) para el riego se considera una opción viable para aliviar la escasez de agua en las regiones costeras secas ([14]; [15]). Sin embargo, el AMD requiere un alto consumo de energía para su producción y distribución, lo que puede agravar los impactos ambientales ([16]).

En este estudio se evalúa mediante ACV la huella ambiental de la producción ecológica de pomelo de regadío con AMD y se compara con la convencional en el sureste de España. Este estudio también aborda las carencias identificadas en el ACV de cítricos, como la consideración de todas las etapas del cultivo (desde la plantación hasta la fase de producción completa) y el uso de inventarios específicos para la producción ecológica.

2. Materiales y métodos

La evaluación ambiental se llevó a cabo de acuerdo con las normas ISO específicas sobre directrices y requisitos de ACV ([17]; [18]), relativos a sus cuatro fases principales: (i) definición del objetivo y alcance; (ii) análisis del inventario; (iii) evaluación del impacto; (iv) interpretación de los resultados.

2.1. Definición del objetivo y alcance

El objetivo del estudio es cuantificar los impactos ambientales de la producción ecológica y convencional de pomelo utilizando AMD para el riego. El estudio de ACV se centra en la producción de pomelo "de la cuna a la puerta de la finca", teniendo en cuenta todos los flujos de materiales y energía desde la extracción de las materias primas hasta la recolección de pomelo en la finca. La zona de estudio es la región de Murcia, que es la tercera productora de cítricos de España, con el 14% de la producción nacional en 2021, y que fue líder en el cultivo de pomelo con el 42% de la producción total en 2021 ([19]).

Los dos sistemas de pomelo (ecológico y convencional) tienen la misma densidad de plantación (416 árboles ha^{-1}) y utilizan el mismo cultivar "Star Ruby". *La Tabla 1* muestra las principales características de los sistemas de cultivo estudiados.

Tabla 1. Principales características de los sistemas de pomelo estudiados.

Características	Ecológico	Convencional
Cultivar	Star Ruby	Star Ruby
Marco de plantación	6x4	6x4
Densidad de plantación (árboles ha^{-1})	416	416
Vida útil (años)	25	25
Juvenil improductivo (años)	2	2
Joven (años)	3	3
Plena producción	20	20
Producción del ciclo de vida (t ha^{-1}/25 año)	1460	1625
Agua de riego	AMD	AMD
Fertilización	Fertirriego	Fertirriego
Control de malas hierbas	Mecánico	Químico y mecánico
Recolección	Manual	Manual
Poda y residuos de poda	Manual y mecánico	Manual y mecánico
Tratamientos fitosanitarios	Bio-protección	Convencionales

Los sistemas se han evaluado a lo largo de todo el ciclo de vida del cultivo del pomelo (25 años), dividido en cuatro fases: plantación, juvenil improductivo, joven y plena producción (*Tabla 1*). Las unidades funcionales (UF) seleccionadas son 1 ha de superficie cultivada de pomelo y 1 t de pomelo, siguiendo las recomendaciones de [20]. Todos los procesos de la cadena de producción del pomelo, desde la extracción de la materia prima hasta la puerta de la finca, se encuentran dentro de los límites del sistema. *La Figura 1* muestra los límites del sistema y los flujos incluidos en el análisis. Las fases de cultivo de cada sistema se han estructurado en las siguientes etapas (o procesos):

- Riego: incluye los materiales, transporte y fabricación de equipos del sistema de riego y del embalse, así como el consumo del agua y la energía (electricidad) y las emisiones asociadas. Los productos químicos y la infraestructura utilizados para la producción de AMD no se han incluido dentro de los límites del sistema.

- Fertilizantes: abarca la producción, el envasado y transporte al campo de fertilizantes nitrogenados (N), fosfatados (P_2O_5) y potásicos (K_2O) usados, así como las emisiones asociadas. Además, se contabilizan las siguientes emisiones de la aplicación de fertilizantes: i) al aire (N_2O, NH_3, NOx) y; ii) al agua (NO^{3-}; PO_4^{3-}).

- Pesticidas: Esta etapa consiste en la fabricación y síntesis de los componentes químicos y orgánicos de los productos fitosanitarios utilizados, su transporte a la explotación y la eliminación de los residuos al final de su utilización. La fabricación específica de los productos fitosanitarios utilizados en el sistema ecológico se ha contabilizado siguiendo las recomendaciones de [11].

- Maquinaria: Este proceso abarca la fabricación, transporte, uso, reparación y mantenimiento de la maquinaria agrícola necesaria para las prácticas agrícolas en campo (manejo del suelo, aplicación de fitosanitarios y herbicidas y tratamiento de residuos de poda), así como el correspondiente consumo de combustible y las emisiones al aire asociadas.

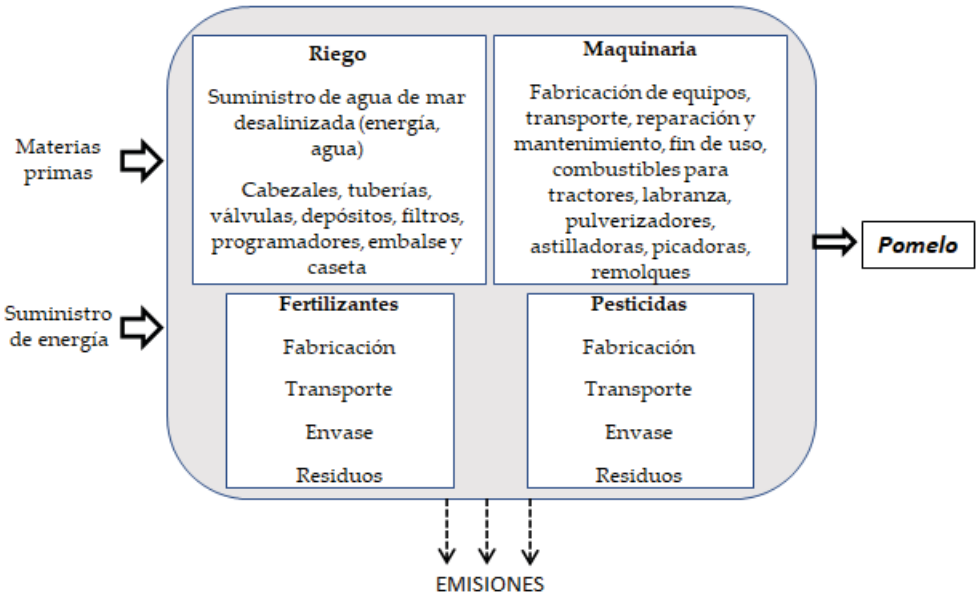


Figura 1. Diagrama de flujo de la producción de pomelo de la cuna a la puerta de la finca.

2.2. Inventario del ciclo de vida

Los datos del inventario del ciclo de vida (ICV) primario y secundario para la producción de pomelos fueron recopilados de la siguiente manera:

- Los datos relacionados con las prácticas agrarias en campo, la productividad y el uso de maquinaria se recogieron de: (i) dos explotaciones situadas en la Región de Murcia (España), que cuentan con árboles en fase de plena producción (plantados en 2004 para el sistema convencional, y en 2013 para el sistema ecológico) y; (ii) datos procedentes de la bibliografía, como las estadísticas y estimaciones proporcionadas por ([21]; [22]) y las recomendaciones técnicas de [23] y [24], relativas a la gestión de los campos de pomelo en la zona de estudio.

- La energía consumida para el suministro de AMD se estima como se indica en un estudio anterior [25].

- Los componentes y materiales utilizados para el establecimiento del sistema de riego para una superficie cultivada de 1 ha de finca de cítricos y su correspondiente vida útil son los indicados para cultivos leñosos en la zona de estudio [4].

- Las emisiones al aire procedentes de la aplicación de fertilizantes al campo (N_2O, NH_3 y NOx) se calcularon según [23] y [26]. La lixiviación de nitratos (NO^{3-}) a las aguas subterráneas se calculó utilizando el modelo de estimación de [27]. El modelo SALCA-P [28] se utilizó para calcular las emisiones de fósforo (PO_4^{3-}) a las aguas superficiales y subterráneas.

- Se utilizó la base de datos ecoinvent v.3.9.1 [29] para: (i) procesos de fabricación de fertilizantes, pesticidas convencionales, maquinaria agrícola, materiales de sistemas de riego y

sus emisiones asociadas; (ii) producción de energía (combustible y electricidad) y; (iii) transporte y eliminación de residuos.

- Los datos para la fabricación de los productos fitosanitarios utilizados en el sistema ecológico se recogieron de la bibliografía, siguiendo las recomendaciones de [11], con el fin de realizar una evaluación comparativa más representativa.

2.3. Análisis del impacto del ciclo de vida

La cuantificación de los impactos ambientales y la identificación de los puntos críticos se llevaron a cabo utilizando la metodología de análisis del impacto del ciclo de vida (AICV) con el software openLCA v.1.11.0. Para realizar la AICV se utilizó el método ReCiPe de punto medio (H) [30]. Para la evaluación ambiental se seleccionaron seis categorías de impacto de punto medio: huella de carbono (HUC, kg CO_2 eq); ecotoxicidad en agua dulce (EAD, kg 1,4-DCB); eutrofización en agua dulce (ETF, kg P eq); acidificación terrestre (ACT, kg SO_2 eq); agotamiento del ozono estratosférico (AOE, kg CFC-11 eq); y formación de ozono, ecosistemas terrestres (FOE, kg NOx eq).

3. Resultados y discusión

3.1. Impacto de los sistemas de produccion de pomelo

La Tabla 2 muestra los valores de los indicadores de impacto para los sistemas de producción de pomelo ecológico y convencional, así como la variación de impacto entre ambos sistemas (expresada como la diferencia porcentual de impacto del ecológico frente al convencional).

Para todas las categorías de impacto evaluadas, el sistema ecológico presenta una huella ambiental más baja que el convencional, tanto para la UF de área (ha) como de masa *(Tabla 2).* La reducción de impacto derivada de cultivar pomelo ecológico en lugar de convencional por ha varía desde 10,3% para FOE hasta 38,2% para AOE (con una reducción media del 19,3% para todas las categorías juntas) (*Tabla 2*). Los mayores impactos ambientales del sistema convencional están relacionados con el mayor consumo por ha de insumos como agua, electricidad y fertilizantes, así como con el uso de productos fitosanitarios sintéticos.

Los resultados por t también muestran la menor huella ambiental del sistema ecológico, aunque las diferencias entre ellos fueron sustancialmente menores. En este caso, la reducción del impacto oscila entre 0,2% para FOE y 31,2% para AOE (con una reducción media de 10,2% para todas las categorías juntas) (*Tabla 2*). Esto se debe a que los impactos ambientales por t están directamente relacionados con la productividad, que es un 10% menor en el sistema ecológico (*Tabla 1*), a pesar de tener el mismo cultivar y densidad de plantación que el sistema convencional.

Tabla 2. Impactos ambientales de los sistemas de producción de pomelo: a) por ha UF; b) por t UF. La variación (Δ) se calcula como [(impacto de ecológico / impacto de convencional) - 1] x 100.

Impactos	Unidad	Ecológico	Convencional	Δ (%)
a) Por ha UF				
HUC	kg CO_2 eq	2,77 x 10^5	3,29 x 10^5	-15,8
EAD	kg 1,4-DCB	1,91 x 10^4	2,18 x 10^4	-12,6
ETF	kg P eq	1,63 x 10^2	2,09 x 10^2	-22,3

ACT	kg SO_2 eq	1,73 x 10^3	2,08 x 10^3	-16,9
AOE	kg CFC-11 eq	1,05	1,70	-38,2
FOE	kg NOx eq	1,10 x 10^3	1,22 x 10^3	-10,3
a) Por t UF				
HUC	kg CO_2 eq	1,90 x 10^2	2,02 x 10^2	-6,3
EAD	kg 1,4-DCB	1,31 x 10^1	1,34 x 10^1	-2,7
ETF	kg P eq	1,11 x 10^{-1}	1,29 x 10^{-1}	-13,5
ACT	kg SO_2 eq	1,18	1,28	-7,5
AOE	kg CFC-11 eq	7,19 x 10^{-4}	1,05 x 10^{-3}	-31,2
FOE	kg NOx eq	7,52 x 10^{-1}	7,53 x 10^{-1}	-0,2

3.2. Contribución de los procesos en los impactos

Figura 2 muestra la contribución de cada proceso de ACV en cada categoría de impacto para los dos sistemas en la fase de plena producción. Los procesos con mayores contribuciones en todas las categorías de impacto son el riego y los fertilizantes.

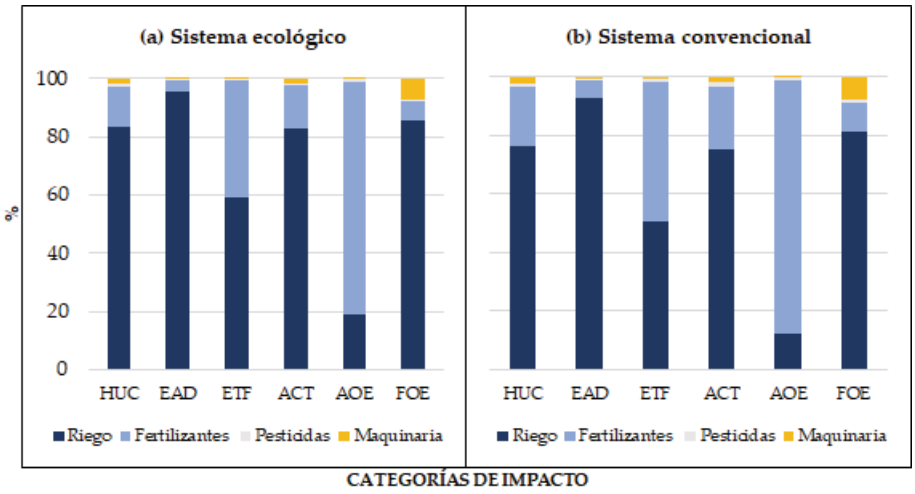


Figura 2. Contribución de los procesos a las categorías de impacto seleccionadas en la fase de plena producción del (a) sistema de producción de pomelo ecológico; y (b) sistema de producción de pomelo convencional.

El principal contribuyente a la mayoría de las categorías es el riego, que representa hasta el 95,2% para EAD y el 85,35 % para FOE en el sistema ecológico. Esto se debe principalmente al elevado consumo de electricidad para la producción y distribución de AMD (4,5 kWh m^{-3}). El proceso relativo a los fertilizantes domina la categoría de impacto AOE en los dos sistemas, ya que es la principal fuente de emisiones de N_2O al aire, con una contribución máxima del 86,71% en el sistema convencional (*Figura 2*).

Los pesticidas y la maquinaria agrícola presentan las contribuciones más bajas en ambos sistemas. En particular, los pesticidas tienen los impactos más bajos en el sistema ecológico, debido a los bajos impactos de la fabricación de los productos fitosanitarios biológicos (con una contribución mínima del 0,42% al ETF, y una contribución máxima del 1,14 % al AOE) (*Figura 2*).

4. Conclusiones

El presente trabajo ha evaluado y comparado la huella ambiental del ciclo de vida de la producción ecológica y convencional de pomelo regado con agua de mar desalinizada. Los sistemas comparados tienen características similares (cultivar y densidad de plantación), para permitir una evaluación comparativa justa entre cultivos leñosos ecológicos y convencionales.

Los principales resultados de este estudio son:

- El sistema ecológico de pomelo muestra un menor impacto ambiental que el sistema convencional en todas las categorías de impacto y tanto en UF de área (ha) como de masa (t).
- El riego con AMD y los fertilizantes son las prácticas con mayor impacto en los sistemas estudiados.

Por último, el análisis debe ampliarse a las dimensiones económica y social para ofrecer un resultado completo de sostenibilidad. Para ello podría utilizarse la evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida.

5. Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por los proyectos SEA4CROP (PID2020-118492RA-C22), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (España) y Solution4Farming (PCI2021-122031-2A), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (España) y NextGenerationEU/PRTR, Horizon2020 Research & Innovation Programme, grant agreement No 696356. Este estudio también ha recibido financiación del Programa AGROALNEXT financiado por MICIN con fondos NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca. Imbernón-Mulero agradece la financiación para realización de la tesis doctoral del proyecto SEA4CROP y el programa predoctoral de la Universidad Politécnica de Cartagena (RV- 484/21, UPCT, España). Gallego-Elvira agradece la financiación del Ministerio de Universidades, ayudas "Beatriz Galindo" (BEAGAL18/00081).

Referencias

80. FAO. Statistics of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAOSTAT). 2023, accessed on 6/03/2023.
81. Cabot, M.I., Lado, J., Clemente, G., Sanjuán, N. Towards harmonised and regionalised life cycle assessment of fruits: A review on citrus fruit. Sustain. Prod. Consum. 2022, 33, 567-585.
82. Çetiner, H. Citrus disease detection and classification using based on convolution deep neural network. Microprocess. Microsyst. 2022, 95, 104687.
83. Martin-Gorriz, B., Gallego-Elvira, B., Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J.F. Life cycle assessment of fruit and vegetable production in the Region of Murcia (southeast Spain) and evaluation of impact mitigation practices. J. Clean. Prod. 2020, 265, 121656.
84. Romero-Gámez, M., Castro-Rodríguez, J., Suárez-Rey, E.M. Optimization of olive growing practices in Spain from a life cycle assessment perspective. J. Clean. Prod. 2017, 129, 25–37.
85. Ben Abdallah, S., Elfkih, S., Suarez-Rey, E.M., Parra-López, C., Romero-Gámez, M. Evaluation of the environmental sustainability in the olive growing systems in Tunisia. J. Clean. Prod. 2021, 282,124526.

86. Alaphilippe, A., Simon, S., Brun, L., Hayer, F., Gaillard, G. Life cycle analysis reveals higher agroecological benefits of organic and low-input apple production. Agron. Sustain. Dev. 2013, 33 (3), 581-592.
87. Pergola, M., D'Amico, M., Celano, G., Palese, A.M., Scuderi, A., Di Vita, G., Pappalardo, G., Inglese, P. Sustainability evaluation of Sicily's lemon and orange production: an energy, economic and environmental analysis. J. Environ. Manag. 2013, 128, 674–682.
88. Ribal, J., Ramírez-Sanz, C., Estruch, V., Clemente, G., Sanjuán, N. Organic versus conventional citrus. Impact assessment and variability analysis in the Comunitat Valenciana (Spain). Int J Life Cycle Assess. 2017, 22, 571–586.
89. Ben Abdallah, S., Parra-López, C., Elfkih, S., Suarez-Rey, E.M., Romero-Gámez, M. Sustainability assessment of traditional, intensive and highly-intensive olive growing systems in Tunisia by integrating Life Cycle and Multicriteria Decision analyses. Sustain. Prod. Consum. 2022, 33, 73-83.
90. Montemayor, E., Andrade, E.P., Bonmatí, A., Antón, A. Critical analysis of life cycle inventory datasets for organic crop production systems. Int. J. LCA. 2022, 27, 543–563.
91. Qadir, M., Sharma, B.R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., Karajeh, F. Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. Agric. Water Manag. 2007, 87 (1), 2-22.
92. Amali, A.A., Mersha, A.N., Nofal, E.R., Murray, K., Norouzi, S., Saboory, S., Salo, H., Chevuru, S.R., Tabrizi, M.S., Reddy, P.K., Abdullahi, A.O., Farahani, H., Kolhe, P., Fard, R.D., Salik, A.W., Hussein, A.H., Najafi, H., Poormoghadam, M., Adiaha, M. Non-conventional sources of agricultural water management: Insights from young professionals in the irrigation and drainage sector. Irrig. and Drain. 2020, 70, 524–540.
93. Barron, O., Ali, R., Hodgson, G., Smith, D., Qureshi, E., McFarlane, D., Campos, E., Zarzo, D. Feasibility assessment of desalination application in Australian traditional agriculture. Desalination. 2015, 364, 33–45.
94. Suwaileh, W., Johnson, D., Hilal, N. Membrane desalination and water re-use for agriculture: State of the art and future outlook. Desalination. 2020, 491, 114559.
95. Martínez-Alvarez, V., Imbernón-Mulero, A., Gallego-Elvira, B., Soto-García, M., Maestre-Valero, J.F. Multidisciplinary assessment of the agricultural supply of desalinated seawater in south-eastern Spain. Desalination. 2023, 548, 116252.
96. ISO International Organization for Standardization, 14040. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. ISO, 2006, Geneva.
97. ISO International Organization for Standardization, 14044. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. ISO, 2006, Geneva.
98. MAPA. Avance de datos de Cítricos, 2021. 2022, https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies producciones-anuales-cultivos/.
99. van der Werf, H.M.G., Knudsen, M.T., Cederberg C. Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. Nat. Sustain. 2020, 3, 419-425.
100. García García, J. Análisis del sector del limonero y evaluación económica de su cultivo. Murcia: Consejería de Agricultura y Agua de la Región de Murcia. 2014, 148 pp. Disponible en: https://www.imida.es/-/analisis-del-sector-del-limonero-y-evaluacioneconomica-de-su-cultivo.
101. García García, J. Estructura de costes de las orientaciones productivas agrícolas de la Región de Murcia: frutales de hueso y cítricos. 2018, 134 pp. Disponible en: https://sftt.info/070618/descargas/01.pdf.
102. Audsley, E., Alber, S., Clift, R., Cowell, S., Crettaz, P., Gaillard, G., Hausheer, J., van Zeijts, H. Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture. Final Report Concerted Action AIR3-CT94–2028. European Commission DG VI Agriculture, UK, 1997.
103. Márquez, L. Maquinaria Agrícola. B&H editores S.L., Madrid, 2004.
104. Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J.F., González-Ortega, M.J., Gallego-Elvira, B., Martin-Gorriz, B. Characterization of the Agricultural Supply of Desalinated Seawater in Southeastern Spain. Water. 2019, 11(6), 1233.

105. Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Kuhlmann, H. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. Int. J. Life Cycle Assess. 2000, 5 (6), 349–357.
106. Martínez-Alcantara, B., Qui nones, A., Forner-Giner, M.A., Iglesias, D.J., Primo-Millo, E., Legaz, F. Impact of fertilizer-water management on nitrogen use efficiency and potential nitrate leaching in citrus trees. Soil Sci. Plant Nutr. 2012, 58(5), 659-669.
107. Nemecek, T., Kagi, T. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Zürich. EcoInvent report. 2007, No.15.
108. Ecoinvent. Database V. 3.9.1. 2022, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
109. Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Int. J. Life Cycle Assess. 2017, 22, 138-147.



Variación temporal de la humedad del combustible fino vivo (HCFV) de cuatro especies vegetales del Parque Regional de la Sierra del Valle y Carrascoy (Región de Murcia)

M.T. Pretel[1], J.M Valverde[2] y J.F. Sarabia[3]

[1] Dpto. Biología Aplicada. Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO), Universidad Miguel Hernández. Ctra. Beniel-Orihuela, Km 3.2, 03312 Orihuela (Alicante) Spain*. mteresa.pretel@umh.es
[2] Dpto. Tecnología Agroalimentaria. Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental. Universidad Miguel Hernández, Ctra Beniel-Orihuela, Km 3.2, 03312 Orihuela (Alicante) Spain. jm.valverde@umh.es
[3] Consorcio de Extinción de Incendios y Salvamento (CEIS) de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Avenida Ciclista Mariano Rojas, s/n 30009 Murcia. Spain. sarabia.ceis@gmail.com

Abstract: Live fuel moisture content (LFMC) is a fundamental factor in the behavior of fire. The Region of Murcia is an arid area of Spain and, therefore, very vulnerable to forest fires, which makes it necessary to have adequate information for the development of prevention strategies and mechanisms. The objective of this work was to study the LFMC of four characteristic and abundant species, *Pinus halepensis*, *Salvia rosmarinus*, *Anthyllis cystisoides* and *Brachypodium sretusum*. The Study was carried out in 4000m^2 of the Sierra del Valle y Carrascoy Regional Park. The samplings were carried out from February to July, in periods of approximately 15 days, differentiating between sunny and shady areas. *P. halepensis* presented the most constant LFMC, between 100 and 82%. *B. retusum* also presented a constant LFMC, although lower, between 50 and 60%, and with a tendency to a gradual decrease. The two species that showed the most variability in terms of LFMC were *A. cystisoides* and *S. rosmarinus*, with LFMC higher than 200 and 140%, respectively, only during the flowering period in spring. The results indicate that prevention methods in these arid zones must be very rigorous throughout the year.

Palabras clave: Zonas áridas, Sureste Español, comportamiento del fuego, incendios forestales, LFMC.

1. Introducción

A pesar de que el fuego es un elemento natural que ha contribuido de forma notable a la configuración de los paisajes a lo largo de la historia [1-3] la acción del hombre sobre la cubierta del suelo ha introducido ciertas modificaciones que lo han convertido en una grave amenaza para los ecosistemas y, de forma especial, para la sociedad [1]. Desde la segunda mitad del siglo XX, los incendios forestales han tomado una nueva dimensión como riesgo natural en distintas partes del mundo, y de forma especial en los países de la Europa Mediterránea [4]. Las dinámicas de dispersión urbana han acelerado el avance de edificaciones y asentamientos de población hacia ámbitos rurales, dando como resultado la configuración de zonas donde las edificaciones se encuentran próximas a superficies forestales, también llamadas superficies de Interfaz Urbano-Forestal (IUF). De forma paralela, el creciente abandono de las actividades agrarias en el mundo rural ha favorecido la recolonización de estas superficies por la vegetación, potenciando la continuidad y peligrosidad de las formaciones forestales [2, 5, 6].

Algunos estudios realizados en el centro y sur de Europa han demostrado que la estructura y la composición del combustible son factores importantes que explican la probabilidad de inicio

y la propagación de incendios [7-9]. El 80% de la superficie total arbolada en la Región de Murcia (248.326,88 ha) está cubierta por bosque puros de pino carrasco o halepo (*Pinus halepensis* Mill.), en su mayoría entre 200 y 1.000m de altitud (IFN4). Aunque en distintos porcentajes, las principales formaciones arbustivas son comunes a la superficie arbolada y a la desarbolada, siendo común la mezcla de matorrales de labiadas como la albaida (*Anthyllis cytisoides* L.) o el romero (*Salvia rosmarinus* Schleid*).*

El pino carrasco es una conífera que puede alcanzar hasta 20 m de altura, es muy resistente a la sequía (por encima de 250 lm^{-2} ya vive perfectamente), forma poco humus y es muy inflamable. Es un árbol que está completamente extendido por toda la Región de Murcia. El romero es un arbusto aromático, de grandes ramas leñosas, generalmente erectas y que puede alcanzar una altura de hasta 2m; forma parte del matorral mediterráneo más característico de la Región de Murcia. La albaida (*Anthyllis cystoides* L.) es un matorral más o menos leñoso, densamente ramificado, con una altura que oscila entre 0,5 y 1,5 m de altura. El *Brachypodium retusum* (Pers.) P. Beauv. (lastón) es una hierba perenne, de rizoma ramificado con tallos de hasta 80 cm de altura que se suele encontrar entre matorrales, bajo pinar, donde es una de las especies dominantes. El lastón (*B. retusum*) florece bien entrada la primavera y conserva las inflorescencias, ya secas, durante bastante tiempo después de la floración. Se trata de una herbácea muy común que domina los pastizales murcianos, siendo habituales grandes rodales creciendo bajo la sombra de los pinares en la Región de Murcia.

Así pues, en los sistemas naturales, los combustibles a menudo consisten en una mezcla de varias especies que difieren en la continuidad y en la densidad. Esta diversidad en la composición y estructura de la vegetación afecta en gran medida los regímenes de incendios [10]. La intensidad de la línea de fuego, la velocidad de propagación y el consumo de combustible son el resultado de las interacciones entre las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad relativa; y las características del combustible, como la composición de especies, la arquitectura de los estratos de vegetación y el contenido en humedad [9, 11, 12].

Una mejor comprensión de la relación entre el fuego y el combustible proporcionaría la base para futuros análisis del comportamiento del fuego en diferentes condiciones ambientales y sistemas de vegetación [3, 13]. Existen pocos trabajos que estudien la humedad del combustible en zonas áridas de la Región de Murcia. Por tanto, el objetivo de este trabajo consistió en determinar la relación entre algunos factores ambientales y el contenido de humedad del combustible fino vivo de cuatro especies vegetales (*P. halepensis, S. rosmarinus, A. cystisoides y B. retusum*) desde febrero a julio, para aportar datos objetivos que ayuden a la prevención de incendios forestales en zonas áridas del Sureste Español.

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

El estudio se realizó en el Parque Regional de la Sierra del Valle y Carrascoy, en un área de $4000m^2$ (UTM: 30N 669674, 4198544) (Figura 1) con una arquitectura de los estratos de vegetación característica de esta zona, en la que los primeros verticilos de la vegetación arbórea se solapan, en el primer metro de altura, con el matorral y la vegetación herbácea. Este Parque es un Espacio Natural Protegido de la Región de Murcia que alberga un bosque mediterráneo repoblado en los años 50 donde la diversidad vegetal es elevada, especialmente entre las plantas arbustivas. Se seleccionó esta área porque la composición y la estructura del combustible es característica de numerosas zonas áridas del Sureste Español.

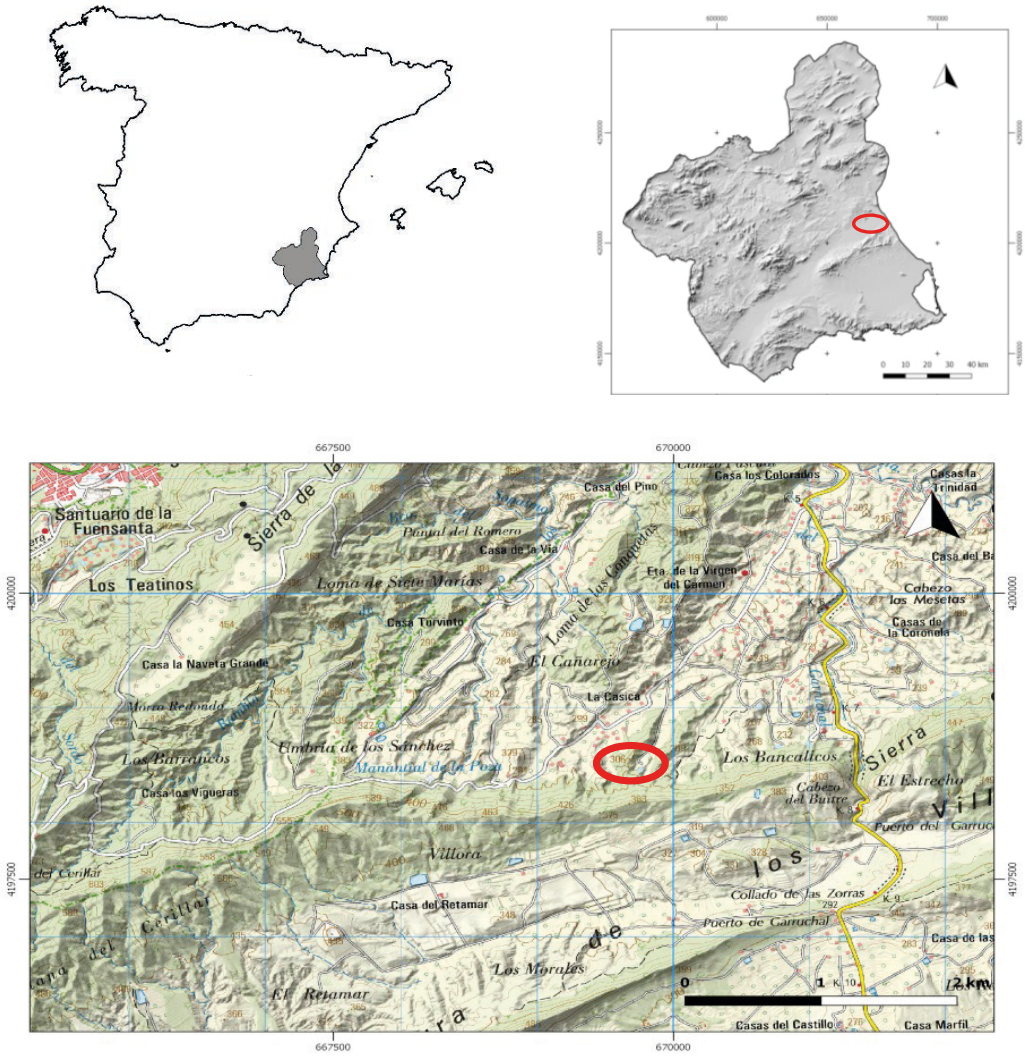


Figura 1: Zona de estudio: Parque Regional de la Sierra del Valle y Carrascoy (UTM: 30N 669674, 4198544). Región de Murcia. España

2.2. Determinaciones realizadas: condiciones ambientales, humedad del combustible fino vivo (HCFV)

Las condiciones atmosféricas, Humedad Relativa (%) y Temperatura (ºC) se midieron con la estación meteorológica portátil Kestrel 5500 Fire Weather Meter Pro (Figura 2a) en el momento del muestreo. Las precipitaciones se consiguieron de AEMET (2018) [14] de Murcia.

Para la estimación de la humedad del combustible fino vivo (HCFV), los muestreos se llevaron a cabo sobre combustible fino vivo de las cuatro especies más abundantes, *Pinus halepensis* Mill, *Salvia rosmarinus* Schleid, *Anthyllis cystisoides* L. y *Brachypodium retusum* (Pers.) P. Beauv. Se utilizó el método de estimación [13]) mediante muestreo periódico de combustible fino vivo (diámetro inferior a 0,6 cm y en porciones de 5 a 10 cm de largo), situado en el primer metro de altura desde el suelo con el fin de estimar el riesgo de que un posible incendio iniciado en capas de vegetación bajas pase a copas. Se realizaron 10 muestreos al azar a cuatro horas diferentes a las 9:00, 12:00, 15:00 y 18:00 (Hora Solar) desde febrero hasta julio, con una periodicidad aproximada de 15 días. En cada muestreo se tomaron entre 20 y 40 gramos de cada especie en cinco ejemplares diferentes. Las muestras se guardaron en un recipiente hermético y se pesaron inmediatamente. A continuación,

se secaron durante 48 horas a 65ºC y se volvieron a pesar. Se calculó la humedad del combustible según la fórmula: HC (%) = (PF-PS)/PSx100 [3, 13].

2.3. Análisis estadístico

Las determinaciones se llevaron a cabo utilizando un sistema completamente al azar por quintuplicado y los datos se expresaron como la media ± ES. Los datos fueron sometidos de forma independiente a un análisis de varianza. Se analizaron las diferencias significativas ($p<0.01$) entre umbría y solana para la temperatura y la humedad relativa en cada fecha de muestreo mediante una prueba t de muestras independientes. También se determinaron las diferencias mínimas significativas ($p<0.05$) mediante test Tukey de las variables temperatura, humedad relativa y la HCFV de las cuatro especies a lo largo de las fechas de muestreo. Se realizó un análisis de correlación de Spearman para determinar el grado de relación lineal entre las variables dependientes HCFV (promedio umbría y solana) de las cuatro especies y las variables independientes fecha, temperatura, y humedad relativa (*=$p<0.05$, **=$p<0.01$). Cuando se encontraron coeficientes de correlación medios ($R\geq0,4$) se determinaron las regresiones polinómicas de tercer grado y sus coeficientes de determinación (R^2). Se utilizaron los softwares SPSS v.22 y Sigmaplot v.15.

3. Resultados y discusión

3.1. Condiciones ambientales, humedad del combustible fino vivo (HCFV) de Pinus halepensis, Rosmarinus officinalis, Anthyllis cystisoides y Brachypodium retusum y riesgo de incendio

La precipitación total desde el día 1 de enero, hasta el final de la experiencia en el mes de julio, fue de 168.9 lm-² (Figura 2). Durante el mes de enero, la precipitación fue despreciable (1.2 lm-²). Durante los seis meses del estudio, solamente en tres ocasiones la cantidad de agua caída fue significativa. Así, en febrero, seis días después del primer muestreo se registraron 23.3 lm-², en marzo, entre los días 58 y 60 cayeron 21.6 lm-² y, finalmente, durante los días 78,79 y 80 correspondientes al mes de abril, la precipitación fue de 107.4 lm-². La temperatura mínima (Figura 2) se registró en febrero durante el primer muestreo (15.7±0,28 ºC y 16,25±0,54), en la umbría y la solana respectivamente, y la máxima, el día 185 del año, con 29,43±0,54 y 32,55±0,54 ºC, en la umbría y la solana respectivamente. La temperatura se mantuvo por debajo de los 23ºC hasta finales de mayo, subiendo a más de 25ºC en los tres últimos muestreos, tanto en la umbría como en la solana, correspondiendo a los meses de junio y julio. Las diferencias en la temperatura entre la umbría y la solana solamente fueron significativas ($p\leq0,05$) en los dos últimos muestreos (16 de junio y 3 de julio). La humedad relativa (HR) sufrió grandes variaciones durante la experiencia (Figura 2c), presentando valores máximos cercanos al 60% desde finales de marzo hasta el 21 de mayo (día 140 del año). La HR más baja, alrededor del 20%, se registró durante los días 55 y 153, final de febrero y principio de junio. No obstante, la HR se mantuvo en torno al 50% durante los seis meses que duró el muestreo. Al igual que con la temperatura, no se apreciaron diferencias significativas ($p\leq0,05$) entre la solana y la umbría hasta los dos últimos muestreos (16 de junio y 3 de julio).

Coincidiendo con Soriano y Quílez [13], en nuestro estudio encontramos importantes variaciones en la humedad del combustible fino vivo (HCFV) entre las especies estudiadas (Figura 3). La evolución de la HCFV en la umbría y la solana fue similar, con pequeñas diferencias durante todo el periodo de estudio. La especie arbórea *P. halepensis* es la que presentó la HCFV más constante, entre 101,5±0,86 el primer día de muestreo y 88.68±1.25 el día 88 (30 de marzo), valores similares a los encontrados por Soriano y Quílez (2017) [13] en la Comunidad Valenciana. *B. retusum* también presentó una HCFV constante, aunque más baja y con tendencia al descenso paulatino. La máxima HCFV de *B. retusum* también se encontró en el primer muestreo de febrero

con el 89,25±2,45%, y la mínima en julio con 34.04±1,49%. Sin embargo, la HCFV de esta hierba se mantuvo con pocas variaciones, entre el 50% y el 60% durante el periodo de estudio. Aunque no existen referencias para HCFV de esta especie en la bibliografía, Soriano y Quílez (2017) [13] midieron la HCV de la gramínea *Stipa tenacissima*, obteniendo valores similares. En nuestro estudio, las dos especies que mostraron más variabilidad en la HCFV fueron *A. cystisoides* y *S. rosmarinus*. Ambas especies presentaron un máximo de HCFV el día 140 del año (21 de mayo) con 208.59±8.13% y 144,42±5,77% respectivamente. Es importante destacar que este aumento en la HCFV coincidió con la floración de ambas especies en primavera, como también encontraron Soriano y Quílez (2017) [13], y aproximadamente entre 45 y 60 días después del periodo de precipitaciones más importante (Figura 2a). Ambas especies, a pesar de que presentan adaptaciones fisiológicas y morfológicas para resistir condiciones de déficit hídrico, comenzaron a presentar clorosis y la abscisión de un número importante de hojas a partir del día 153 (Figura 4).

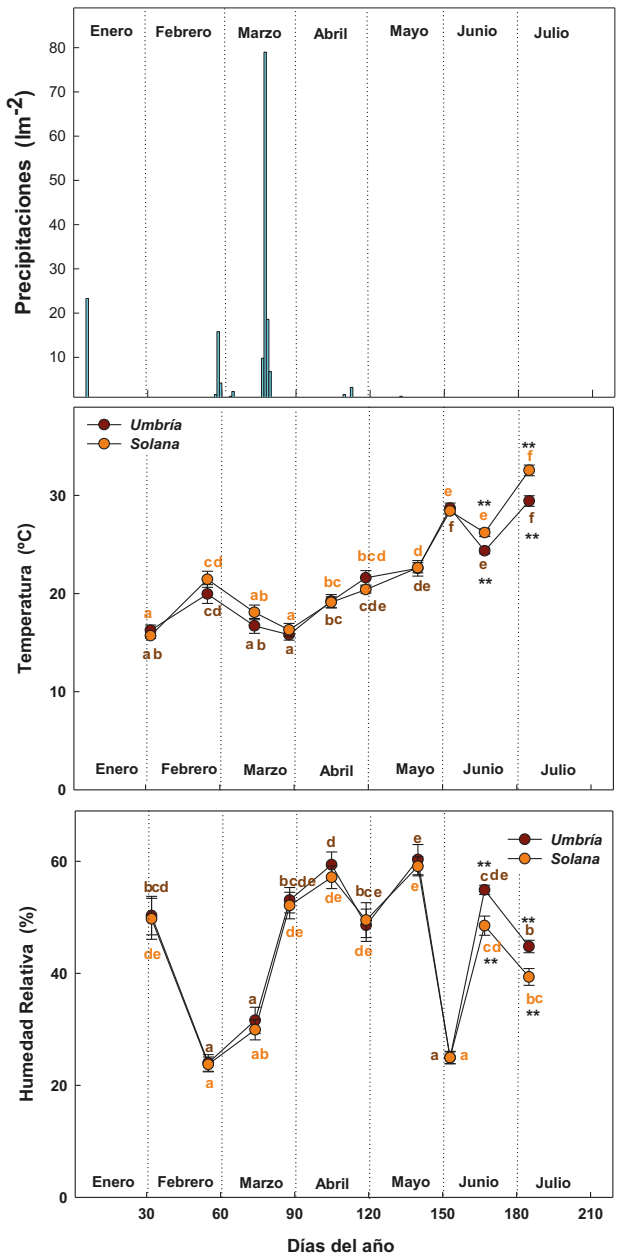


Figura 2. Evolución de las precipitaciones (lm-²), la temperatura (°C) y la humedad relativa (%) desde febrero hasta julio. Los datos son el promedio de 20 medidas ±ES, **p<0.01 entre umbría y solana para una misma fecha. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas p<0.05 a lo largo de las fechas.

Diversos autores han llevado a cabo estudios sobre umbrales de HCFV asociados al riesgo de incendios forestales. Algunos autores encontraron que se pueden producir pequeños incendios con hasta una HCFV de 200%, 205% o incluso con 211% [3,15,16], mientras que otros estudios señalaron valores más bajos, entre 160% y 170% [17,18], aumentando considerablemente el riesgo de incendio por debajo del 140% [15]. Los umbrales más bajos para riesgo de incendio sitúan la HCFV para arbolado entre 100% y 120% [15, 19]; y para matorrales entre 79% y 111% [3, 17]. Por tanto, teniendo en cuenta los umbrales de HCFV indicados por otros autores, tanto la especie arbórea (*P. halepensis*) como los matorrales *A. cystisoides* y *S. rosmarinus* y la especie herbácea, *B. retusum*, se encuentran en umbrales de riesgo de incendio prácticamente en todo el periodo estudiado, tanto en la umbría como en la solana. *P. halepensis* presentó una HCFV inferior al 100%, desde febrero a julio, incluyendo por tanto la primavera, periodo durante el cual todos los autores coinciden en que es el periodo en el que las plantas presentan una HCFV más alta. *B. retusum* mantuvo una HCFV media inferior al 79% durante todo el muestreo. Solamente *A. cystisoides* y *S. rosmarinus* estarían fuera de los umbrales establecidos por algunos autores [15, 3, 17] durante un corto periodo de tiempo, entre 45 y 60 días después de la mayor acumulación de precipitaciones, en los primeros días de mayo y, coincidiendo con el periodo de floración de ambas especies.

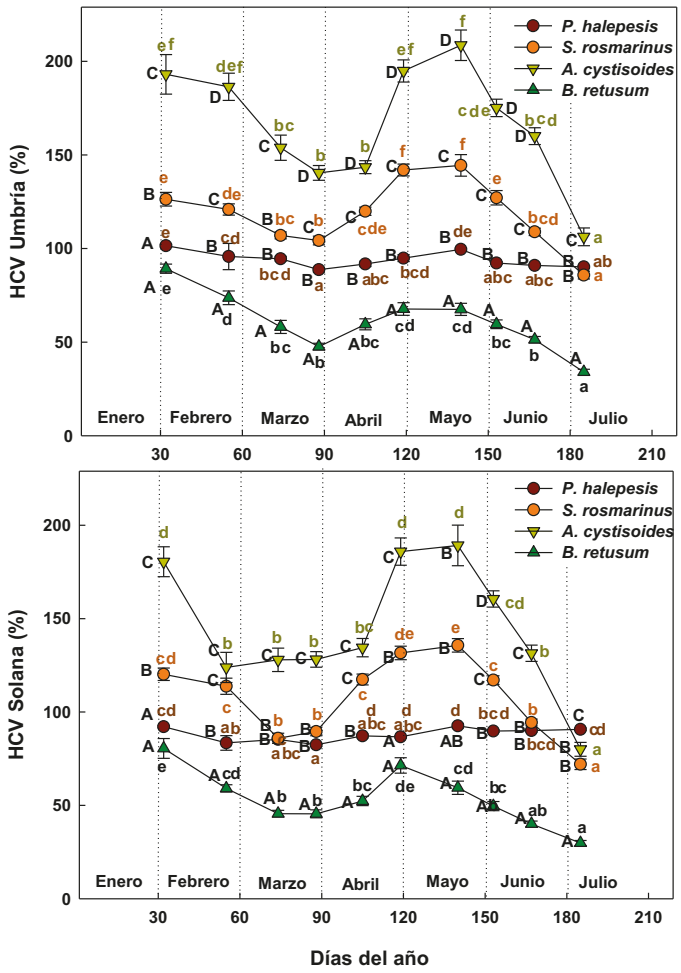


Figura 3. Evolución de los valores de Humedad del Combustible Fino Vivo, HCFV (%) en la umbría y en la solana desde febrero a julio para cuatro especies abundantes y representativas de zonas semiáridas del Sureste Español. Los datos son el promedio de 20 medidas ±ES. Letras minúsculas diferentes representan diferencias significativas p<0.05 a lo largo de las fechas. Letras mayúsculas diferentes representan diferencias significativas p<0.05 entre especies en una misma fecha.

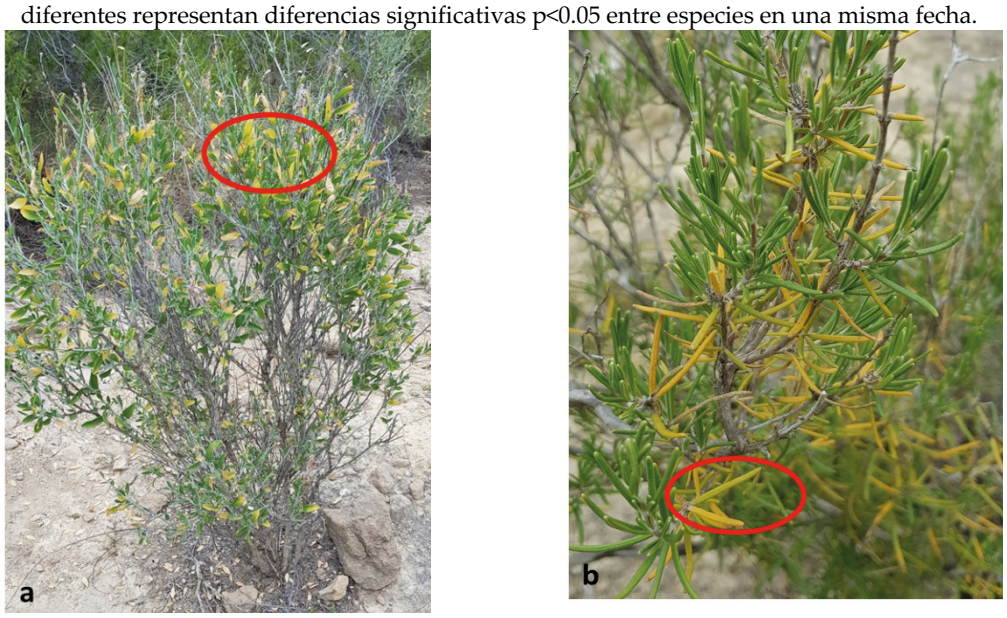


Figura 4. a) Imagen de *Anthyllis cystisoides* el día 136 (16 de junio). b) Imagen de *Salvia rosmarinus* el 16 de junio.

La tabla 1 muestra los coeficientes de correlación rho de Spearman de las variables dependientes HCFV de las cuatro especies entre ellas, y respecto a las variables independientes fecha y temperatura. Existe una elevada correlación positiva entre la temperatura y la fecha (rho 0.761 con una significancia p<0.01). Así mismo, se ha encontrado que la HCFV de todas las especies, tienen correlaciones negativas con la fecha y la temperatura, siendo *B. retusum* la especie que obtuvo valores más elevados y altamente significativos (-0.496 p<0.01 para fecha y -0.405 p<0.01 para temperatura).

Tabla 1. Coeficientes de correlación **rho** de Spearman y significancia bilateral **sig** entre la fecha, la Temperatura (ºC) y la HCFV de las cuatro especies: *Pinus halepensis* (*Ph*), *Salvia rosmarinus* (Sr) *Anthyllis cystisoides* (*Ac*) y *Brachypodium retusum* (*Br*).

	Temperatura (ºC)	**HCFV *Ac***	**HCFV *Br***	**HCFV *Sr***	**HCFV *Ph***
Fecha	**rho** 0.761** **sig** (0.000)	-0.219** (0.000)	-0.496** (0.000)	-0.194** (0.000)	-0.056 (0.273)
Temperatura (ºC)		-0.207** (0.000)	-0.405** (0.000)	-0.161** (0.001)	-0.084 (0.100)
HCFV *Ac*			0.533*** (0.000)	0.629** (0.000)	0.344** (0.000)
HCFV *Br*				0.557** (0.000)	0.355** (0.000)
HCFV *Sr*					0.314** (0.000)

* La correlación es significativa al nivel 0.05 (bilateral)

** La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

Por otra parte, se ha comprobado que la HCFV mantiene una correlación positiva (rho>0.5) entre *A. cystisoides, S. rosmarinus* y *B. retusum*. Sin embargo, *P. halepensis* es el vegetal que menos correlación tiene con los factores ambientales y con la HCFV del resto de las especies estudiadas.

Cuando se calcularon regresiones no lineales para estimar la HCFV a partir de las fechas, se observó que éstas se ajustaban de un modo aceptable a la evolución de los resultados experimentales mediante ecuaciones polinómicas de tercer grado. En la tabla 2 se expresan los componentes de dichas ecuaciones, así como sus coeficientes R, R^2, R^2 ajustado y el error estándar de estimación. Se obtuvieron R^2 ajustados ≥0.7 para todas las especies, a excepción de *P. halepensis*, con un valor cercano a 0.5. Por tanto, la ecuación polinómica de cada especie puede servir para predecir la HCFV en cada fecha con cierto grado de fiabilidad, y optimizar así los recursos de prevención de incendios forestales en estas regiones semiáridas del Sureste Español.

Tabla 2. Regresiones no lineales de las ecuaciones polinómicas de tercer grado (f=y0+a*x+b*x^2+c*x^3), R, R^2, R^2 ajustado y ES para cada una de las HCFV respecto a las fechas.

	A. cystisoides	*B. retesum*	*S. rosmarinus*	*P. halepensis*
y0	372,8785	164,2919	216,9072	117,5426
a	-8,2079	-3,4105	-4,1637	-0,8998
b	0,0889	0,0335	0,0470	0,0086
c	-0,0003	-0,0001	-0,0002	-2,4632E-005
R	0,9194	0,9405	0,8930	0,8181
R^2	0,8452	0,8846	0,7974	0,6693
R^2 ajustado	0,7679	0,8268	0,6961	0,5039
Error estándar	15,4070	6,2168	10,2909	2,2962

4. Conclusiones

En la zona de estudio (UTM: 30N 669674, 4198544), situada en el Parque Regional de la Sierra del Valle y Carrascoy, tanto la especie arbórea (*P. halepensis*) como los matorrales *A. cystisoides* y *S. rosmarinus* y la especie herbácea, *B. retusum*, se encuentran en umbrales de riesgo de incendio prácticamente en todo el periodo estudiado, tanto en la umbría como en la solana. Las ecuaciones polinómicas de tercer grado que se presentan en este trabajo para las especies *S. rosmarinus*, *A. cystisoides* L. y *B. retusum*, podrían servir para predecir la humedad del combustible fino vivo (HCFV) en cada fecha con cierto grado de fiabilidad, y optimizar así los recursos de prevención de incendios forestales, en las regiones semiáridas del Sureste Español con condiciones ambientales y estratos de vegetación similares al área de estudio.

Referencias

110. Bowman, D.M., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W.J., Cochrane, M.A., D'antonio, C.M., DeFries, R., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A. The human dimension of fire regimes on Earth. J. Biogeogr. 2011, 38, 2223–2236. https://doi.org/ 10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x.
111. Calviño-Cancela, M., Chas-Amil, M.L., García-Martínez, D.E., Touza, J. Interacting effects of topography, vegetation, human activities and wildland-urban interfaces on wildfire ignition risk. Forest Ecology and Management. 2017, 397 Pp.10–17.

112. Costa-Saura, J.M., Balaguer-Beser, Á., Ruiz, L.A., Pardo-Pascual, J.E., Soriano-Sancho, J.L. Empirical Models for Spatio-Temporal Live Fuel Moisture Content Estimation in Mixed Mediterranean Vegetation Areas Using Sentinel-2 Indices and Meteorological Data. Remote Sens. 2021, 13, 3726. https://doi.org/ 10.3390/rs13183726.
113. Chuvieco, E., I., Gonzalez, F., Verdu, I. Aguado, M. Yebra. Prediction of fire occurrence from live fuel moisture content measurements in a Mediterranean ecosystem, Int. J. Wildland Fire. 2009, 18(4), 430–441.
114. Millington, J., Romero-Calcerrada, R., Wainwright, J. Perry, G. An Agent-Based Model of Mediterranean Agricultural Land- Use/Cover Change for Examining Wildfire Risk. Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2008, 11 (4). http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/4.html
115. Galiana-Martín, L., Herrero, G. Solana, J. A Wildland–Urban Interface Typology for Forest Fire Risk Management in Mediterranean Areas. Landscape Research. 2011, 36, 151 – 171.
116. Pezzatti, G. B., Bajocco, S., Torriani, D. y Conedera, M. Selective burning of forest vegetation in Canton Ticino (southern Switzerland). Plant Biosyst. 2009, 143, 609–620.
117. Bajocco, S., Pezzatti, G. B., De Angelis, A., Conedera, M. y Ricotta, C. Bootstrapping wildfire selectivity for the forest types of Canton Ticino (Switzerland). Earth Interact. 2011, 15, 1–10.
118. Barberá, I., Paritsis, J., Ammassari, L., Morales, J.M., Kitzberger, T. Microclimate and species composition shape the contribution of fuel moisture to positive fire-vegetation feedbacks. Agricultural and Forest Meteorology. 2023, 330, 109289
119. Brooks, M. L., D'antonio, C. M., Richardson, D. M., Grace, J. B., Keeley, J. E., Di Tomaso, J. M., et al. Effects of invasive alien plants on fire regimes. Bioscience. 2004, 54, 677–688.
120. Fernandes, P.M., Davies, G.M., Ascoli, D., Fernández, C., Moreira, F., Rigolot, E., Stoof, C.R., Vega, J.A., Molina, D. Prescribed burning in southern Europe: developing fire management in a dynamic landscape. Front. Ecol. Environ. 2013, 11.
121. Varner, M. J., Kane, J. M., Kreye, J. K., and Engber, E. The flammability of forest and woodland litter: a synthesis. Curr. For. Rep. 2015, 1, 91–99.
122. Soriano, J.L. y Quílez, R. Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana. VII Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Plasencia. 2017, Cáceres.
123. AEMET (2018). http://www.aemet.es/es/datos_abiertos.
124. Nolan, R. H., M. M. Boer, V. Resco de Dios, G. Caccamo, and R. A. Bradstock. Large-scale, dynamic transformations in fuel moisture drive wildfire activityacross southeastern Australia, Geophys. Res. Lett. 2016, 43, 4229-4238.
125. Schoenberg, F. P., R. Peng, Z. J. Huang, and P. Rundel. Detection of non-linearities in the dependence of burn area on fuel age and climatic variables, Int. J. Wildland Fire, 2003, 12(1), 1–6.
126. Dennison, P. E., M. A. Moritz. Critical live fuel moisture in chaparral ecosystems: A threshold for fire activity and its relationship to antecedent precipitation, Int. J. Wildland Fire. 2009, 18(8), 1021–1027.
127. Jurdao, S., E. Chuvieco, and J. M. ArevalilloModelling fire ignition probability from satellite estimates of live fuel moisture content, Fire Ecol. 2012, 8(1), 77–97.
128. Agee, J. K., Wright, C. S., Williamson N., Huff M. H. Foliar moisture content of Pacific Northwest vegetation and its relation to wildland fire behavior, For. Ecol. Manage. 2002, 167(1-3), 57–66.



Phytoremediation potential of native plants species in mine soils polluted by metal(loid)s and rare earth elements

M. Azizi[1], Á. Faz[1], R. Zornoza[1], S. Martínez-Martínez[1], J.A. Acosta[1]
[1] Sustainable Use, Management and Reclamation of Soil and Water Research Group, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203, Cartagena, Spain, Email: ja.acosta@upct.es

Abstract:
Mining activity has adverse impact on the surrounding ecosystem especially via release of potentially toxic elements and there is an urgent need to develop efficient technology to remediate these soils. Phytoremediation can be potentially used to remediate contaminated areas. This study was conducted to evaluate the level of contamination of 29 metal(loid)s and rare earth elements (REEs) in two natural soils and four native plants species growing in the vicinity of a Pb-(Ag)-Zn mine and asses the phytoextraction and phytostabilization potential. The results indicated that very high contaminations were found for Zn, Fe, Al, Pb, Cd, As, Se and Th, considerable to moderate contamination for Cu, Sb, Cs, Ge Ni, Cr and Co and low contamination for Rb, V, Sr, Zr, Sn, Y, Bi and U in the study area, dependent of sampling place. Available fraction of metals and REEs in comparison to total concentration showed a wide range from being zero percent for Sn to more than 10 percent for Pb, Cd and Mn. Soil properties such as pH, electrical conductivity and clay content affect the total and available concentrations of different metal(loid)s and REEs. The results obtained from plant analysis showed that *P. miliaceum* was a good candidate for phytostabilization of Pb, Cd, Cu, V and As and *S. oppositifolia* for phytoextraction of Zn, Cd, Mn and Mo. All plant species, except *A. herba-alba,* could be as a potential candidate for phytostabilization of REEs while none of the plant species has the potential to be used in phytoextraction of REEs.

Palabras clave: phytoextraction; phytostabilization; mining activity; bioaccumulation.

1. Introduction

Since the industrial revolution, mining activities have been one of the most important sources of anthropogenic contamination in several soils around the world, particularly in regions with a long history of activity. One of the main concerns regarding mining operations is an inappropriate or uncontrolled abundance of numerous tailings deposits that contain a high content of potentially toxic elements (PTEs). These PTEs include heavy metals (e.g., Zn, Pb, Cd, Cu, U, Th), metalloids (e.g., Ge, Sb, As, Bi) and rare earth elements (REEs) (e.g., Pr, Y and La) which especially in high concentrations, have seriously affected the physiological and biochemical processes in plants, animals, human as well as soil microorganisms [1].

Therefore, there is an urgent need to develop efficient and sustainable soil remediation systems to reduce the risk associated with the mobility, transportation, dispersion and ecotoxicity of PTEs from abandoned mine tailings to surrounding environments. Apart from several chemical/physical technologies such as excavation of contaminated material, landfilling, incineration, immobilization, stabilization/solidification and chemical extraction, phytoremediation can provide a less invasive, low-cost phytotechnology, environmental-friendly, long lasting and esthetic solution to rehabilitate these contaminated areas [2]. Phytoremediation is the process of application of green plants to remove or render heavy

metals/metalloids contaminants harmless. Among phytoremediation techniques, phytoextraction and phytostabilization are the most promising options for mine tailing and surrounding soils reclamation [3].

Phytostabilization, by establishing a plant cover on the surface of contaminated soils, aims to the deactivation and immobilization of the PTEs within a limited area through root accumulation or precipitation within the rhizosphere, thereby diminishing uptake and transport of PTEs and the chances of any biological interactions with humans or animals. In contrast to phytostabilization, phytoextraction relies on the ability of plants to absorb and accumulate soil PTEs in their shoots, so that later harvested in order to remove metal(loid)s from the soil [4]. Native plants, which can be found in wide geographical locations, are of particular interest in this perspective, since these spontaneous plant species are genetically adapted to the contaminant and as such, can remove or retain it, reducing its toxicity in soil [2].

For hundreds of years, the Mazarrón district (Murcia Region, southeast Spain) have been exposed to the mining activity for Pb, Ag and Zn extraction [5]. Although this site was abandoned twenty-five years ago, many tailing ponds remain in the area without any restoration [6]. The objective of this study was to test whether the two natural soils near to this mining area are contaminated by metal(loid)s and REEs and also to identify metal(loid)s and REEs accumulation patterns in native species present in soils and any relationships between the concentration of metals in plants and soils, in order to suggest suitable ones for use in phytoremediation (phytoextraction or phytostabilization) strategies.

2. Material and methods

2.1. Site characterization

The plant and soil samples used in this study were collected from two natural sites (Unit S1 and S2) located in mining area in the municipality of Mazarrón (Murcia Region, SE Spain) (Fig. 1). The climate of the area is semiarid Mediterranean with an average monthly temperature of 18 ºC, and a mean annual precipitation of 350 mm, with rainfall events occurring mostly in autumn and spring and the most important winds in summer are from the E and the prevailing winds are from the N and NE in winter [6].

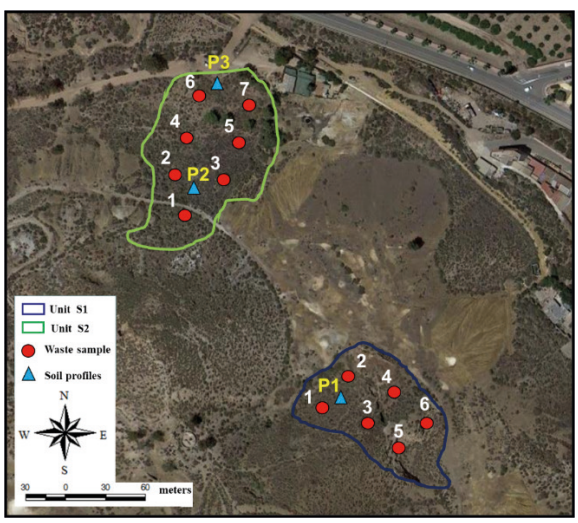


Figure 1. Study area and sampling points.

2.2. Soil sampling and analysis

Different samples were collected from Unit S1 and Unit S2 (6 and 7 samples, respectively) at surface (0-15 cm depth) and subsurface (15-30 cm depth). Three representative soil profiles were taken, one in Unit S1, and two in Unit S2.

All soil samples were oven dried at 40ºC for 48 h, passed through a 2 mm stainless steel sieve, and stored in plastic bags. Soil pH and electrical conductivity (EC) were determined [7]. Soil texture was determined by the Bouyoucos method [26]. Total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) was analyzed by CNHS-O elemental analyzer (EA-1108, Carlo Erba), cation exchange capacity (CEC), through the use of barium chloride as a saturating agent of the soil change complex [8] and equivalent calcium carbonate by means of Bernard's calcimeter.

Soil samples were digested using a mixture of strong acids (nitric-perchloric acid) to determine total content of metals, metalloids and rare earth elements (REEs) [28]. 29 selected elements (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Se, Sr, Y, Zr, Mo, Cd, In, Sn, Sb, La, Ce, Pr, Bi, Th, Ge, Rb, Cs, Pb, Zn, Al, Fe and U) in the filtrated extractants were measured by ICP-MS (Agilent 7500CE). Bioavailable content of metal(loid)s and REEs was measured by extraction of soil samples by organic acid DTPA (diethylene triamine-pentaacetic acid) [9].

2.3. Plant sampling and analysis

The species selected for their abundance have been *Salsola oppositifolia*, *Stipa tenacissima*, *Piptatherum miliaceum* from both Unit S1 and S2 and *Artemisia herbaalba* from Unit S2. A sampling of three specimens of each species was carried out in Units S1 and Unit S2, to analyze the content of heavy metals and metalloids in the roots and in the aerial part (shoots).

The different plant parts were transported to the laboratory and carefully washed with deionized water. They were then dried in an oven at 55ºC for 72 h. The dried material was ground using a mill (A11 Basic, IKA), and incinerated in a muffle furnace. Subsequently, the metals and metalloids were dissolved in HNO_3, and the elements measured by ICP-MS (Agilent 7500CE).

2.4. Data treatment and statistical analyses

2.4.1. Contamination, bioconcentration, translocation, and accumulation factors

The contamination factor (CF) was used for the assessment of soil contamination. According to Hakanson [31], if CF<1, soil quality classified as low contamination, 1≤CF<3 as moderate contamination, 3≤CF<6 as considerable contamination and 6≤CF as very high contamination. In our study, we applied the concentration of elements in the reference levels proposed for the Murcia Region, SE Spain [10, 11].

$$CF=\frac{(Metal/RE)\ soil}{(Metal/RE)\ \text{reference value}} \quad (1)$$

Bioacumulation factor (BCF) of root and shoot (Eq. 2 and Eq. 3) and transfer factor (TF) (Eq. 4) was calculated. It was suggested that the plants exhibit greater than 1 BCF_{root} and less than 1 TF (translocation factor) can be used as a potential candidate for the phytostabilization, while plants with BCF_{shoot} and TF both greater than one have the potential to be used for phytoextraction [3,4].

$$BCF_{root}=(\text{Metal(loid)/REE})\ \text{root}/\ \text{bioavailable}\ (\text{Metal(loid)/REE})\ \text{soil} \quad (2)$$

$$BCF_{shoot}=(\ \text{Metal(loid)/REE})\ \text{shoot}/\ \text{bioavailable}\ (\text{Metal(loid)/REE})\ \text{soil} \quad (3)$$

$$TF=(\ \text{Metal(loid)/REE})\ \text{shoot}/\ (\text{Metal(loid)/REE})\ \text{root} \quad (4)$$

2.4.2. Statistical analysis

All data were tested for goodness of fit to a normal distribution using a Kolmogorov–Smirnov method prior to statistical analysis. Data were log transformed to achieve homogeneity of variance where the distribution was not normal [23]. The evaluation of significant differences between different data was carried out using ANOVA test followed by a Duncan test ($p \leq 0.05$), with the SAS 9.4 software. The correlation among soil properties and metal(loid)s and REEs concentrations were determined using Spearman correlation coefficients using IBM SPSS Statistics 20 software.

3. Results and discussion

3.1. Physic-chemical characteristics of soils

In the three profiles (Table 1), the pH in all horizons is basic and non-saline. The content of OC and TN decreases in depth. CEC was less than 10 $cmol^+ kg^{-1}$, which represents a moderate capacity for nutrient adsorption. The surface and subsurface soils in Unit S1 were slightly alkaline which are lower than the pH from Unit S2. These soil samples exhibited low EC values. The surface and subsurface soils from the sampling sites had no differences in texture, being sandy clay loam with a predominance of sand, followed by clay and silt (Table 1).

Table 1. Geochemical properties of soil in studied area.

	Horizon	Depth	pH	EC*	OC*	TN*	CEC*	Carbonates	Sand	Silt	Clay
		cm		dS m^{-1}	%	%	$cmol^+ kg^{-1}$		%		
	A1	0-10	7.67	3.47	3.11	0.24	9.36	2.38	61	18	21
Profile 1	A2	10-20	8.13	1.80	1.83	0.15	8.73	8.05	62	12	26
	C/R	20-50	8.26	2.46	0.92	0.09	8.3	10.64	66	10	24
	A	0-10	8.04	5.91	2.4	0.2	8.9	0.84	62	10	28
Profile 2	AC	10-20	8.18	4.80	1.7	0.15	9.87	15.02	66	12	22
	C/R	20-40	8.18	5.03	0.83	0.1	10.01	19.71	78	8	14
	A	0-20	7.92	2.98	3.14	0.19	9.48	6.36	68	10	22
Profile 3	C1	20-35	8.26	2.35	0.88	0.1	9.63	32.64	59	9	32
	C2	35-50	7.97	7.73	0.84	0.06	9.28	43.05	49	9	42
	Surface	0-15	7.86b	0.16a	-	-	-	-	64	12	24
Unit S1	Sub-surface	15-30	7.97b	0.13a	-	-	-	-	62	13	25
	Surface	0-15	8.13a	0.19a	-	-	-	-	62	15	23
Unit S2	Sub-surface	15-30	8.27a	0.19a	-	-	-	-	57	14	29

*EC: electrical conductivity, OC: organic carbon, TN: total nitrogen; CEC: cation exchange capacity.

3.2. Metal(loid)s and REEs concentrations in soils

3.2.1. Distribution of total concentration in soils

Results show that the highest concentrations of total metal(loid)s were mainly found for Fe, Al, Pb, Zn and Mn in both Units (Table 2). In previous study was reported that mining waste materials in vicinity of these natural soils are composed of high concentrations of Fe, Pb, and Zn [6]. Therefore, the enrichment of these elements in these Units come possibly from mining waste

materials. The mean concentrations of total Al and Zn in Unit S1 were 48505 and 2436 mg kg^{-1}, respectively, which were significantly higher than the corresponding values in Unit S2 (28127 and 1187 mg kg^{-1}, respectively) (Table 2). There is no significant difference in the contents of total Pb between Unit S1 and Unit S2. On the other hand, mean of total Mn concentration in Unit S2 was higher than Unit S1 (694 and 328 mg kg^{-1}, respectively). The result showed that the mean Fe concentration in Unit S1 was higher than Unit S2 (58318 and 38408 mg kg^{-1}, respectively) (Table 2). It was suggested that the mining districts of Mazarrón are composed of high amounts of Fe-oxyhydroxides, Pb, Zn and Fe sulfides, that related to the parent materials [12].

The result of our study showed that there is no significant difference between total concentration of Cr, Ni, In, Sn, Sb, Bi and Rb in Unit S1 and Unit S2 (the ranges are 110-86.5, 34.5-38.1, 0.87-1.40, 4.70-6.87, 3.06-4.20, 0.29-0.47 and 66.0-73.8, mg kg^{-1}, respectively) (Table 2). Oppositely, higher total concentrations of Co, Cu, Zr and Cs were observed in Unit S2 than Unit S1 (11.7-4.06, 71.1-39.8, 15.8-4.96, 42.6-6.89 mg kg^{-1}, respectively) (Table 2). It was also observed that total concentration of V, Se, Y, Mo, Cd, La,, Ce, Pr, Th, Ge and U were significantly higher in Unit S1 in compare to Unit S2 (83.9-72.3, 2.16-1.32, 23.8-14.9, 3.44-2.22, 14.1-6.67, 54.1-26.3, 118-61.8, 15.3-7.89, 36.7-17.3, 4.94-2.84 and 7.92-4.26 mg kg^{-1}, respectively) (Table 2). The accumulation of these metal(loid)s and REEs in Unit S1 can be attributed to higher concentration in waste materials located in vicinity of this area [5].

Table 2. Total concentrations of metals and REEs (mg kg^{-1}) from Unit S1 and S2.

	Unit S1			Unit S2			F value		
	Surface soil	Subsurface soil	mean	Surface soil	Subsurface soil	mean	Unit	depth	Unit*depth
V	81.1±10.6ab	86.8±5.2a	83.9A	76.1±9.7ab	68.5±13.5b	72.3B	5.87*	0.04ns	1.93 ns
Cr	102±47.2a	119±52a	110A	92.2±18.2a	80.9±15.6a	86.5A	3.00 ns	0.04 ns	1.01 ns
Mn	369±121b	287±192b	328B	795±254a	593±308ab	694.5A	8.48*	1.26 ns	0.23 ns
Co	4.70±0.42c	4.50±1.37c	4.60B	13.4±3.6a	10.0±1.4b	11.7A	32.34**	2.09 ns	1.66 ns
Ni	28.5±3.76b	40.6±19.8ab	34.5A	45.3±14.0a	30.9±3.6b	38.1A	0.46 ns	0.04 ns	6.29*
Cu	46.5±14.2b	33.1±13.7b	39.8B	82.2±28.7a	59.9±21.3ab	71.1A	8.37*	2.75 ns	0.17 ns
As	130±12a	131±54a	131A	153±35a	144±41a	149A	0.99 ns	0.05 ns	0.07 ns
Se	1.87±1.12ab	2.44±1.04a	2.16A	1.42±0.39b	1.22±0.23b	1.32B	7.95*	0.42 ns	1.72 ns
Sr	130±64b	140±79b	135B	484±106a	434±93a	459A	50.13**	0.19 ns	0.43 ns
Y	22.7±2.9ab	24.92±9.99a	23.8A	16.8±3.8bc	13.1±1.5c	14.9B	17.99**	0.13 ns	1.91 ns
Zr	4.72±0.88b	5.20±2.14b	4.96B	16.1±2.1a	15.4±3.2a	15.8A	70.04**	0.03 ns	0.19 ns
Mo	3.39±0.94a	3.48±0.92a	3.44A	2.82±1.11a	1.63±0.38b	2.22B	9.80*	1.97 ns	2.78 ns
Cd	15.4±6.2a	12.8±6.7ab	14.1A	7.21±2.08bc	6.13±2.48c	6.67B	15.31*	0.95 ns	0.17 ns
In	1.62±0.81a	1.18±0.86ab	1.40A	0.93±0.34ab	0.81±0.39b	0.87A	4.32*	1.17 ns	0.42 ns
Sn	5.93±1.48ab	7.80±2.63a	6.87A	6.55±4.96a	2.84±0.86b	4.70A	2.07 ns	0.37 ns	3.42 ns
Sb	2.99±1.05a	3.12±0.42a	3.06A	5.00±1.81a	3.39±0.91a	4.20A	1.92 ns	0.80 ns	1.11 ns
La	41.9±5.1b	66.4±6.6a	54.1A	28.9±4.1c	23.6±4.0d	26.3B	153.59**	18.22**	43.93**
Ce	92.6±9.3b	144±14a	118A	65.9±9.1c	56.3±9.7c	61.2B	136.11**	18.54**	39.06**
Pr	12.4±1.5b	18.2±1.64a	15.3A	8.43±1.21c	7.34±1.27c	7.89B	137.35**	13.46*	29.03**
Bi	0.37±0.17ab	0.20±0.01b	0.29A	0.56±0.27a	0.38±0.21ab	0.47A	3.19 ns	2.44 ns	0.01 ns
Th	25.5±3.5b	47.9±4.8a	36.7A	18.4±3.8c	16.2±2.7c	17.3B	109.27**	29.49**	43.80**
Ge	4.57±0.09b	5.31±0.19a	4.94A	3.10±0.57c	2.56±0.52d	2.84B	112.59**	0.28 ns	10.41*
Rb	61.2±13.61a	70.8±4.3a	66.0A	71.5±21.8a	76.0±29.5a	73.8A	0.49 ns	0.40 ns	0.05 ns
Cs	6.63±1.51b	7.14±0.54b	6.89B	38.7±20.1a	46.5±19.6a	42.6A	18.05**	0.25 ns	0.19 ns
U	8.32±1.62a	7.52±1.78a	7.92A	4.45±0.65b	4.08±0.74b	4.26B	53.67**	1.35 ns	0.19 ns
Fe	63354±6764a	53283±4005a	58318A	40828±6003b	35988±8450b	38408B	34.74**	4.85*	0.60 ns
Pb	2985±1655a	1704±1612a	2345A	2613±920a	2443±1134a	2528A	0.10 ns	1.54 ns	0.91 ns
Zn	2533±440a	2338±289a	2436A	1283±300b	1091±366b	1187B	51.54**	1.23 ns	0.00 ns
Al	44179±1791a	52831±3089a	48505A	29763±5490b	26491±6692b	28127B	58.60**	1.02 ns	5.02*

Different letters indicate significant differences between means after an ANOVA test. *p < 0.05; * *p < 0.01; ns: non-significant

The evaluation of total metal(loid)s and REEs concentration distribution in depth (Table 2) showed that there is no significant difference between surface (0-15 cm) and subsurface (15-30 cm) except for Co, Ni, La, Ce, Pr, Sn, Th and Ge.

3.2.2. Contamination Factor

Based on the Contamination Factor **(**CF) values, varying degrees of contamination were observed for the different metal(loid)s and REEs studied (Figure 2). Very high contamination (CF≥6) were found for Zn, Fe, Al, Pb, Cd, As, Se and Th in both Unit S1 and Unit S2. These high concentrations are mostly due to the mining activity that has contributed to concentrating and enriching of these pollutant and also to the geological substrate enriched with these elements, which finally bring the high ecological risks to these soils [5].

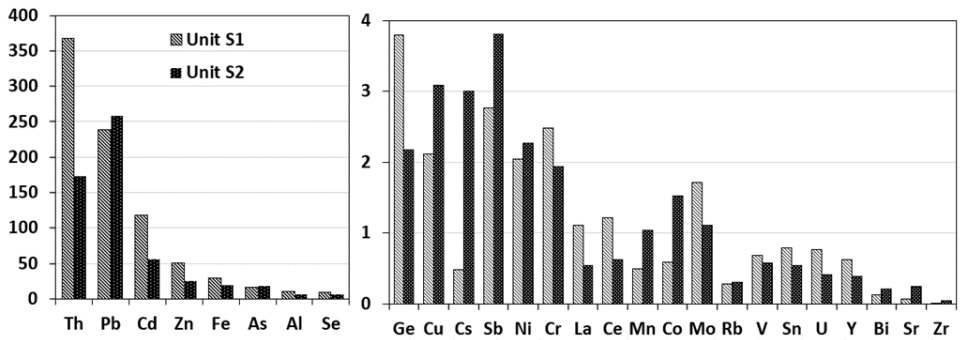


Figure 2. Contamination factor of metal(loid)s and REEs in the study area.

While considerable contamination (3≤CF<6) was found for Cu, Sb and Cs in Unit S2 and Ge in Unit S1, moderate contamination (1≤CF<3) was found for Cu and Sb in Unit S1 and Ge in Unit S2 (Figure 2). In addition, Cs in Unit S1 showed low contamination (CF<1) (Figure 2). These results probably indicates that mine tailing could be responsible for accumulating of these pollutants in the study area. However, the total Co, Ni and Cr content in the studied mining waste was within the background levels of these elements in the Region of Murcia [5]. Low contamination (CF<1) was found for Rb, V, Sr, Zr, Sn, Y, Bi and U in both Unit S1 and Unit S2, Mn , Co and Cs in Unit S1 and La and Ce in Unit S2 (Figure 2).

3.3. Accumulation of heavy metals and metalloids in plant tissues

The BCF_{root} and BCF_{shoot} index revealed that among all plants in the study area, *P. miliaceum* showed BCF_{root} >1 for Pb in Unit S1, therefore *P. miliaceum* can be considered interesting for phytostabilization of Pb in soil (Table 3 and Figure 3). The BCF_{shoot} and TF revealed that in all plant species BCF_{shoot} of Cr>1 while the concentration of Cr in shoot of *P. miliaceum*, *S. tenacissima* and *S. oppositifolia* were 218, 79 and 50 times higher than those available in the soil of Unit S1, which indicates a good capacity of bioaccumulation for Cr by these plants (Table 3 and Figure 3). The results revealed that for Ni, BCF_{shoot} was more than 1 in *S. oppositifolia and S. tenacissima*, and less than 1 in *A. herba-alba* while in *P. miliaceum* it was soil-dependent, that is, it was more than 1 in Unit S1 and less than 1 in Unit S2. Among different plants only *S. oppositifolia* in Unit S2 showed BCF_{shoot}>1 and TF>1 for Cd and *A. herba-alba* and *P. miliaceum* in Unit S1 BCF_{root}>1 and TF<1 for Cd, which means they are suitable for phytoextraction and phytostabilization, respectively (Table 3 and Figure 3). TF for Ni was more than 1 in all plants and soils except that *P. miliaceum* in Unit S2. Briefly, while *S. oppositifolia* and *S. tenacissima* are good candidate for Ni phytoextraction, *A. herba-alba* is not proper candidate in this regards and *P. miliaceum* could phytoextract Ni only in Unit S1 (Table 3 and Figure 3). *S. oppositifolia, S. tenacissima* and *P. miliaceum* in Unit S1 and *A. herba-alba* in Unit S2 showed BCF_{root}>1 and TF<1 for Cu and could be candidate for phytostabilization. Moreover, *S. oppositifolia* in Unit S1 was the only plant that had BCF_{shoot}>1 and TF>1 and was suitable for phytoextraction of Cu from soil (Table 3 and Figure 3).

Table 3. Bioaccumulation Factor (BCF) for different metal(loid)s and REEs in Unit S1 and Unit S2.

	BCF_{root}							BCF_{shoot}						
	Unit 1			Unit 2				Unit 1			Unit 2			
	S.o.	*S. t.*	*P. m.*	*S.o.*	*S. t.*	*P. m.*	*A. h.*	*S.o.*	*S. t.*	*P. m.*	*S.o.*	*S. t.*	*P. m.*	*A. h.*
V	95	41	90	3,4	13	12	3,9	31	31	42	2,6	1,9	0,9	4,0
Cr	30	20	226	6,4	9,4	48	7,5	51	79	218	6,8	19	7,6	5,4
Mn	1,9	0,3	0,9	1,0	0,4	0,3	0,2	3,4	0,8	0,4	1,9	0,3	0,1	0,3
Co	1,5	0,4	0,9	0,2	0,4	0,7	0,1	1,0	0,4	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1
Ni	3,8	1,2	4,1	1,1	1,3	3,6	0,8	4,6	1,5	5,1	1,2	8,1	0,5	1,0
Cu	1,8	2,0	2,6	0,4	0,4	0,5	1,1	4,0	0,7	0,6	0,6	0,3	0,2	0,9
As	69	81	790	6,8	32	23	9,5	19	21	47	2,5	3,0	1,4	3,9
Se	2,1	0,9	2,4	1,3	3,4	2,9	1,0	1,9	0,8	1,3	1,7	1,5	1,0	2,5
Sr	4,3	0,4	2,9	4,6	1,8	1,8	2,3	9,4	0,4	0,8	6,5	0,6	0,7	1,7
Y	0,5	0,5	1,2	0,4	1,6	0,9	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,2	0,1	0,4
Zr	15	2,6	11	7,4	10	9,4	11	8,3	4,6	5,8	5,3	3,0	1,2	11
Mo	12	2,4	7,5	5,5	13	23	19	22	3,2	10	37	19	33	19
Cd	0,3	0,0	3,0	1,2	0,6	0,2	1,2	0,7	0,0	0,1	2,0	0,1	0,0	0,7
In	5,8	8,2	125	2,2	5,4	5,6	3,5	2,4	2,0	8,3	3,3	1,0	0,3	1,9
Sb	3,2	0,6	25	1,9	1,7	3,6	3,0	1,6	0,7	3,0	0,4	0,2	0,1	0,6
La	1,7	1,5	9,9	1,2	5,1	1,9	0,7	1,5	1,0	2,2	0,7	0,7	0,3	1,0
Ce	1,0	1,2	4,3	0,4	3,1	1,0	0,3	0,5	0,6	1,4	0,2	0,3	0,1	0,3
Pr	1,5	1,9	7,6	1,0	5,8	2,8	0,7	1,0	0,8	1,8	0,5	0,6	0,2	0,7
Pb	0,1	0,2	3,7	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Bi	1,1	3,0	2,4	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	0,5	0,9	0,3	0,2	0,0	0,5
Th	3,0	2,4	16	4,2	9,3	3,8	1,9	1,0	2,1	5,5	0,7	1,2	0,4	1,5
Ge	20	1,8	6,7	0,7	2,5	2,0	0,7	3,3	0,9	6,3	0,3	0,8	0,7	0,3
Cs	41	38	76	128	46	25	18	372	34	29	770	20	8,4	23
U	24	157	85	28	139	26	20	6,3	7,8	18	3,0	2,5	1,5	3,7
Zn	2,9	0,3	7,6	0,6	0,5	0,5	0,6	6,5	0,3	1,1	0,8	0,3	0,1	0,5
Al	4,7	112	7,1	40	52	110	27	3,5	55	20	18	40	39	39
Fe	9,6	8,4	33	16	22	22	13	15	9,0	17	11	7,3	2,9	19

S.o.: S. oppositifolia, S. t.:S. tenacissima, P. m.:P. miliaceum, A. h.: A. herba-alba.

According to data from TF, BCF_{root} and BCF_{shoot}, it concluded that *A. herba-alba* has the ability for phytoextraction of V (TF>1 and BCF_{shoot} >1) while other plants could stabilize this element (TF<1 and BCF_{root} >1). All plants lead to accumulate high amounts of As in their root (BCF_{root} for *P. miliaceum*, *S. tenacissima and S. oppositifolia* were 790, 80 and 69, respectively in Unit S1) except for *S. tenacissima* in Unit S1, therefore these native plant species with both the capacity to accumulate high amounts of As in their roots, low values of the translocation from root to shoot (TF<1) could be used to minimize the migration of As in soil (Figures 3). Based on BCF_{root}, TF, and BCF_{shoot} values, none of the plant species has the potential to be used in Mn and Co phytoextraction or phytostabilization except for *S. oppositifolia* which has the potential to extract Mn and stabilize Co in Unit S1 (Figures 3 and 4). The high BCF_{shoot} values for Mo in *S. oppositifolia* (29.6), *S. tenacissima* (11.5) and *P. miliaceum* (21.2) and the TF>1 (5.09, 1.52 and 1.44,) respectively were measured which then suggested these plants suitable for Mo phytoextraction from the soil. However, the BCF_{root} >1 and TF < 1 of Mo (19.08) in *A. herba-alba* showed a high ability to tolerate and accumulate Mo in roots and are then suggested suitable for Mo phytostabilization (Table 3 and Figure 3). For Al, BCF_{root} and BCF_{shoot} in all plants were higher than 1(maximum for *S. tenacissima* were 116 and 55.3 in Unit S1, respectively (Table 3 and Figure 3), while TF was variable for plants according to soil unit (e.g. in the case of *S. tenacissima* TF<1 in Unit S1 and TF>1 in Unit S2), and only in the case of *S. oppositifolia*, it was less than 1 in both soils, so this plant has the ability to stabilize Al in both Units (Table 3 and Figure 3).

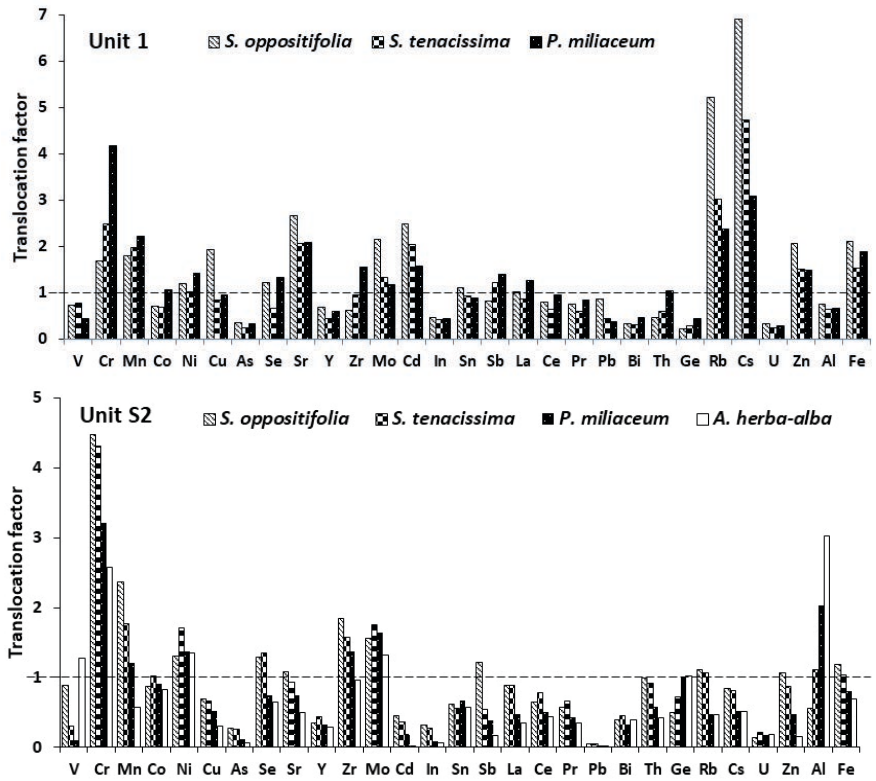


Figure 3. Translocation Factor (TF) for different metal(loid)s and REEs in Unit S1 and Unit S2.

The result of TF showed that *A. herba-alba* had TF>1 for La, Ce, Pr, Y and TF<1 for Th, *S. oppositifolia* in Unit S1 had TF>1 for La and other plants had TF<1 for all REEs (Figure 3). By considering if BCF_{root}>1 and TF<1, plant could be a good candidate for phytostabilization, and BCF_{shoot}>1 and TF>1 could select the plant for phytoextraction, it was found that for La, *S. oppositifolia, S. tenacissima* and *P. miliaceum* had BCF_{root} of 1.45, 3.28 and 5.86 respectively, and could stabilize La in the root. For Ce, *S. tenacissima* and *P. miliaceum* had BCF_{root} of 2.14 and 5.26,

for Th *S. oppositifolia, S. tenacissima* and *P. miliaceum* had BCF_{root} of 3.6, 6.74 and 10.1, for Pr *S. oppositifolia, S. tenacissima* and *P. miliaceum* had BCF_{root} of 1.25, 3.85 and 5.18 and therefore these native plant species with both the capacity to accumulate these REEs in their roots and low values of the translocation from root to shoot could be used to phytostabilization. None of the plant species has the potential to be used in phytoextraction of REEs and/or phytostabilization of Y.

4. Conclusions

This study emphasizes the importance of paying attention to abandoned mines and managing mine tailing because they can cause pollution to enter the surrounding soils. Unit S1 showed higher level of contamination in compare to Unit S2, so more attention should be paid for remediation of this site. As is shown, plants grown in the Unit S1 contained more metal(loid)s and regarding with phytoextraction ability of metal(loid)s such as Cr, Ni, Zn and Cd, they would pass into the food chain via herbivores, and thus provide more potential risk to humans. The results suggested that among four species studied, the suitability of the plant for stabilization or extraction of metal(loid)s completely depends on the type of metal(loid)s and soil type. Although, *A. herba-alba* is the least efficient plant in the phytoremediation process, *P. miliaceum* was a good candidate for phytostabilization of Pb, Cd, Cu, V and As and *S. oppositifolia* for phytoextraction of Zn, Cd, Mn and Mo. All plant species except *A. herba-alba* could be as a potential candidate for phytostabilization of REEs while none of the plant species has the potential to be used in phytoextraction of REEs.

References

1. Tchounwou P.B. Heavy metal toxicity and the environment. Experientia supplementum. 2012, 101, (133-164).
2. Peñalver-Alcalá A. The relationships between functional and physicochemical soil parameters in metal(loid) mine tailings from Mediterranean semiarid areas support the value of spontaneous vegetation colonization for phytomanagement. Ecological Engineering. 2021, 168, 106293.
3. Shackira A.M., Puthur J.T. Phytostabilization of Heavy Metals: Understanding of Principles and Practices. Springer International Publishing. 2019, (263-282).
4. Anoopkumar A.N. Phytoextraction of Heavy Metals, in Methods for Bioremediation of Water and Wastewater Pollution. 2020, Springer Cham. p. (267-276).
5. Azizi M. Environmental pollution and depth distribution of metal(loid)s and rare earth elements in mine tailing. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022, 10(3), 107526.
6. Gabarrón M. Change in metals and arsenic distribution in soil and their bioavailability beside old tailing ponds. J Environ Manage. 2018, 212, (292-300).
7. Staff S.S.D. Soil Survey Manual. United States Department of Agriculture, 1993.
8. Chapman H.D. Cation-Exchange Capacity, in Methods of Soil Analysis. 1965, (891-901).
9. Crock J.G. Severson R.C. Four reference soil and rock samples for measuring element availability in the Western Energy Regions. 1980.
10. Martínez-Martínez, S.M. Niveles de fondo y de referencia de metales pesados en suelos desarrollados de material parental volcánico, metamórfico y sedimentario en la Región de Murcia. España, Universidad Politécnica de Cartagena. 2009.
11. Sánchez M.J. Niveles de fondo y niveles gen´ ericos de referencia de metales pesados en suelos de la Región de Murcia, Ord. Del. Territ. 2007.
12. Martínez-Pagán P. A multidisciplinary study for mining landscape reclamation: A study case on two tailing ponds in the Region of Murcia (SE Spain). Physics and Chemistry of The Earth. 2011, 36.

Native plants and mycorrhizal fungi reduce hydrophobicity and total petroleum hydrocarbons in an agricultural polluted soil

J.A. Acosta[1], E. Hatami[2], V. Dorostkar[2], A. Abbaspour[2]

[1] Sustainable Use, Management and Reclamation of Soil and Water Research Group, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203, Cartagena, Spain, Email: ja.acosta@upct.es

[2] Soil Science, Water and Soil Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Semnan Province, Iran.

Abstract:

Soil water repellency (SWR) is commonly observed in petroleum contaminated soils which creates many restrictions in agriculture. Phytoremediation of these soils can deteriorate petroleum, thereby reducing the SWR and improving water and air penetration into the soil. A pot experiment was conducted to evaluate the efficiency of two native plants (*Bromus tectorum* L. and *Festuca arundinacea*) inoculated with mycorrhizae fungi (MF) and treated with or without nutrient solution (NS) and alfalfa residues (AR) to reduce total petroleum hydrocarbon (TPH) and water repellency in an oil-contaminated soil. The results showed that both plants decreased significantly ($p \leq 0.05$) the initial TPH concentration in the soil with the greatest reduction (about 58%) by *F. arundinacea* treated with MF+NS. An important point was that the greatest decreases of long chain alkanes (LCAs) in different treatments were related to the decreased of intermediate chain size alkanes (C21-C25), ranged from 57% to 75% by *F. arundinacea* and from 45% to 75% by *B. tectorum* L. Water drop penetration test (WDPT) and the molarity of an ethanol droplet (MED) in both plants were the lowest in MF+NS and MF+AR treatments, indicating reductions in the SWR. However, the soil dispersible clay (SDC) was increased in the latter treatments. Overall, these results revealed that the phytoremediation technique can enhance water infiltration into the oil-contaminated soil and improve the plant growth but may deteriorate soil structural stability.

Palabras clave: fitorremediación, contaminación de suelos, hidrocarburos, *Bromus tectorum*, micorrizas, *Festuca arundinacea*

1. Introduction

Total petroleum hydrocarbons (TPHs) include many organic materials, mainly long chain alkanes which have been known as environmental pollutants [1,2]. These compounds may be entered into soil through different ways such as trucks accidents during oil products traffic and leakage from damaged petroleum pipe lines [3,4]. In addition to the serious threats for both humans and wildlife health, the presence of these compounds in soil, change the soil nutrient composition and structure, reduces the soil permeability, impress the soil microbial activities, and reduce agricultural productivity [5,6].

Soil water repellency or hydrophobicity is one of the most destructive effects of oil pollution, so that it reduces soil water retention. In the presence of this phenomenon, the soil quality alters negatively by reducing the soil water infiltration, increasing surface runoff and soil erosion, plant growth limitation and soil microbial activity reduction. It means that soil water repellency simulated desertification [7].

Many factors including plant exudates and residues, soil moisture and composition, microbial products and organic pollutants can influence the soil water repellency [8]. Many studies conducted on petroleum contaminated soils, showed that these compounds cause some degree of hydrophobicity in studied soils, highly depending on hydrocarbon type [9,10].

There are different methods to remediate petroleum contaminated soils in which some biological techniques are more efficient and low cost. These techniques restore soil functions and provide a healthy environment [11]. Phytoremediation technique applies plants to decay or remove petroleum contaminants from the soil to the levels below thresholds introduced by environmental organizations [12] (Montpetit and Lachapelle, 2017). Various studies with and without some of soil amendments have shown that plants have a positive effect on reducing hydrocarbons in the soil [13,14,15]. Many soil amendments, including chemical and organic fertilizers, have been used in phytoremediation process for improving the plant growth condition and stimulating the activity of indigenous microorganisms involved in degradation of organic pollutants [16]. Oil contaminated soils have low fertility and quality for effective growth of target plant species. The addition of organic or inorganic amendments to these soils would improve the plant growth as well as microbial activities involved in the degradation of organic wastes. Some researchers indicated that the degradation of petroleum in contaminated soil by using different plants are more efficient in the presence of mycorrhizae fungi (MF) [3,17].

We hypothesized that the hydrophobicity of oil-contaminated soils would be reduced by planting some native plant species during the phytoremediation process. Inoculating mycorrhizae and adding fertilizer to these soils would enhance the growth of the host plant species and the activity of indigenous TPH-degraders. Hence, this research was conducted to evaluate the potential of *Bromus tectorum* L. and *Festuca arundinacea* plant species with and without MF and two plant growth enhancers i.e. alfalfa residues and nutrient solution in the reduction of TPH and soil hydrophobicity.

2. Materials y methods

2.1. Soil preparation and experimental design

The studied soil was obtained from a contaminated area by petroleum compounds around Khorramabad city, Lorestan province, Iran. The soil contamination by petroleum compounds occurred mainly because of two factors: leakage from damaged petroleum pipelines, and petroleum spilling out due to accidents of Iraqi oil trucks in this zone [18]. The oil contaminated soil was firstly air-dried and then passed through a 2 mm-sieve. Plastic pots were filled with 3 kg of soil. Some properties of the sampled soil before experimental setup are listed in table 1. The experiment was planned as a completely randomized design with two plant species, six treatments and three replications: Control, without adding amendment (C), Nutrient solution (NS), Alfalfa residues (AR), Mycorrhizal fungi (MF), Mycorrhizal fungi + nutrient solution (MF+NS), Mycorrhizal fungi + alfalfa residues (MF+AR).

Table 1. Some properties of the initial soil

Clay	Silt	Sand	pH	EC*	Organic matter	TPH*	MED*	WDPT*
	g $100g^{-1}$			dS m^{-1}	g $100g^{-1}$	g kg^{-1}	%	s
22	24	54	8.1	0.32	2.9	12.49	39.8	5280

∗ EC: electrical conductivity; TPH: total petroleum hydrocarbon; MED: molarity of an ethanol droplet; WDPT: water drop penetration time

In MF treatment, about 150 g purchased inoculum that was a mixture of sand, root fragments, spores and hyphae of three mycorrhizal species of *Glomus etunicatum, Glomus intraradice, and Glomus mosseae* was placed inside soil in the pots. The NS and AR treatments were applied to obtain nutrients needed for better growth of the plants and more microbial activity in the contaminated soil. The amount of N applied in NS was almost equal to its amount in AR. In pots treated with AR, 30 g of alfalfa residues (<1mm) were incorporated with the soil and in those treated with NS, 125 ml of modified Hoagland's nutrient solution was added during growing the plants.

2.2. Plants cultivation and data analysis

Bromus tectorum L. and *Festuca arundinacea* were considered as tested native species in this study. In each pot, ten seeds were planted. A treatment with no plant was also considered. Pots were irrigated each two days by 200 ml of distilled water without any leakage. During the growth period all pots were kept outside the greenhouse. After 40 days, the studied plants were harvested, and their different parts separated. Then, soil in each pot was air dried for further analysis.

Data analysis of variance was performed by SPSS software and the mean data were compared at the 5% probability level ($p \leq 0.05$) based on the least significant difference (LSD).

2.3. Extraction and determination of TPH, soil water repellency measurement and soil dispersible clay

Total petroleum hydrocarbons (TPHs) in air-dried soil samples were extracted with Accelerated Solvent Extraction (ASE 200), and identified by gas chromatography mass spectrometer (GC-MS, Agilent 6850). The carrier gas used in the unit was helium in a continuous flow of 1.4 mL min^{-1}. The GC oven was programmed with an initial temperature of 85 °C until a final temperature of 280 °C for 40 min. long chain alkanes (LCAs), as a main component of TPH, were estimated based on the retention times determined by 2 standard alkanes (C8-C20 and C21-C40) and calculated on the basis of peaks obtained from the standard samples by using Agilent Chemstation Software [19].

The water drop penetration time (WDPT) was used for soil water hydrophobicity measurement. In this regard, 20 g air-dried soil was placed in a petri dish and a 40-µL droplet of distilled water was applied on the soil and the penetration time was measured [20]. Also, the molarity of an ethanol droplet (MED) test was used for soil repellency investigation. The hydrophobicity was measured in the soils after harvesting the plants and also in the initial unplanted soil. In this regard, 20 g air-dried soil was placed in a petri dish and 50 ml ethanol solutions with different concentrations were made using 95% ethanol. Then, 40-µL droplet of each solution was applied on the soil by pipetting. The ethanol molarity of droplet that fully infiltrate into the soil within 10 s was considered as critical infiltration time [21].

For soil dispersible clay (SDC) measurement, 4 g soil (< 2mm) and 30 ml distilled water were transferred to 50-ml centrifuge tube and shacked for 1 hour in 90 rounds min-1. The Stoke's law was used to calculate the required time for silt settlement. Finally, SDC was measured by sampling the clay [22].

3. Results y discussion

3.1. Total petroleum hydrocarbons

Figure 1 shows the diagram of TPH and LCAs peaks (C11-C40) detected in the initial soil sample based on the retention times obtained of the standard alkanes. In this study, the soil LCAs were specified by the carbon number and categorized into five groups. The contribution of LCAs from the TPHs was about 28 %, with the highest contribution found in C16-C20. The soil initial TPH (12.49 g kg^{-1}) was declined in all studied treatments to 4.56-10.76 g kg^{-1} after 40 days of the pot experiment (Fig. 2). The content of soil water was kept at about 70% of water holding capacity

that caused no leachate. Hence, biodegradation, plant uptake, volatilization and biotransformation may be the main known processes involved in TPH dissipation.

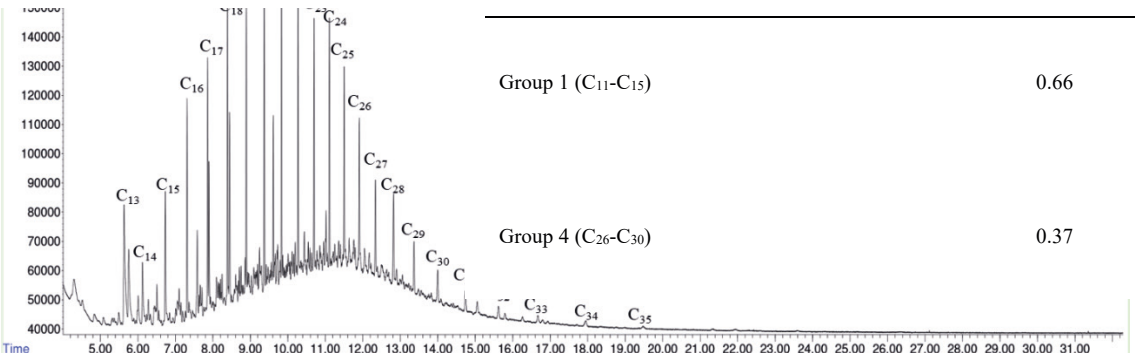


Figure 1. GC/FID chromatogram of TPH and long chain alkanes (C_{11}-C_{35}) identified from the contaminated soil before treating

The TPH concentration in pots planted with *B. tectorum* L. and *F. arundinacea* species (C treatments) was decreased about 7.4 % and 28.8 %, respectively, when compared to the unplanted soil (Fig. 2). It denoted that *F. arundinacea* was more effective than the other species in the reduction of TPH, despite lower root and shoot dry weights, showed that different plant species do not have the same ability in exudates production from their root system. Several researchers showed that this species has high capability to remove TPHs due to organic materials excreted through its roots, thereby promoting oil-degrader microorganisms [23,24].

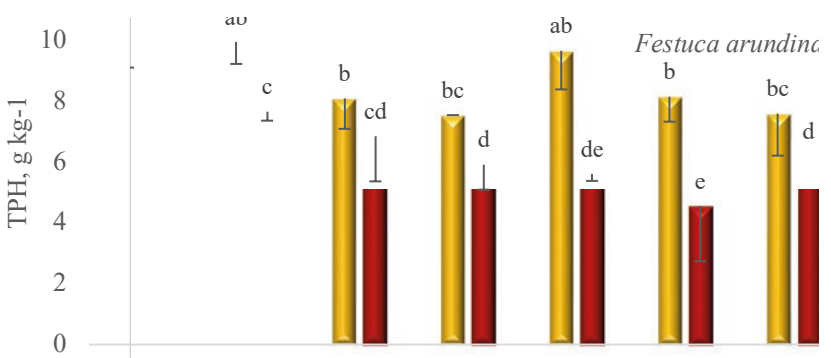


Figure 2. Soil total petroleum hydrocarbons (TPH) concentration in different treatments. C: control, NS: nutrient solution, AR: alfalfa residue, MF: mycorrhizae fungi.

In pots planted with *B. tectorum* L., the application of NS and AR, alone or with MF inoculation could not significantly ($p \leq 0.05$) change the TPH concentration, but in pots planted with *F. arundinacea*, all treatments except NS, reduced the TPH concentration until 40.4% when compared to the C. It seems that these two plant species showed different response to fungal inoculation and also to soil amendments. Contrary to the other species, *F. arundinacea* in the presence of MF decreased significantly the TPH (by 27%, compared to the species alone). The addition of micro- and macronutrients in the forms of organic amendments (AR treatment) and

inorganic solution (NS treatment) can improve the growth and development of plant root, thereby degrading or removing TPH from the soil. Also, MF symbiosis may improve the host plants ability to alleviate nutritional stress by direct uptake and deliver of macro- and micronutrients [25]). However, the impact of MF on TPHs dissipation depends on the host plant species and it may be the main reason for minor effect of MF in *B. tectorum* L. culture [26].

Among the alkane groups defined in this study, C16-C20 had the greatest contribution (33-45%) in all treatments and also in unplanted soil (Fig. 3). Both plant species decreased all LCAs groups, ranging from 26% in C31-C40 to 46% in C21-C25 by *B. tectorum* L. (Fig. 3A) and from 13% in C26-C30 to 57% in C21-C25 by *F. arundinacea* (Fig. 3B), compared to unplanted treatment. A part of this reduction can be related to the root exudates that act as substrate for microbial activity in plant rhizosphere [24].

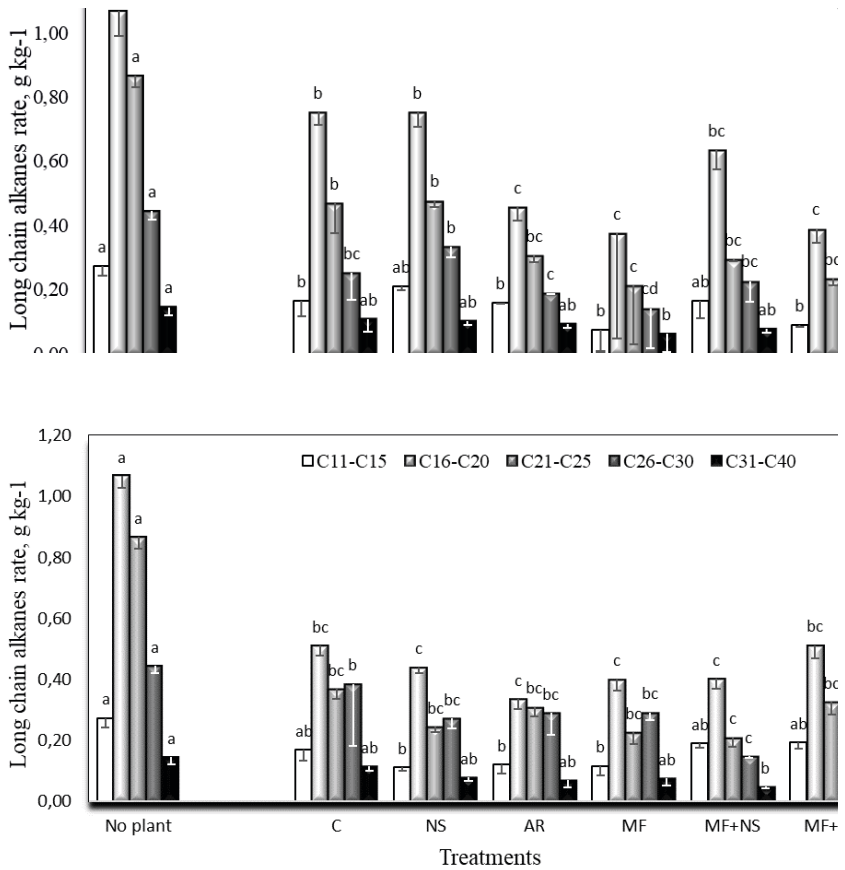


Figure 3. The amount of long chain alkanes (C_{11}-C_{40}) in the soil samples influenced by different treatments in *B. tectorum L.* (A) and *F. arundinacea* (B). C: control, NS: nutrient solution, AR: alfalfa residue, MF: mycorrhizae fungi.

Compared to the C treatment, the greatest dissipation of all LCAs groups was observed by MF or MF+AR in *B. tectorum* L. (Fig 3A) and by AR or MF in *F. arundinacea*. (Fig 3B). It has been suggested that the mycorhizosphere depositions are greatly chemically different from non-mycorrhizal soil and it can considerably alter the associated microbial community and related soil enzyme activity [15].

3.2. Soil water repellency

The water drop penetration test (WDPT) showed that the initial polluted soil was extremely repellent (Fig. 4). The WDPT was greater than 3600 s in both species and in all treatments, except in MF+NS and MF+AR treatments. Therefore, the soil hydrophobicity degree was extremely water repellent in the C, NS, AR and MF treatments, but it changed from extremely water repellent to severe water repellent in AR+MF and NS+MF treatments.

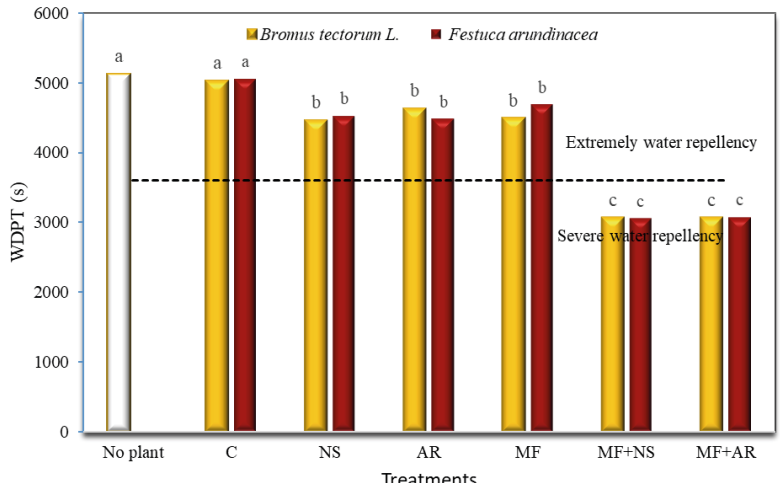


Figure 4. The water drop penetration test in the pots soil with and without plant, (C: control, NS: nutrient solution, AR: alfalfa residue, MF: Mycorrhizae fungi).

In MED test the ethanol percentage was used as soil water repellency index [21]. The comparison between the initial soil (MED=39.8 in Table 1) and no-plant treatment (MED= 39.6 in Fig. 5) showed that the soil incubation without any extra treatments could not effectively reduce the MED. Plant growth and using different amendments reduced the MED significantly compared to no planted soil. The greatest reduction of MED was observed in NS+MF and AR+MF treatments, almost according to the greatest decreases in TPH rates. Generally, TPH contain the high molecular weight of organic compound that cause the soil water repellency. It seems that oil degradation in plant rhizosphere by microorganisms reduced soil hydrophobicity during the oil remediation.

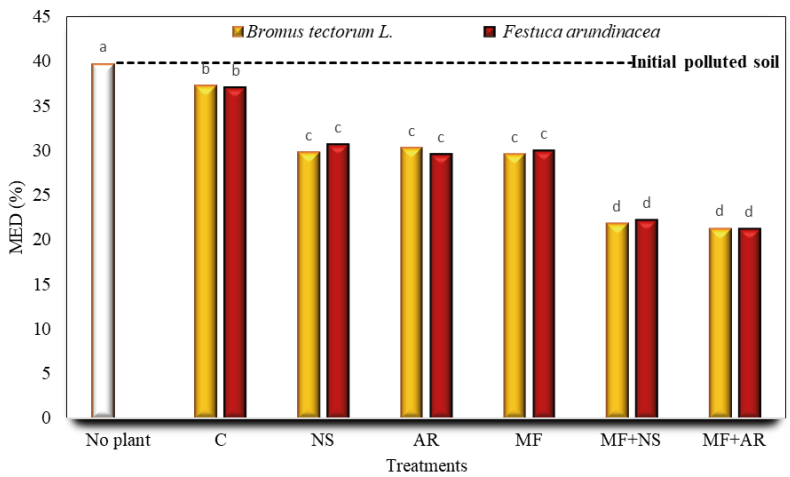


Figure 5. The molarity of an ethanol droplet (MED) results in the pots soil with and without plant, (C: control, NS: nutrient solution, AR: alfalfa residue, MF: Mycorrhizae fungi).

3.3. Soil dispersible clay

The soil dispersible clay (SDC) can be used as soil structural stability index [27]. The lowest SDC was observed in the treatments where no-plant was used, C and MF treatments, implying the greatest soil structural stability (Fig 6). The greater aggregate stability in the mentioned treatments was probably related to the higher soil TPH rate (Fig. 2). The TPH compounds make hydrophobic coating on the soil aggregates that decrease the fast penetration of water into the aggregates and hence reduce their slaking [28]. The significant negative correlation (R2=-0.566, p<0.01) between MED and SDC (Table 2) confirmed this observation. The SDC in MF+NS and MF+AR treatments was significantly higher in B. tectorum L. than F. arundinacea, indicating the more adverse ecological impact of B. tectorum L. on aggregate stability than that of the other species. One of the harmful effects of phytoremediation on oil-contaminated soils is the reduction of the aggregates stability through loss of hydrophobic coatings.

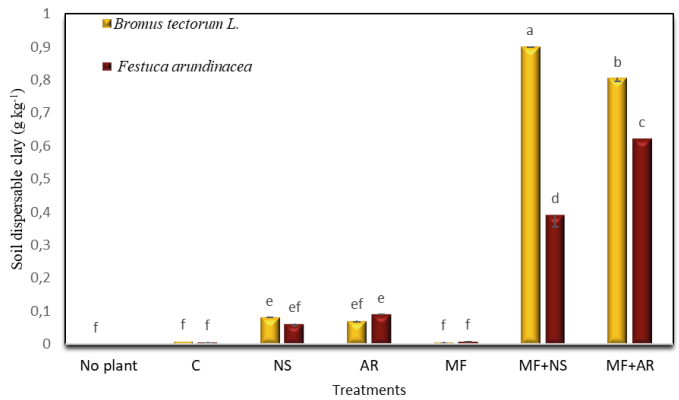


Figure 6. Soil dispersible clay content in the pots soil with and without plant, influenced by different treatments (C: control, NS: nutrient solution, AR: alfalfa residue, MF: Mycorrhizae fungi).

4. Conclusions

Results of this research showed that the native plant species along with soil amendments could remediate oil-contaminated soil and its related soil water repellency, where F. arundinacea had greater ability in soil TPH remediation than B. tectorum L. The precedent species inoculated with MF alone and in combination with NS (MF+NS) reduced the TPH successfully by 26.7% and 40.4%, respectively, when compared to the control. The greatest LCAs decrease was related to the intermediate chain size alkanes (C21-C25) ranged from 57% to 75% in F. arundinacea and from 45% to 75% for B. tectorum L. in different treatments.

Soil water repellency was decreased almost in all treatments with the greatest reductions in MF+NS (46.9%) and MF+AR (43%) treatments, so that the soil hydrophobicity degree changed from extremely water repellent to severe water repellent in these two treatments. However, the soil structural stability was reduced through the increases in the SDC. It means that the phytoremediation of oil-contaminated soils may destroy the soil aggregates which needs more attention in viewpoint of soil ecological aspects.

References

1. Kuppusamy S., Maddela N.R., Megharaj M., Venkateswarlu, K. An overview of total petroleum hydrocarbons. Total Pet. Hydrocarb. 2020, (1–27).
2. Minai-Tehrani D. Effect of heavy crude oil-contaminated soil on germination and growth of Poa trivialis (Rough meadow-grass). Arch. Agron. Soil Sci. 2008, 54, (83–92).

3. Abbaspour A., Zohrabi F., Dorostkar V., Faz A., Acosta J.A. Remediation of an oil-contaminated soil by two native plants treated with biochar and mycorrhizae. J. Environ. Manage. 2020, 254, 109755.
4. Nduka J.K., Umeh L.N., Okerulu I.O., Umedum L.N., Okoye H.N. Utilization of different microbes in bioremediation of hydrocarbon contaminated soils stimulated with inorganic and organic fertilizers. J Pet Env. Biotechnol. 2012, 3, (1–9).
5. Anyika C., Majid Z.A., Yahya A. The impact of biochars on sorption and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils—a review. Environ. Sci. Pollut. Res. 2015, 22, (3314–3341).
6. Zhang H., Tang J., Gurav R.G., Sun K. A novel bioremediation strategy for petroleum hydrocarbon pollutants using salt tolerant *Corynebacterium* and biochar. J. Environ. Sci. 2016, 47, (7–13).
7. Hewelke E., Szatyłowicz J., Hewelke P., Gnatowski T., Aghalarov R. The impact of diesel oil pollution on the hydrophobicity and CO 2 efflux of forest soils. Water, Air, Soil Pollut. 2018, 229, (1–11).
8. Bombino G., Andiloro S., Folino A., Lucas-Borja M.E., Zema D.A. Short-term effects of olive oil mill wastewater application on soil water repellency. Agric. Water Manag. 2021, 244, 106563
9. Badmos B.K., Sakrabani R., Lord R. A glass house trial to investigate the impact of water treatment sludge and green waste compost to enhance the revegetation of contaminated sites. Arch. Agron. Soil Sci. 2016, 62, (865–876).
10. Gordon G., Stavi I., Shavit U., Rosenzweig R. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region. Geoderma 2018, 312, (114–120).
11. Ossai I.C., Ahmed A., Hassan A., Hamid F.S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. Environ. Technol. Innov. 2020, 17, 100526.
12. Montpetit É., Lachapelle E. New environmental technology uptake and bias toward the status quo: The case of phytoremediation. Environ. Technol. Innov. 2017, 7, (102–109).
13. Chirakkara R.A., Redd, K.R. Biomass and chemical amendments for enhanced phytoremediation of mixed contaminated soils. Ecol. Eng. 2015, 85, (265–274).
14. Cristaldi A., Conti G., Jho E., Zuccarello P., Grasso A., Copat C., Ferrante M. Phytoremediation of contaminated soils by metals and PAHs. A brief review. Environ. Technol. Innov. 2017, 8, (309–326).
15. Lenoir I., Lounes-Hadj A., Fontaine J. Arbuscular mycorrhizal fungal-assisted phytoremediation of soil contaminated with persistent organic pollutants: a review. Eur. J. Soil Sci. 2016, 67, (624–640).
16. Vaziri A., Panahpour E., Mirzaee-Beni M.H. Phytoremediation, a method for treatment of petroleum hydrocarbon contaminated soils. Int. J. Farming Allied Sci. 2013, 2, (909–913).
17. Lu Y.-F., Lu M., Peng F., Wan Y., Liao M.-H. Remediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil by using a combination of ryegrass, arbuscular mycorrhizal fungi and earthworms. Chemosphere. 2014, 106, (44–50).
18. Atighechian G., Jahangiri K., Maleki M.R. Inter-sectoral interaction in oil spill incident: Zayande Rood case study. Int. J. Heal. Syst. Disaster Manag. 2014, 2, (62-71).
19. Choi M., Kim Y.-J., Lee I.-S., Choi H.-G. Development of a one-step integrated pressurized liquid extraction and cleanup method for determining polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments. J. Chromatogr. 2014, 1340, (8–14).
20. Dekker L.W., Jungerius P.D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. Catena, Suppl. 1990, (173–183).
21. Roy J.L., McGill W.B. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. Soil Sci. 2002, 167, (83–97).
22. Burt R., Reinsch T.G., Miller W.P. A micro-pipette method for water dispersible clay. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1993, 24, (2531–2544).
23. Liu W., Hou J., Wang Q., Yang H., Luo Y., Christie P. Collection and analysis of root exudates of Festuca arundinacea L. and their role in facilitating the phytoremediation of petroleum-contaminated soil. Plant Soil. 2015, 389, (109–119).
24. Soleimani M., Afyuni M., Hajabbasi M.A., Nourbakhsh F., Sabzalian M.R., Christensen J.H. Phytoremediation of an aged petroleum contaminated soil using endophyte infected and non-infected grasses. Chemosphere. 2010, 81, (1084–1090).
25. Hart M.M., Forsythe J.A. Using arbuscular mycorrhizal fungi to improve the nutrient quality of crops; nutritional benefits in addition to phosphorus. Sci. Hortic. (Amsterdam). 2012, 148, (206–214).

26. Yu X.Z., Wu S.C., Wu Fy., Wong M.H. Enhanced dissipation of PAHs from soil using mycorrhizal ryegrass and PAH-degrading bacteria. J. Hazard. Mater. 2011, 186, 1206–1217.
27. Bashari H., Kazemi S., Mosaddeghi M.R., Tarkesh, M., Adnani, S. Interactions between vegetation dynamic and edaphic factors in the Great Salt Desert of central Iran. J. Arid Land. 2021,13, (123–134).
Lützow M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions–a review. Eur. J. Soil Sci. 2006, 57, (426–445)



Nitrogen assessment in amended mining soils sown with *Coronilla juncea* and *Piptatherum miliaceum*

Juan Carlos Beltrá, María Gabarrón, Ángel Faz, Raúl Zornoza, José A. Acosta and Silvia Martínez-Martínez *

Sustainable Use, Management and Reclamation of Soil and Water Research Group, ETSIA, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, 30230 Cartagena, Spain; ***email:**silvia.martinez@upct.es

Abstract: One of the most used techniques for mine waste reclamation is aided phytostabilization, which is based on the use of plants that immobilize metals in the soil/roots aided by the use of amendments to improve the soil properties to favor plant growth. Although amendments increase nutrients and improve the soil properties, the concentration of these nutrients, especially N, the most limiting plant nutrient, decreases over time. Thus, this study focused on the evaluation of the relationship between different combinations of amendments (compost, biochar, zeolite and limestone) and plant growth (*Coronilla juncea* and *Piptatherum miliaceum)* on the evolution of soil N over time as well as the influence of *C. juncea* on soil N fixation. The results showed that the addition of amendments improved the soil characteristics in all plots favoring the growth of *C. juncea* and *P. miliaceum*. The compost provided higher concentrations of total N, nitrites, nitrates, and ammonium due to the nature of this amendment and the biochar was less in measure. The limestone helped to elevate the pH and the zeolite controlled the exchangeable ions. Soils from *C. juncea* showed higher concentrations of N forms, suggesting that this legume contributes to the enrichment of soil N, likely due to biological fixation. Hence, the combinations limestone-zeolite-compost and limestone-zeolite-compost-biochar were the most suitable treatments for improving the soil fertility and favored plant growth. In addition, *C. juncea* seems to be a good candidate for reclaiming mining environments.

Palabras clave: reclamation; Technosol; tailings ponds; *Coronilla juncea*; *Piptatherum miliaceum*; inorganic N forms.

1. Introduction

Mine activity is considered one of the most environmentally unfriendly anthropogenic activities in the world. It results in negative impacts on public health and the environment because of heavy metals and metalloids that are accumulated in tailings ponds [1]. As a consequence, most of these tailings ponds remain without vegetation and show very low fertility and high toxicity [2]. Therefore, it is necessary to mitigate the environmental impacts such as the transfer of toxic trace elements by water and wind erosion as well as leaching or accumulation in edible plant species [3].

There are several remediation techniques available for tailings ponds. However, aided phytostabilization is considered the most promising phytoremediation technique for the site remediation of tailings ponds. It consists of the chemical stabilization of heavy metals and/or metalloids with the combined use of different inorganic or/and organic soil amendments to create a Technosol and appropriately selected plant species [4].

Numerous studies have shown that there are many candidate plants to be used as phytostabilizers such as the grass *Piptatherum miliaceum,* which has good development in mining soils and tailings where amendments have been applied as well as a high ability to immobilize trace elements in the rhizosphere without the transport of metals to aerial parts [5].

The absence of N in tailings ponds is a recurrent issue in all mining environments worldwide [6]; therefore, it is essential to provide N externally with the use of amendments to enhance the creation of a Technosol and provide nutrients for the proliferation of organisms. Many legume and non-legume species have been widely used in phytoremediation; however, fewer studies have been carried out to evaluate the growth and physiological differences between legume and non-legume candidates in heavy metal-enriched soils. Legume plants commonly show a better performance and adaptation than non-legume species due to their wide-ranging capacities for N_2 fixation [7]. Nitrogen is one of the key nutrients in the terrestrial ecosystem and it is important in the maintenance of the plant community [8].

To stabilize nitrogen concentrations in tailings ponds after an amendment application, a legume species, *Coronilla juncea,* was introduced into the field plots of the present research, which allowed us to study if this N-fixer species was able to improve the soil characteristics. *C. juncea* was selected because it is a shrub native to the semi-arid regions of the Mediterranean basin. In addition, this species has previously been suggested to be included in programs for territorial planning and the rehabilitation of degraded semi-arid to arid ecosystems [9].

2. Materials and methods

2.1. Field Experiment

The field experiment consisted of the implementation of 21 amended plots of 3 m × 3 m ((6 treatments + 1 control) × 3 replicates). The following combination of amendments was used: **1**-Control (CT); **2**-Limestone + biochar (L + BC); **3**-Limestone + compost (L + COM); **4**-Limestone + biochar + compost (L + BC + COM); **5**-Limestone + biochar + zeolite (L + BC + Z); **6**-Limestone + compost + zeolite (L + COM + Z); **7**-Limestone + biochar + compost + zeolite (L + BC + COM + Z).

For each plot, the total amount of amendment that could be added was calculated considering the density and volume of the tailings to treat as well as the surface and depth of the plot where the materials would be incorporated; the doses were then calculated. Thus, using these items, these doses could be extrapolated to any tailings pond in the world by making a few adjustments.

2.2. Sampling and Analytical Methods

The soil samples were collected at different sampling periods (S0, S1, S2 and S3). Sampling 0 (S0) was carried out before the amendment application. Sampling 1 (S1) was performed after the amendment application and the sowing/planting of the plant species at each plot. The rhizosphere soil (RS), non-rhizosphere soil (NRS) and plant samples were collected 4 and 8 months after the plot building (S2) and (S3). Three NRS samples within each plot were randomly collected (0–30 cm) with the S0, S1, S2 and S3 samplings. Three RS and plant samples (*C. juncea* and *P. miliaceum*) within each plot were collected only with the S2 and S3 samplings. The soil and amendment samples were air-dried, passed through a 2 mm sieved and stored in plastic bags at room temperature prior to the laboratory analysis. A portion of the sample was ground for use in the elemental analysis of C and N. The pH and electrical conductivity (EC) of the soil and amendments were measured in deionized water (ratio 1:2.5 and 1:5 *w*/*v*, respectively) [10,11]. The total nitrogen (TN) and total carbon (TOC) in the soil and amendments were measured with a CNHS-O 628 LECO elemental analyzer (LECO, St. Joseph, MI, USA). The anions and cations (NO_2^-, NO_3^-, NH_4^+) were extracted with deionized water (ratio 1:5 *w*/*v*) and measured by METROHM ion chromatography (model 850, Metrohm AG, Herisau, Switzerland). Every month, the vegetation diversity, structure, and plant cover were assessed by taking digital photographs of the marked surface. These images were processed with ImageJ software version 1.8.0 [12,13] and were used to obtain the survival rate, which was calculated as: (final number of individuals × 100)/initial number of individuals.

3. Results and discussion

3.1. Effect of the Amendment Application on Soil Nitrogen Content

An initial characterization of the amendments was carried out in order to know their main properties (Table 1).

Table 1. *Geochemical parameters analyzed in the amendments used in the different treatments.*

	pH	EC (mS·cm^{-1})	TOC (%)	TN (mg·kg^{-1})	N-NO_2^- (mg·kg^{-1})	N-NO_3^- (mg·kg^{-1})	N-NH_4^+ (mg·kg^{-1})
Biochar	11.1	1.5	71.4	760	0.89	12.5	0.7
Compost (from manure)	9.5	12.1	17.7	1910	10.3	107.3	26.6
Zeolite	7.0	0.14	*	*	*	*	*
Limestone	8.7	0.04	*	*	*	*	*

*EC: electrical conductivity; TOC: total organic carbon; TN: total nitrogen; N-NO_2^-: nitrogen-nitrite; N-NO_3^-: nitrogen-nitrate; N-NH_4^+: nitrogen-ammonium; *: non-significant (ns).*

The TN average content of all the treatments (including the control) increased from S0 (283 mg·kg^{-1}) to S3 (1141 mg·kg^{-1}); no increase was observed in the control treatment. Significant differences in the samplings and treatments were observed with the highest TN values where the compost was applied (treatments 3, 4, 6 and 7). The treatments containing the biochar as the sole carbon source showed a lower TN content than when applying the compost, probably because of the nature of the biochar, which contained 2.5 times less TN than the compost. In addition, it should be noted that the plots with the highest TN content were those with the compost as the only carbon source (treatments 3 and 6) (Figure 3A).

N-NO_3^- and N-NO_2^- showed a similar trend to TN. Thus, the N-NO_2^- and N-NO_3^- average contents of all treatments (including the control) increased from S0 (0.14 mg·kg^{-1} for N-NO_2^-; 3.35 mg·kg^{-1} for N-NO_3^-) to S3 (1.51 mg·kg^{-1} for N-NO_2^-; 5.73 mg·kg^{-1} for N-NO_3^-). Significant differences were observed in the samplings and treatments. The highest N-NO_2^- and N-NO_3^- contents were observed with the compost (treatments 3, 4, 6 and 7) whereas the treatments with the biochar as the sole carbon source had the lowest N-NO_2^- and N-NO_3^- contents (Figures 3B,C). The increase of N-NO_2^- and N-NO_3^- contents in S2 seemed to be related to the nitrification processes associated with the probable proliferation of different bacteria that metabolize or produce nitrites and nitrates; the decrease in content of both anions in S3 could be associated with the plant adsorption and N2 release from the denitrification processes [14, 15]. Although the N-NO_2^- and N-NO_3– contents in the last sampling were lower than in the previous ones, the existence of these variations over time in the amended soils implied the release of nutrients that facilitated the growth of the introduced species and the possibility of the natural colonization of the vegetation. Significant differences were observed for N-NH_4^+ among the samplings and treatments. The N-NH_4^+ average content of all treatments (including the control) showed an inverse trend to TN, N-NO_2^- and N-NO_3^- during the samplings, decreasing from S0 (0.86 mg·kg^{-1}) to S3 (0.68 mg·kg^{-1}). However, the N-NH_4+ content showed a trend similar to the N-NO_2^- and N-NO_3^- contents and TN for all the treatments, registering the highest and lowest concentration values in the same treatments. These differences may have been due to the highest content of N-NH_4^+ in the compost (Table 1) whereas the treatments with the biochar as the sole carbon source had the lowest N-NH_4^+ content due to their composition (Figure 3D).

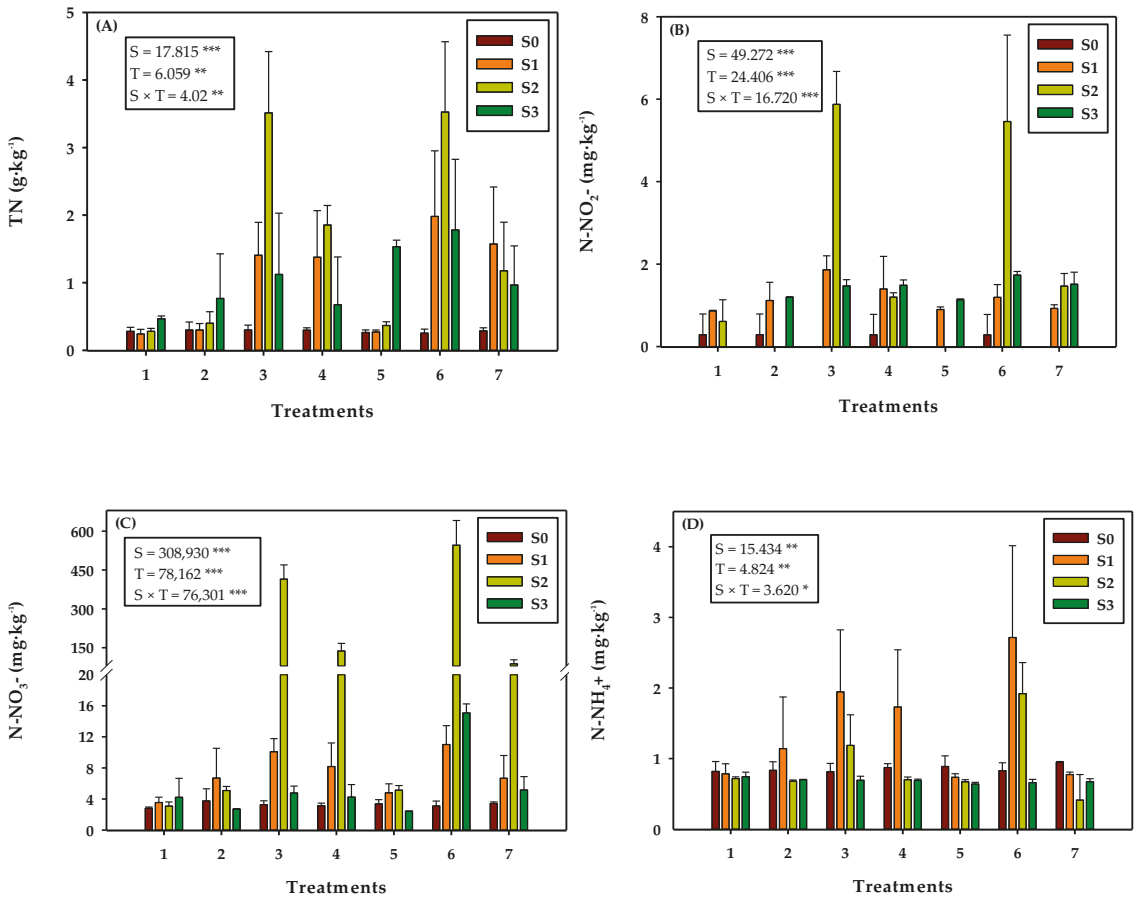


Figure 3. Mean concentration of TN (**A**), $N\text{-}NO_2^-$ (**B**), $N\text{-}NO_3^-$ (**C**) and $N\text{-}NH_4^+$ (**D**) in the different treatments (1-7). 1: control; 2: limestone and biochar; 3: limestone and compost; 4: limestone, biochar and compost; 5: biochar, limestone and zeolite; 6: limestone, compost and zeolite; and 7: limestone, biochar, compost and zeolite. S0: sampling 0, S1 sampling 1, S2: sampling 2; and S3: sampling 3. Error bars denote standard deviation ($n = 3$). F values and significance of the two-way repeated measures ANOVA are shown above. S: sampling; T: treatment. Significant at * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ and *** $p < 0.001$; ns: not significant ($p > 0.05$).

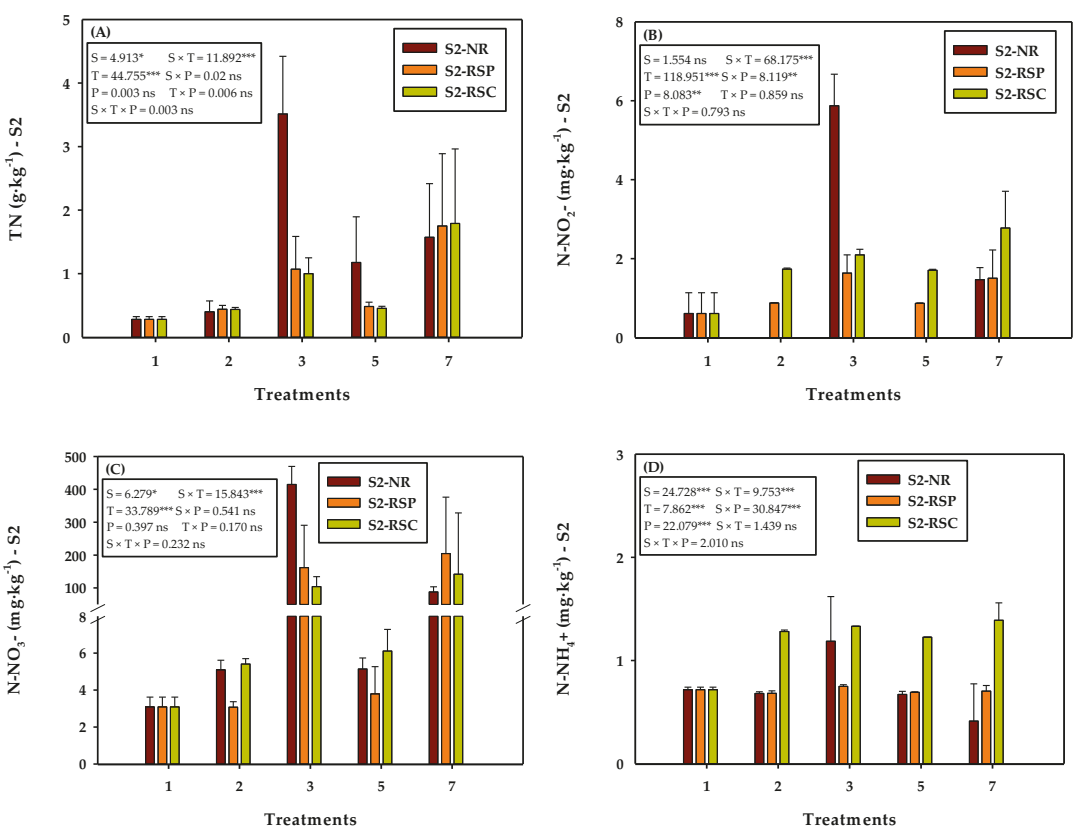
3.2. Effect of the Soil and Plant Type on Soil Nitrogen Content

The soil pH was increased and stabilized with the limestone whereas nutrients were provided by the compost and biochar [17,18] as well as the retention of salts and metals by the zeolite [19]. The amendment application allowed the introduction of plant species with a higher survival rate although a few differences were observed during the colonization process of the plant species because their adaptive capacities and needs were different [20]. Several differences were observed in this study in the development of the planted species. *P. miliaceum* managed to grow and remained alive over time whereas *C. juncea* had greater difficulty in surviving. Therefore, the absence of this species in treatments 4 and 6 in the S2 and S3 samplings and the CT was observed. In the other treatments, *C. juncea* also had problems surviving although the survival rate was higher than in the above-mentioned treatments. The growing conditions were probably inadequate because of one or more of these factors: (a) a short period of development of the soil after the application of the amendments; (b) a slow release of nutrients and/or (c) an elevated content of available heavy metal(oid)s and salts. In plants, phytotoxicity particularly generates a reduction in root growth, biomass, transpiration, chlorosis and leaf necrosis as well

as symptoms of senescence and abscission [21,22]. This high mortality rate may also be indicative of inadequate growth conditions for these species and of competitiveness among them [23].

P. *miliaceum* managed to proliferate with a very good performance, reaching a survival rate of almost 100 %. Similar results were observed by researchers in the phytoremediation of mining waste with amendment additions such as compost, biochar and limestone [2,5,24].

The TN content was significantly higher in the NRS than in the RS in S2 for both species—1014 mg·kg^{-1} and 800 mg·kg^{-1}, respectively—as well in S3, with 971 mg·kg^{-1} for NRS and 500 mg·kg^{-1} for RS. There was a significant effect of the treatment factor (T) in the S2 and S3 samplings whereas the interaction of the soil type × T was only significant in S2 (Figures 4A,E). The treatments 3, 5 and 7 showed the highest TN values, likely due to the compost application. It is important to note that the plant species were not significant for the TN variation in either S2 or S3. Regarding the inorganic forms of N, higher concentrations of N-NO_2^- were observed in the rhizosphere soil for both species (1.4 mg·kg^{-1}) than in the non-rhizosphere soil (0.33 mg·kg^{-1}) in S2 (Figure 4B). This suggested higher nitrification rates in the rhizosphere were likely due to the symbiotic association between legumes and nitrogen-fixing bacteria [24] or the activation of microbial communities by the root exudates in both species. Regarding the type of plant, in S2, significant differences were observed in the concentrations of N-NO_2^- in the rhizosphere soil of *C. juncea*, which acted as a nitrogen-fixing species and reported a higher concentration in all treatments except in treatment 1 (control). However, in S3, significant differences were only observed between the treatments and not between the soil types or species (Figure 4F). This might have been due to the lower concentrations of N-NO_2^- presented by treatment 1 (control) compared with the other treatments (with amendments) that presented similar concentrations because N-NO_2^- originates mainly from organic amendments (compost and biochar).



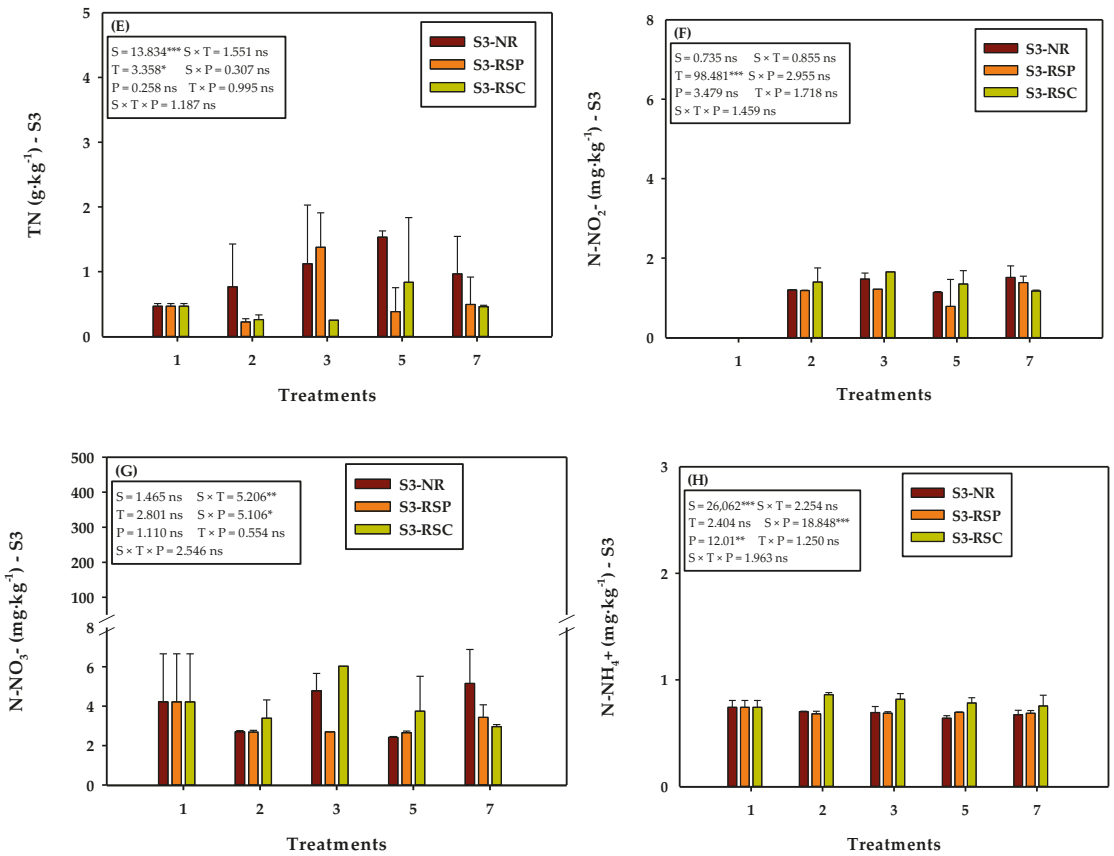


Figure 4. Mean concentration of total TN (**A,E**), N-NO_2^- (**B,F**), N-NO_3^- (**C,G**) and N-NH_4^+ (**D,H**) in the different treatments (1, 2, 3, 5 and 7): 1: control; 2: limestone and biochar; 3: limestone and compost; 5: biochar, limestone and zeolite and 7: limestone, biochar, compost and zeolite. S2: sampling 2; S3: sampling 3. NR: non-rhizosphere soil; RS: rhizosphere soil; P: *P. miliaceum*; C: *C. juncea*. Error bars denote standard deviation ($n = 3$). F values and significance of the two-way repeated measures ANOVA are shown in each graph. S: soil type; T: treatment; P: plant type. Significant at * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ and *** $p < 0.001$; ns: not significant ($p > 0.05$).

The factors of soil type and treatment were significant in explaining the variation in N-NO_3^- in S2 as well as the interaction between the soil type × treatment. Significantly higher values of N-NO_3^- were found in the rhizosphere soil (65 mg·kg^{-1}) than in the non-rhizosphere soil (17 mg·kg^{-1}), which suggested that the ammonium adsorbed in soil or provided by the organic amendments (compost or biochar) was nitrified by micro-organisms, accumulated and available as a nutrient for plant uptake [25]. Differences between the treatments in S2 seemed to be mainly related to the highest N-NO_3^- content in the compost composition (treatments 3 and 7) whereas the treatments with the biochar (treatments 2 and 5) had the lowest N-NO_3^- contents due to the low concentration. The high N-NO_3^- content observed in S2 may have been related to the nitrification processes, which, as mentioned above in the case of N-NO_2^-, was largely provided by the amendment (in this case, compost). Nitrifying bacteria may also have been acting, which transforms the ammonium in the soil into nitrites and nitrates, offering one of the main nutrients to the plant [26].

The factors of soil type and treatment were not significant in explaining the variation in N-NO_3^- in S3. Only the interactions of the soil type × treatment and the soil type x plant type were significant. We observed mean values (for all treatments and the two plant species including the control) of 4 mg·kg^{-1} of N-NO_3^- in all treatments in S3. The decrease of N-NO_3^- in S3 could be associated with the plant absorption and the release of N2 by denitrification processes. The

existence of these variations over time (S2–S3) in the amended soils implied the release of nutrients that facilitated the implantation of the sown species as well as the colonization of spontaneous species in the rainy season where opportunistic species of the first ecological succession were growing.

The mineralization of organic matter may lead to the formation of NH_4^+ in the soil from organic N. The factors of soil type and plant type were significant in explaining the variation in N-NH_4^+ in addition to the interactions between the soil type × plant type both in S2 and S3. We observed mean values (for all treatments and the two plant species including the control) of 0.85 mg·kg^{-1} of N-NH_4^+ for the rhizosphere soil and 0.65 mg·kg^{-1} for the non-rhizosphere soil in S2 and S3 (Figures 4D,H). In addition, it was observed that the rhizosphere soil of *C. juncea* showed significantly higher concentrations of N-NH_4^+ than the rhizosphere soil of *P. miliaceum* or the non-rhizosphere soil, which was noticeable in all treatments except in treatment 1 (control), as expected. This difference between the plant species may be due to the action of *C. juncea* as a nitrogen-fixing species (legume) that is able to supply nitrogen-based nutrients to the soil, which has a significant importance in the soil biological cycle [16]. This is even more important in Technosol created from tailings with very low fertility because the supply of nutrients depends on the type of materials used in the mixture, which may be exhausted with time. Thus, the presence of legumes should be highly encouraged to foster the maintenance of an adequate N level in the soil so the ecosystem can be self-sustaining [27,26].

The TN and the different inorganic fractions studied showed a slight decrease in their levels from S2 to S3, together with a homogenization of the S3 contents for all the treatments. It indicated that stabilization was achieved in the plots and, therefore, more stable concentrations of TN and inorganic fractions were obtained that could facilitate and guarantee the viability of the formation processes in these mining soils.

4. Conclusions

All the created Technosols increased the pH, TOC and TN contents and decreased the EC. NO_2^-, NO_3^- and NH_4^+ were mainly provided by the compost whereas in the biochar, these compounds demonstrated a greater retainment due to its high recalcitrance. For the organic amendments, the compost performed better than the biochar in terms of the total N, NO_2^-, NO_3^- and NH_4^+ whereas for the time evolution, higher values of NO_2^-, NO_3^- and NH_4^+ were observed in the soil sampling when *P. miliaceum* and *C. juncea* were planted or sown in the plots. These nutrients tended to decrease over time, likely due to the growth of the plant species. The best combinations of amendments were -limestone + compost + zeolite- and -limestone + compost + biochar + zeolite-, owing to the presence of compost and zeolite. Thus, compost is preferable to biochar to provide soil fertility and foster plant development in Technosols created with tailings. *P. miliaceum* showed better behavior and adaptation in all treatments than *C. juncea*. Nonetheless, *C. juncea* showed a high content of ammonium in the rhizosphere soil, suggesting biological nitrogen fixation, which may help the soil evolution and development of micro- and macrobiota. The results obtained during the studied period (9 months) suggested the need to provide a labile source of organic matter (in our study, compost) to promote the development of plant species. It is possible that *C. juncea* required better soil conditions or a longer time between the application of the amendments and sowing/planting to ensure its survival. *P. miliaceum* is a good, resistant and robust plant species to effectively reclaim tailings ponds.

The results of this study showed that a combination of organic amendments rich in N with the leguminous *C. juncea* could enhance the concentration and availability of nitrogen compounds for plant uptake, leading to a faster vegetal colonization of the reclaimed ponds in the future. The applied methodology could be implemented in any mining area with tailings presenting similar characteristics and weather conditions.

Monitoring activities are necessary to evaluate the evolution of these parameters over time and to promote the integrated reclamation of mining areas.

5. Acknowledgments

This work was supported by Fundación Séneca (Agency of Science and Technology of the Region of Murcia, Spain) (grant number 20947/PI/18) and the work of the research group, Sustainable Use, Management and Reclamation of Soil and Water.

References

28. Davila, R.B.; Fontes, M.P.F.; Pacheco, A.A.; Ferreira, M. Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil. *Sci. Total Environ*. **2020**, *709*, 136151. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136151.
29. Parraga-Aguado, I.; González-Alcaraz, M.N.; Schulin, R.; Conesa, H.M. El uso potencial de Piptatherum miliaceum para la fitoterapia de relaves mineros en áreas semiáridas: Papel de la fertilidad del suelo y la competencia de las plantas. *Rev. Ambient. Ambient.* **2015**, *158*, 74–84.
30. Kabas, S.; Faz, A.; Acosta, J.A.; Zornoza, R.; Martínez-Martínez, S.; Carmona, D.M.; Bech, J. Efecto de los desechos de mármol y lodo de cerdo sobre el crecimiento de la vegetación nativa y la movilidad de metales pesados en un estanque de relaves de una mina. *Rev. De Explor. Geoquímica* **2012**, *123*, 69–76.
31. Carrillo-González, R. Fitorremediación asistida con enmiendas y fitoestabilización de elementos potencialmente tóxicos. *Agro Product.* **2017**, *10*, 4.
32. Moreno-Barriga, F.; Faz, Á.; Acosta, J.A.; Soriano-Disla, M.; Martínez-Martínez, S.; Zornoza, R. Uso de Piptatherum miliaceum para el fitomando de tecnosoles modificados con biocarbón derivados de relaves piríticos para mejorar la agregación del suelo y reducir la movilidad de los metales (loides). *Geoderma* **2017**, *307*, 159–171.
33. Hossner, L.R. and Hons, F.M. Reclamation of mine tailings. En: R. Lal, B.A. Stewart (eds.), Soil Restoration. Advances in Soil Science, Volume 17. Springer-Verlag, New York, **1992**, pp. 311–350.
34. Fagorzi, C.; Checcucci, A.; DiCenzo, G.C.; Debiec-Andrzejewska, K.; Dziewit, L.; Pini, F.; Mengoni, A. Aprovechamiento de los rizobios para mejorar la fitorremediación de metales pesados por las legumbres. *Genes* **2018**, *9*, 542. https://doi.org/10.3390/genes9110542.
35. Chapin, F.S., III; Shaver, G.R.; Kedrowski, R.A. Controles ambientales sobre las fracciones de carbono, nitrógeno y fósforo en Eriophorum vaginatum en la tundra de matas de Alaska. *La Rev. Ecol.* **1986**, *74*, 167–195.
36. Robles, A.B.; Allegretti, L.I.; Passera, C.B. Coronilla juncea es un arbusto forrajero nutritivo y útil en la rehabilitación de tierras agrícolas marginales mediterráneas abandonadas. *Rev. Entornos Áridos* **2002**, *50*, 381–392.
37. Peech, M. Actividad de Iones de Hidrógeno. In *Métodos de Análisis de Suelos: Parte 2 Propiedades Químicas y Microbiológicas*; American Society of Agronomy: New York, NY, USA, 1965; Volume 9, pp. 914–926.
38. Cobertera, E. *Edafología Aplicada. Suelos, Producción Agraria, Planificación territorial e Impactos Ambientales*; Gráficas Rógar, S.A.: Madrid, Spain, 1993; 326p.
39. Ramírez-García, J.; Almendros, P.; Quemada, M. Ground cover and leaf area index relationship in a grass, legume and crucifer crop. *Plant Soil Environ.* **2012**, *58*, 385–390.
40. Ramírez-García, J.; Gabriel, J.L.; Alonso-Ayuso, M.; Quemada, M., 2015. Quantitative characterization of five cover crop species. *Rev. Cienc. Agrícolas* **2015**, *153*, 1174–1185.
41. Valero, C.; Yazmin, T. Desnitrificación del Suelo Bajo dos Tratamientos de Riego para Estimar el Rendimiento y Emisión de Metano en Arroz; Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria La Molina: Lima, Peru, 2020.
42. Cabrera, O.G.; Vermoesen, A.; Van Cleemput, O.; Cabriales, J.P. Efecto del tipo de suelo, humedad y fuente de nitrógeno en las emisiones de N2 y N2O. *Terra Latinoam.* **2000**, *18*, 1–9.
43. Dinna, D. V. Revisión bibliográfica del uso de leguminosas como abono verde en la recuperación biológica del suelo Bachelor's tesis, Universidad de Guadalajara, Jalisco, Ciudad de México, **1997**. Available online: Repositorio.cucba.udg.mx (accessed on 10 February 2021)
44. Román, P.; Martínez, M.; Pantoja, A. Manual de compostaje del agricultor. Santiago de Chile (Chile). 2013. Available online: http://www.fao.org/docrep/019/i3388s/i3388s.pdf (accessed on 16 November 2021).
45. Díaz, L.; Laguna, H.; Gutiérrez, Y.; Melo, A.; Vega, A. Tratamiento de suelos mineros mediante compostaje con Biochar, estiércol ovino y residuos orgánicos domiciliarios. *Rev. Medio Ambiente Min.* **2020**, *5*, 11–18.

46. Rodríguez Valdivia, M. *Evaluacion de la Capacidad de Adsorción de Nh4+ y Metales Pesados Pb2+, Cd2+, Cu2+, Zn2+ y Mn2+ Empleando Zeolitas Naturales y Sintéticas*; UNAS: Arequipa, Peru, 2017
47. Bochet, E.; García-Palacios, P.; Peco, B.; Tormo, J.; García-Fayos, P. Procesos Ecológicos y Restauración de la Cubierta Vegetal. In *Restauración Ecológica de Áreas Afectadas por Infraestructuras de Transporte: Bases Científicas para Soluciones Técnicas*; Fundación Biodiversidad: Madrid, Spain, 2011; pp. 101–141.
48. Vázquez, M.; Poschenrieder, C.; Barcelo, J. Pulvinus structure and leaf abscission in cadmium-treated bean plants (Phaseolus vulgaris). *Can. J. Bot.* **1989**, *67*, 2756–2764. https://doi.org/10.1139/b89-355.
49. Barceló, J.; Poschenrieder, C. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Suelo Planta* **1992**, *2*, 345–361.
50. Vilagrosa, A.; Caturla, R.N.; Hernández, N.; Cortina, J.; Bellot, J.; Vallejo, V.R. Reforestación en ambiente semiárido del sureste peninsular. Resultados de las investigaciones desarrolladas para optimizar la supervivencia y el crecimiento de especies autóctonas. In Montes para la sociedad del nuevo milenio. III Congreso Forestal Español. *Junta Andal. Cons. Medio Ambiente* **2001**, *4*, 5.
51. García-Gil, J.C.; Plaza, C.; Senesi, N.; Brunetti, G.; Polo, A.A. Efectos de la enmienda de lodos de depuradora sobre los ácidos húmicos y las propiedades microbiológicas de un suelo mediterráneo semiárido. *Biol. Fertil. Suelos* **2004**, *39*, 320–328.
52. Rincón, L.E.C.; Gutiérrez, F.A.A. Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Rev. Colomb. De Biotecnol.* **2012**, *14*, 285–295.
53. Klotz, M.G.; Stain, L.Y. Nitrifier genomics and evolution of the nitrogen cycle. *FEMS Microbiol. Lett.* **2008**, *278*, 146–156.
54. Noguez-Inesta, A.; López-Sánchez, A.S.; Carrillo-González, R.; González-Chávez, M.C.A. Uso de leguminosas (Fabaceae) en fitorremediación. *Agroproductividad* **2017**, *10*, 4.
55. Paredes Campos, P.D.S.; Rodríguez Rojas, J.J. Especies Vegetales en la Fitorremediación de Suelos Contaminados por Metales Pesados. Bachelor's tesis, Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú, 2020. Available online: Repositorio.ucv.edu.pe (accessed on 14 March 2021).



An evaluation of sustainability in wineries based on their performance in compliance with food safety.

Jesús López-Santiago[1]*, María Teresa Gómez-Villarino[1], Ana Isabel García García[1] and Amelia Md Som[2]

[1] Agroforestry Engineering Department, School of Agricultural, Food and Biosystems Engineering, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain; jesus.lopez.santiago@upm.es; ai.garcia@upm.es; teresa.gomez.villarino@upm.es

[2] Green Chemistry & Sustainable Technology Cluster, Universiti Kuala Lumpur, Malaysian Institute Chemical & Bioengineering Technology, Alor Gajah, 78000, Malacca, Malaysia; ameliamds@unikl.edu.my

* **Correspondence: jesus.lopez.santiago@upm.es; Tel.: +34-913-365-837**

Abstract:

Agri-food industry is confronted with a significant challenge concerning the requirement for sustainable food production methodologies. Companies within the agrifood sector encounter both challenges and prospects, such as the integration of responsible agricultural practices, mitigation of environmental impact, and enhancement of working conditions. This research pertains to the employment of metrics as a means of assessing sustainable practices, specifically in reference to food safety performance indicators. Wine production is employed as a dual case study to assess the efficacy of wineries in managing critical control points (CCPs). The first aspect focuses on CCP system, as a component of a food safety system based on pre-requisite programs (PPRs) and hazard analysis and critical control points (HACCP). The second aspect specifically addresses the performance in the risk of contamination by arsenic, cadmium, and lead CCP during wine production. The first study showed that wineries have poor control performance for 15 out of the 37 CCPs evaluated, and the worst control performance seems to be related to chemical controls of trace metals, fungicides, and pesticides in grapes or wine, biological controls of microorganisms on equipment, and controls in the operational stage. The second investigation analyzed the performance of wineries in controlling the CCP related to the risk of contamination by arsenic, cadmium, and lead during wine production. The results showed that wineries are failing in the areas of analysis and legislation. Using performance indicators of training, legislation, and physical-chemical analysis can serve as a qualitative measure of progress in implementing food safety systems in wineries.

Palabras clave: beverages; HACCP; food safety; wine; sustainable production

1. Introduction

Currently, it is observed that agricultural and food production is not being carried out sustainably [1]. According to the European Commission, food production continues to have a negative impact on the environment of the European Union (EU), while 20% of produced food is wasted. Although agriculture in the EU has made significant progress in reducing greenhouse gas emissions and nitrate levels in rivers since 1990, there is still much to be done throughout the entire food chain [2]. Therefore, it is necessary to propose a new framework for food production and processing at the industrial level, in line with sustainability principles.

It is essential to develop food production methods that are compatible with the conservation of the environment. In other words, it is imperative to implement agro-industrial production methods that minimize the impact on ecosystems and natural resources, while ensuring food safety and healthy nutrition for consumers [3].

Sustainability in the agri-food industry is still in its early stages. Numerous studies have provided perspectives on the challenges and opportunities faced by companies in the agri-food sector. However, due to the growing complexity of this field, it is necessary to develop more systematic approaches that include sustainability [4]. It is imperative to implement responsible agricultural practices, reduce environmental impact, and improve working conditions. These measures can contribute to the conservation of natural resources, improve the quality of the final product, and promote the economic development of local communities.

Often, the approaches used in the agri-food industry do not simultaneously achieve these objectives, which can generate negative effects such as lack of food safety or serious environmental impacts. Food or ecosystem contamination, food poisoning derived from deficient agro-industrial practices, the use of chemicals in agro-industrial production processes, are some examples of this reality.

Gold et al. [5] specified the dimension of sustainability through indicators such as local living conditions, labor rights, land rights, food security, valorization through biomass recycling, and environmental issues. In this context, food security is a useful indicator within the sustainability dimension to analyze the sustainability performance of the agri-food supply chain.

Wine production is an integral part of the food chain and is closely related to the sustainability of the food chain. Wine production involves the cultivation of grapes, the transformation of grapes into wine, and the distribution and commercialization of the final product [6]. It is a fact that wine production presents risks to food safety. Wineries have implemented food safety management systems to control food risks through Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP). The wine industry applies HACCP by evaluating Critical Control Points (CCP). A Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) system allows identifying, assessing, and controlling significant food safety risks throughout the entire wine production process.

2. Materials and methods

A first investigation analyzed the Prerequisite Programs (PPRs) and the performance of HACCP in the wineries with Protected Designation of Origin "Vinos de Madrid". The performance of wineries was evaluated for each critical control point (CCP) at each stage of the wine production process, including the implementation of PPR and HACCP principles. This study was carried out through a survey of 55 questions divided into 11 sections and was conducted on a sample of 21 wineries.

A second investigation selected one of the CCPs identified as poorly controlled. This CCP is the risk of contamination by arsenic, cadmium, and lead during wine production. The level of performance of wineries in controlling CCPs related to the risk of contamination by arsenic, cadmium, and lead in wine production was analyzed through a sixteen-question questionnaire that was administered to a sample of 32 wineries from all the Protected Designations of Origin in Spain. Subsequently, three indicators were calculated for the performance components of training, legislation, and analysis in controlling this CCP.

3. Results and discussion

The results of the first investigation determined that performance control for each of the 37 evaluated CCPs during wine production is different (see **Table 1**). A total of 22 CCPs are well-

evaluated by wineries. However, there are significant differences among the other 15 CCPs depending on each winery. The worst control performance among wineries for CCPs seems to be related to chemical controls of trace metals, fungicides, and pesticides in grapes or wine, biological controls of microorganisms on equipment, and controls in the operational stage such as remaining time of must in crushers [7].

Table 1. Contingency table of the medians of each variable associated to each evaluated CCP.

	Frequencies						
Winemaking Steps	**Variable/Critical Control Point (CCP)**	**Always (3)**	**Usually (2)**	**Hardly Ever (1)**	**Never (0)**	**High Variability**
1. Harvest and grape transportation	VAR1.1 Grape inspection previous harvest in vineyards.					Y
	VAR1.2 Grape inspection during harvest in vineyards.					
	VAR1.3 Transportation time of harvest from vineyards to winery.					Y
2. Harvest reception in the winery	VAR2.1 Presence of fungicide residues and/or pesticides in grapes.					Y
	VAR2.2 Presence of mycotoxins from grape rot.					
	VAR2.3 Contamination by metals (Cadmium, Lead, Arsenic) in grapes.					Y
	VAR2.4 Contamination by plant residues, dust and/or metal elements.					
3. Pre-hatching treatments	VAR3.1 Vat cleaning to eliminate residues of microorganisms.					
	VAR3.2 No residues of cleaning and disinfection products in vats.					
4. Grapes crushing and must pumping	VAR4.1 Time that remains the must in the crusher after crushing.					Y
	VAR4.2 Cleaning of crushing equipment.					
	VAR4.3 No residues of cleaning and disinfection products in vats.					
5. Sulphited and vatted	VAR5.1 Safety and purity of the additives.					Y
	VAR5.2 No microorganisms in equipment and vats.					
6. Alcoholic fermentation, maceration, vat emptying, pressing, malolactic fermentation	VAR6.1 Concentration of ethylocarbamate in fermented must.					Y
	VAR6.2 Concentration of sulphur dioxide in fermented must.					
	VAR6.3 Purity and safety of yeasts.					Y
	VAR6.4 Temperature during fermentation.					
	VAR6.5 pH of red wine during malolactic fermentation.					
	VAR6.6 Hygiene during vat emptying/pressing operations.					
	VAR6.7 Cleaning of pressing equipment.					Y
7.Racking, clarification, and filtration	VAR7.1 Cleaning procedures for vats and racking equipment.					
	VAR7.2 Maintenance and cleaning of the facilities during racking.					
	VAR7.3 Purity and safety of agents used as clarifiers of the wine.					Y
	VAR7.4 No residues of clarifiers in the wine.					Y
	VAR7.5 No weird elements from filters in the wine.					
	VAR7.6 Hygiene during clarification and filtering operations.					
	VAR7.7 No residues of cleaning and disinfection products in vats.					
8. Cold stabilization	VAR8.1 Limit concentrations of metals (traces of As, Cu, Pb) in the wine.					Y
	VAR8.2 Additives accepted by current food legislation.					
9. Bottling and labelling	VAR9.1 Bottle cleaning procedures.					Y
	VAR9.2 Cleaning procedures of the bottling line.					
	VAR9.3 No microorganisms in the bottling line.					Y
	VAR9.4 No microorganisms in bottle cap.					Y
	VAR9.5 Correct coding of the label used on the bottles.					
	VAR9.6 Correct description of allergen information on bottle labels.					
	VAR9.7 Correct description of P.D.O. information on bottle labels.					

Poorly controlled CCPs assume that hazards such as the appearance of microorganisms, trace metals, fungicides, pesticides, or other hazardous products in grapes or wine can occur [8-10].

The second research showed that wineries are failing in the areas of analysis and legislation of the risk of contamination by arsenic, cadmium, and lead CCP during wine production. The identification and updating of legislation regarding the risk of contamination by As, Cd, and Pb is at an initial performance level for wineries that produce less than 250,000 L/year. The performance level of analysis is even lower than that of legislation. One in three wineries has information on the concentrations of arsenic, cadmium, and lead in the soils of the vineyards where the grapes come from, and this rate is even lower for their concentration available in the soil solution. Wineries that monitor the concentrations of As, Cd, and Pb do so according to official recommendations using techniques based on atomic absorption spectrometry. However, there is a lack of spectrometry equipment in the winery laboratories themselves.

The second research allowed the design of three performance indicators based on the responses obtained from wineries [11, 12]. Wineries were distributed in five groups according to their yearly wine production to calculate them. Performance indicators allow to determine the degree of progress wineries had reached related to the control they conduct on the contamination risk of arsenic, cadmium, and lead in grapes and wines. Components performance level by each winery sizes production level on the contamination risk by arsenic, cadmium, and lead in wines are showed in **Table 2**.

Table 2. Wineries performance indicators and grade of progress, by type of winery.

Wineries size	I_{fswt}	Grade of progress	I_{liu}	Grade of progress	$I_{ccp-Mchem}$	Grade of progress
Up to 25,000 L/year	0,89	Maturity	0,44	In progress	0,05	Start
25,001-100,000 L/year	0,77	Maturity	0,15	Start	0,08	Start
100,001-250,000 L/year	0,78	Maturity	0,28	Start	0,51	In progress
250,001-1,000,000 L/year	0,94	Maturity	0,66	In progress	0,56	In progress
More than 500,000 L/year	0,93	Maturity	0,60	In progress	0,42	In progress

4. Conclusions

This work demonstrates the need to continue improving in the technical implementation of the HACCP methodology and in training workers about food safety in wineries. Establishment of new CCPs surveillance formats involving the different professionals working in the wineries (enologist, manager, winery operators, quality managers) will improve performance in the CCPs surveillance, and by extension, the deployment level of the entire HACCP. A good implementation of PPR and HACCP contributes to eliminating food safety risks that compromise people's health, being the basis for the development of sustainability based on the food safety indicator.

Also, wineries must adequately control the risk of arsenic, cadmium, and lead contamination in the wine production process. To do it, first, wineries must be aware of the need to know, update and implement European legislation. European legislation sets the guidelines to prevent health risks that may arise from the intake of arsenic, cadmium, or lead by setting limits on the admissible concentration of these metals in wines. In addition, wineries´

workers´ training in GMP and CCPs control is a success factor in preventing contamination by arsenic, cadmium, and lead in wines.

Moreover, the performance indicators of training, legislation, and physical-chemical analysis performance, developed through the analysis of the implementation of the CCP, serve as a qualitative measure of the progress in the three performance dimensions related to the implementation of food safety systems. This approach can be extended to all CCP system in wine production, thus becoming a qualitative method for evaluating the sustainability of wineries.

References

1. McGreevy, S. R.; Rupprecht, C. D. D.; Niles, D.; Wiek, A.; Carolan, M.; Kallis, G.; Kantamaturapoj, K.; Mangnus, A.; Jehlička, P.; Taherzadeh, O.; Sahakian, M.; Chabay, I.; Colby, A.; Vivero-Pol, J.; Chaudhuri, R.; Spiegelberg, M.; Kobayashi, M.; Balázs, B.; Tsuchiya, K.; Nicholls, C.; Tanaka, K.; Vervoort, J.; Akitsu, M.; Mallee, H.; Ota, K.; Shinkai, R.; Khadse, A.; Tamura, N.; Abe, K.; Altieri, M.; Sato, Y.; Tachikawa, M. Sustainable agrifood systems for a post-growth world. *Nature sustainability* **2022**.

2. European Commission Documento de Reflexión hacia una Europa Sostenible en 2030. **2019**.

3. Dobermann, D.; Swift, J. A.; Field, L. M. Opportunities and hurdles of edible insects for food and feed. *Nutr Bull* **2013**, *42*, 293.

4. Barth, H.; Ulvenblad, P.; Ulvenblad, P. Towards a conceptual framework of sustainable business model innovation in the agri-food sector: a systematic literature review. *Sustainability* **2017**, *9*, 1620.

5. Gold, S.; Kunz, N.; Reiner, G. Sustainable Global Agrifood Supply Chains: Exploring the Barriers. *Journal of industrial ecology* **2017**, *21*, 249-260.

6. Robertson, G. L. *Food packaging: principles and practice. Chapter 20. ;* CRC press: Boca Raton (USA), 2006; .

7. López-Santiago, J.; García, A. I. G.; Gómez-Villarino, M. T. An Evaluation of Food Safety Performance in Wineries. *Foods* **2022**, *11*.

8. Christaki, T.; Tzia, C. Quality and safety assurance in winemaking. *Food Control* **2002**, *13*, 503-517.

9. Martinez-Rodriguez, A. J.; Carrascosa, A. V. HACCP to control microbial safety hazards during winemaking: Ochratoxin A. *Food Control* **2009**, *20*, 469-475.

10. Magan, N. Mycotoxin contamination of food in Europe: Early detection and prevention strategies. *Mycopathologia* **2006**, *162*, 245-253.

11. Cloquell-Ballester, V.; Monterde-Díaz, R.; Cloquell-Ballester, V.; Torres-Sibille, A. d. C. Environmental education for small- and medium-sized enterprises: Methodology and e-learning experience in the Valencian region. *Journal of environmental management* **2008**, *87*, 507-520.

12. Campos, L. M. S.; de Melo Heizen, Daiane Aparecida; Verdinelli, M. A.; Cauchick Miguel, P. A. Environmental performance indicators: a study on ISO 14001 certified companies. *Journal of cleaner production* **2015**, *99*, 286-296.



La gran oportunidad para una nueva economía social sostenible en la España vacía tras la COVID-19

Natividad Buceta Albillos[1]; Esperanza Ayuga-Téllez[2]

[1] Universidad Politécnica de Madrid; natividad.buceta.albillos@upm.es
[2] EIPIRMA, Universidad Politécnica de Madrid; esperanza.ayuga@upm.es

Resumen: El atractivo que están suponiendo para la población los municipios rurales, como consecuencia de la pandemia por la COVID-19, puede ser la oportunidad para la revitalización de la España Vacía y el desarrollo de nuevos modelos de negocio sostenibles en un entorno más saludable, aprovechando las ventajas competitivas de la digitalización y los beneficios que aporta el contacto con la naturaleza. Tres meses de confinamiento por la pandemia actual han sido suficientes para sentir la necesidad de los espacios naturales, acelerar el proceso de digitalización e incrementar el atractivo del medio rural. Percibir la realidad con los nuevos desafíos, poniendo en valor a la naturaleza y la inteligencia creativa, abrirá un nuevo océano de oportunidades, y podrá suponer una mejora de calidad de vida y de bienestar, fijando así a la población rural.

Palabras clave: naturaleza, despoblación, digitalización, rural, bienestar

THE GREAT OPPORTUNITY FOR A NEW SUSTAINABLE SOCIAL ECONOMY IN EMPTY SPAIN AFTER COVID-19

Abstract: The attractiveness the rural municipalities are assuming for the population, because of the COVID-19 pandemic, will be the opportunity for the revitalization of empty Spain and the development of new sustainable business models in a healthier environment, taking advantage of competitive factors of digitization and the benefits of connection with nature. Three months of confinement due to the current pandemic have been enough to feel the need for natural spaces, accelerate the digitization process and increase the attractiveness of rural area. Perceive reality with new challenges, highlighting nature and the creative intelligence, will open up a new ocean of opportunities, and may lead to an improvement in the quality of life and well-being, thus establishing the rural population.

Keywords: nature, depopulation, digitization, rural, well-being

1. Introducción

Durante los últimos años, la urbanización es la tendencia, para el 2050 el 70 % de la población mundial vivirá en ciudades [1]. En España ya en el 2017 el 80% de la población vivía en zonas urbanas con importantes desequilibrios territoriales [2]. La España despoblada es hoy una realidad, un problema que se inicia en los años cincuenta con el éxodo rural. Hoy casi un 50% de municipios se encuentra en riesgo de despoblación, con una población de menos de 12,5 habitantes por km^2 [3]. Poblaciones en las que el contacto con la naturaleza y la ausencia de contaminación permitirían llevar una vida más saludable. Su reactivación pasaría por potenciar sus actividades tradicionales junto con el turismo y el ocio, y fomentar espacios en los que poder desplegar una economía digital, verde y circular [4].

El estudio realizado es una mirada en positivo al momento actual ante la crisis económica y social producida por la pandemia de la COVID-19, con el objetivo de demostrar, en la investigación realizada, la oportunidad para el desarrollo de una economía social sostenible en la España Vacía, en concreto se quiere verificar las siguientes hipótesis:

A. *Las zonas urbanas de mayor densidad de población son las más afectadas por la COVID-19*
B. *El efecto beneficioso de estar en contacto con la naturaleza*
C. *Las ventajas de la digitalización para la repoblación de la España Vacía*
D. *El potencial de la economía social para generar empleo y revitalizar las zonas rurales.*

2. Materiales y métodos

La metodología aplicada para esta investigación se ha basado en una búsqueda y análisis de la literatura existente relacionada con el objetivo a trabajar, y a la selección de indicadores socioeconómicos y medioambientales de fuentes oficiales, que apoyadas en estadística descriptiva básica ayuden a demostrar las hipótesis del trabajo.

Se han empleado buscadores de internet como Bing y Google para localizar la información y noticias relativas a la investigación, con las siguientes palabras clave: afectados Covid-19, bienestar, biodiversidad, calidad de vida, contaminación, densidad de población, despoblación, digitalización, economía social, empleo, España Vacía, formación online, natural, naturaleza, oportunidad, pandemias, patrimonio, rural, salud, sostenibilidad, telemedicina, teletrabajo, territorio, urbanización.

Se ha utilizado la información sobre el total del territorio español proporcionada a través de las webs del Anuario Estadística Forestal (www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas), Confederación Empresarial Española de la Economía Social – CEPES (www.cepes.es), Dir. Gral. Salud Pública – DGSP (www.sanidad.gob.es/areas/alertasEmergenciasSanitarias), Epdata - Agencia Europa Press – AEP (www.epdata.es), Instituto Nacional de Estadística – INE (www.ine.es), Ministerio de Transición Ecológica (www.miteco.gob.es) , Observatorio Nacional de las Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información – ONTSI (www.ontsi.es), y Ranstad (www.randstad.es).

La metodología empleada ha sido el análisis de la información por comunidades autónomas contenida en los datos e indicadores considerados.

Se han obtenido diagramas y modelos de regresión, utilizando MS Excel database (2010), para describir los datos y sus relaciones.

3. Resultados y discusión

Los resultados y discusión se muestran agrupados según cada una de las afirmaciones que se intentan comprobar, y se genera un listado de oportunidades identificadas a partir de los resultados anteriores.

Se recogerá a continuación para cada una de las cuatro afirmaciones establecidas la bibliografía relacionada, y los indicadores socioeconómicos y medioambientales identificados. Se realiza, asimismo, un análisis y discusión de los datos en base a intentar demostrar cada una de las afirmaciones.

3.1. Hipótesis A.- Las zonas urbanas de mayor densidad de población son las más afectadas por la COVID-19.

Si se analizan los datos de la pandemia por COVID-19 de marzo a mayo del 2020 (Figura 1), se encuentra que las poblaciones más afectadas coinciden con aquellas que tienen una mayor densidad de población y con un índice de interconexión nacional e internacional alto por su tráfico, movilidad y transporte [5]. Cada persona es un vector de contagio en una gran ciudad.

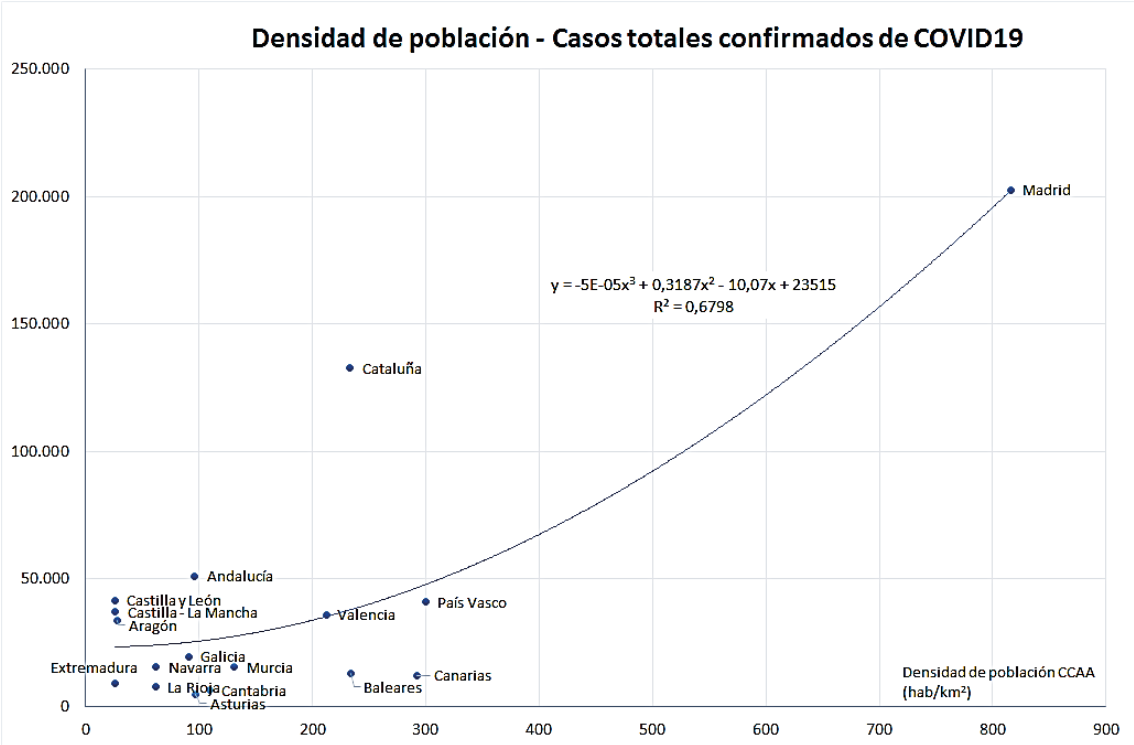


Figura 1. Relación densidad de población - casos COVID-19. Fuentes: Elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística 2018 y Dir. Gral. Salud Pública [6].

En el gráfico de la Figura 1, se relaciona mediante regresión polinómica de grado 3 la densidad de población (hab/km²) con los casos totales confirmados de COVID-19 con PCR hasta 10 de mayo del 2020, y por PCR e IgM solo si la sintomatología es compatible. Se obtuvo un R^2 de 0,68. No se incluye Ceuta y Melilla en el análisis. En la regresión realizada escaparía Cataluña, que por su densidad de población le correspondería, según el modelo de la gráfica, un número de casos próximo a los 40.000 muy por debajo de la cifra real. Es clara la relación que tiene la pandemia con la densidad de población. Si bien, se observa que para el intervalo de 0 a 300 hab/km² los casos de COVID no parecen depender de la densidad de población. Canarias sería la región más favorable al distanciarse del modelo con menos casos reales que los estimados en la regresión. Madrid es un claro punto influyente que condiciona el resultado, pues de 300 a 800 hab/km² no hay dato alguno.

El confinamiento ha mostrado la cara más dura en las ciudades y la más llevadera en las pequeñas poblaciones.

3.2. Hipótesis B.- El efecto beneficioso de estar en contacto con la naturaleza

Tres meses de confinamiento por la COVID19 han sido suficientes para sentir la necesidad de estar en contacto con la naturaleza. Son diversos los estudios que demuestran cómo las personas que viven próximas a entornos naturales y biodiversos tienen una microbiota más rica y menos predisposición a desarrollar alergias. Fortalecen el sistema inmunológico, disminuyen la presión arterial y el ritmo cardíaco, generan un mayor control cognitivo, disminuye la angustia mental y mejora el bienestar general [7]. Por contra, la falta de espacios verdes repercute tanto en

el bienestar físico como psicológico [8]. Un enfoque cada día más internacional impulsa los beneficios preventivos y curativos que los espacios abiertos naturales aportan a la salud y el bienestar, y que a su vez conservan la biodiversidad [9].

La pandemia ha puesto en valor al medio natural ofreciendo la oportunidad de vivir en municipios rurales mejorando así la calidad de vida [10,11]. De hecho, en el año 2020, los municipios rurales de menos de 10.000 habitantes son los únicos que han recibido más población respecto a la media de los últimos cinco años, según noticias de los medios [12]. La Estadística de variaciones residenciales del INE, pone de manifiesto cómo el 28% de las mudanzas en 2020 eran a municipios pequeños, 6 puntos porcentuales más que los años anteriores [13].

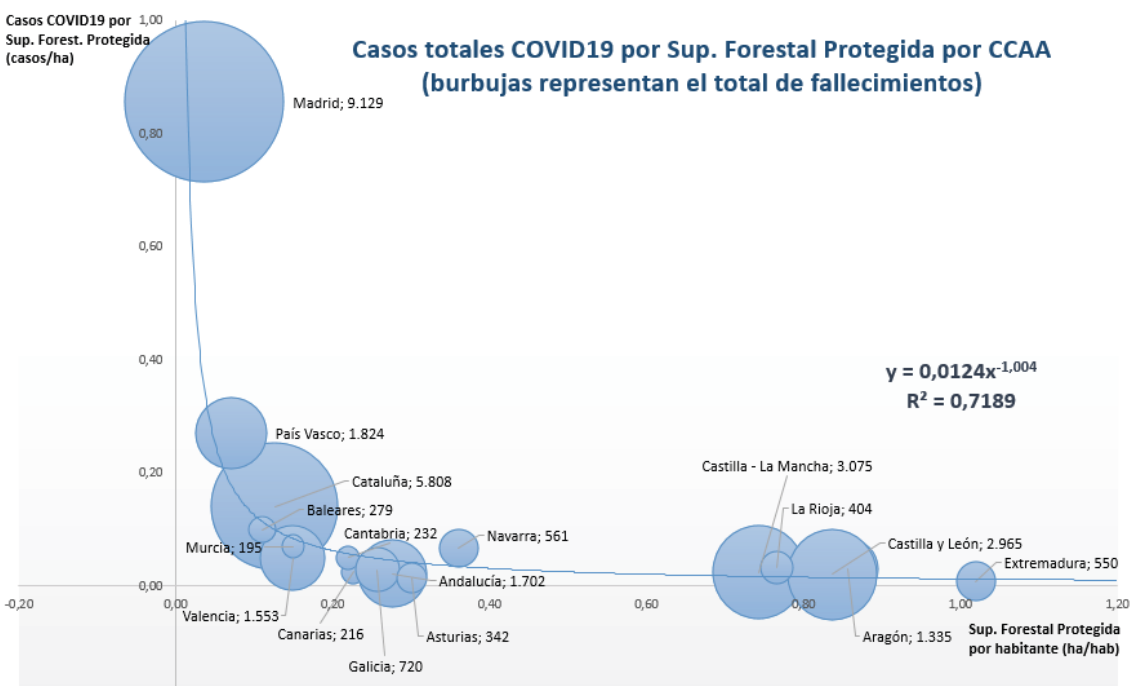


Figura 2. Relación superficie forestal protegida – casos totales covid-19 y fallecimientos por CCAA. Fuentes: Elaboración propia con datos del Anuario Estadística Forestal 2016 [14] y DGSP 22.9.2020 [6].

En la Figura 2 se relaciona mediante regresión potencial la superficie forestal protegida (Red Natura 2000, Espacios Naturales Protegidos y otros) por habitante en cada CCAA, con los casos totales confirmados de COVID-19 por superficie forestal protegida. Los casos de COVID-19 se confirmaron con PCR hasta 10 de mayo del 2020, y por PCR e IgM si la sintomatología es compatible. Se obtiene un R^2 de 0,72. No se incluye Ceuta y Melilla en el análisis. El tamaño de las burbujas corresponde a los fallecidos por COVID-19 desde el inicio de la pandemia hasta mayo 2020. El gráfico puede explicar la defensa que representa la superficie forestal protegida por habitante frente al contagio por COVID-19.

3.3. Hipótesis C.- Las ventajas de la digitalización para la repoblación de la España Vacía.

La pandemia ha impulsado los cambios de residencia gracias a la digitalización, el teletrabajo y el comercio electrónico [15]. Así, el volumen de compras online en supermercados y de electrodomésticos se ha doblado con relación al segundo trimestre del año pasado [16], ante la falta de movilidad de los españoles en el confinamiento, según estimaciones del sector. El teletrabajo, que apenas estaba extendido en las empresas, ha sido una medida que por necesidad

ha adoptado el tejido empresarial. El número de personas que teletrabajan en España de forma habitual se ha visto triplicado con relación al 2019, según datos de Ranstad, INE y Epdata [17].

Una tercera parte de las empresas que han adoptado el teletrabajo durante la pandemia lo mantendrán a futuro, y una quinta parte de las empresas mantendrán el comercio electrónico, según la encuesta realizada por el INE 2020 [18].

De la misma forma, colegios, academias, universidades, escuelas de negocio, etc., el sector académico en su conjunto ha adaptado en escaso tiempo sus programas a la formación online, habiendo crecido en España un 28 % durante el confinamiento y con más de 1.200 millones de alumnos que ya confían en la formación online [19] , que han podido comprobar en estos meses que se puede digitalizar la formación, con sus más y sus menos. Así, se puede ofrecer a emprendedores, agricultores y trabajadores de la economía rural la formación y la educación adecuadas en el momento preciso, lo cual les ayudará a profesionalizarse aprovechando las oportunidades de las nuevas tecnologías digitales. Para ello, es clave el disponer de una infraestructura digital de alta velocidad en las zonas rurales, si bien la mitad de las zonas rurales de España carecen de cobertura de red ultrarrápida, más de 100 mbps [20].

La puesta a disposición de los profesionales de la salud en el medio rural de las más modernas tecnologías, en concreto de la telemedicina, puede ser claramente la revolución que se estaba esperando en el sector, más cercana, accesible y centrada en las personas. La digitalización puede así acercar los servicios a las personas con una reducción considerable de los costes y una importante repercusión en el medio rural [21].

El acceso seguro y rápido a internet a través de banda ancha es fundamental para conectar los pueblos y aumentar su atractivo, favoreciendo el acceso de sus habitantes a los servicios de telecomunicaciones, al comercio electrónico, la administración electrónica, la formación a distancia, el teletrabajo y la telemedicina [10].

En la Declaración de Bled de 2018, la UE se centra en asegurar un futuro inteligente de las áreas rurales de la UE en base al desarrollo de una economía digital rural innovadora, integrada e inclusiva, con que hacer frente al actual despoblamiento de las zonas rurales [22].

3.4. Hipótesis D.- El potencial de la economía social para generar empleo y revitalizar las zonas rurales

El impacto total de los valores de las empresas de economía social sobre la economía española se valora en más de 6.200 millones de euros anuales [23], de los cuales un 79,9% está asociado a la ocupación de colectivos desfavorecidos, y un 19,8% a una mayor estabilidad del empleo. La Economía Social emplea en España a más de dos millones de personas entre empleos directos e indirectos. En el medio rural destacan las cooperativas y sociedades agrarias, entidades asociativas con contenido económico, en su mayoría micropymes, que representan el 13 % de la industria agroalimentaria y un 21 % de su empleo [24]. Las cooperativas sociales y otras entidades voluntarias trabajan en la asistencia sociosanitaria y en los servicios culturales y educativos tan necesarios en la España Vacía; además es fuente de nuevas ocupaciones y favorece el acceso al empleo a los grupos más desfavorecidos [25]. Según datos de CEPES [26], el 7% de las empresas y entidades rurales forman parte de la economía social y emplean a más del 5% del empleo rural. Un dato significativo, un 26% de las personas con discapacidad están trabajando en la economía social rural.

La Economía Social representa un modelo alternativo de crecimiento que busca el equilibrio entre la eficiencia económica, la resiliencia social y ambiental, que ha demostrado ser más estable en tiempos de crisis, así los recortes de empleo en la crisis de 2008-2012 en Europa han sido más moderados en la economía social que en las empresas privadas, supone así una función claramente anticíclica [25,26]. La economía social tiene un gran potencial para reactivar las zonas rurales abandonadas y corregir los desequilibrios territoriales [27,28]. La Economía Social despliega la cultura emprendedora y el tejido empresarial en una espiral de desarrollo local

movilizando a los actores conocedores de su entorno, aprovechando los recursos locales necesarios y poniendo en valor el patrimonio cultural y natural [4].

La Economía Social puede aportar a la España Vacía desarrollo económico sostenible, fuente de creación de empleo estable y un mejor aprovechamiento de sus recursos, servicios sociales y educativos, asegurando así la población en la zona [26,29]. Además, la Economía Social genera crecimiento en la dimensión cultural del desarrollo territorial integral al promover una escala de valores compartidos y un fuerte arraigo local basado en la identidad cultural que identifica a un territorio y que posee un conjunto de valores únicos [30].

4. Conclusiones

La situación debida a la pandemia por la COVID-19 brinda la oportunidad de reconstruir la España Vacía. La pandemia ha azotado a las ciudades con mayor densidad de población y ha puesto en valor los espacios abiertos y los entornos naturales. Una nueva forma de percibir el entorno, donde la gran urbe se asocia ahora a mayores riesgos de contaminación y contagios. En los pequeños pueblos las personas se sienten más saludables al estar en contacto con la naturaleza. Los entornos naturales de alta biodiversidad, contribuyen al bienestar integral de las personas y a protegerlas del contagio de virus cómo el SARS-CoV2.

El desarrollo del teletrabajo y el comercio electrónico durante los meses de confinamiento ha acelerado el proceso de digitalización, motivando a la población a mudarse de la gran ciudad a pueblos más pequeños donde vivir y trabajar con un menor riesgo de contagio y mejor calidad de vida. Si bien, la brecha digital es aún la gran barrera para la conectividad rural plena y el desarrollo de los servicios digitales.

La Economía Social ha demostrado en crisis anteriores ser más estable. Su valor intrínseco tiene un gran potencial para desarrollar nuevos empleos asociados a la nueva economía: Industrias creativas, Digitalización, Economía Verde, Industria 4.0, Consumo responsable, productos sostenibles, km 0, Transición justa baja en carbono, electrificación, autoconsumo, economía circular, etc., integrando el crecimiento económico con el respeto a la naturaleza y el desarrollo social.

Es hora de enriquecer el territorio con nuevas iniciativas, ser creativos y diseñar la España rural con la inteligencia digital del siglo XXI.

Referencias

56. Figueras ONU, Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. Naciones Unidas. Noticias, 16 de mayo 2018.
57. FEMP, Revista de la Federación Española de Municipios y Provincias. Carta local, 2017, revista nº 303
58. MPTFP, Ministerio de Política Territorial y Función Pública, 2019. Directrices Generales de la Estrategia Nacional frente al Reto Demográfico. www.mptfp.gob.es/dam/es/portal/reto_demografico/Estrategia_Nacional/directrices_generales_estrategia.pdf.pdf
59. CES, Informe sobre un medio rural vivo y sostenible. Consejo Económico y Social de España. 2021.
60. GTM, Informe del GTM sobre Atmosfera y Covid-19. Grupo de Trabajo Multidisciplinar que asesora al Ministerio de Ciencia e Innovación en relación al Covid-19 y sus consecuencias. 2021.
61. Dirección General de Salud Pública. Actualización nº 212. Enfermedad por el coronavirus (COVID-19) 22.09.2020. 2020. Centro de Coordinación de Alertas y Emergencias Sanitarias. Ministerio de Sanidad.
62. FAO y PNUMA, El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. 2020. Roma. https://doi.org/10.4060/ca8642es
63. Louv. R. Last Child in the Woods: Saving Our Children from Nature-Deficit Disorder: Saving Our Childern from Nature-deficit Disorder. 2011.

64. Calaza, P. Guía de la Infraestructura Verde Municipal. Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP), Asociación de Empresas de Gestión de Infraestructura Verde (ASEJA) y Asociación Española de Parques y Jardines Públicos (AEPJP). 2019.
65. ONU, Transición socialmente justa hacia el desarrollo sostenible. Naciones Unidas. Consejo Económico y Social. Comisión de Desarrollo Social. 17 de febrero 2021.
66. Esteve, R. Vulnerabilidad de los hábitats concentrados y desarrollo urbano y oportunidad para la España Vaciada. Reflexiones y propuestas para una nueva sociedad post Covid-19. Análisis y reconstrucción del hábitat. 2020.
67. El Confidencial. La pandemia cambia la tendencia: los pueblos ya reciben más población que las capitales. Por Marta Ley, María Zull y Dario Ojeda. 16 de junio 2021. https://www.elconfidencial.com/espana/2021-06-16/movilidad-datos-variaciones-provincias_3132799/
68. INE, Estadística de variaciones residenciales. 2021.
69. MAPA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Anuario de Estadística Forestal 2016. Secretaría General Técnica. 2019.
70. Banco de España, La distribución espacial de la población en España y sus implicaciones económicas. Informe anual 2020.
71. CNMC, Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. 2021. https://www.cnmc.es/prensa/ecommerce-2T-20210108
72. AEP, Agencia Europa Press. Bases de datos y gráficas. 2020. www.epdata.es
73. INE, Indicadores de Confianza Empresarial. Módulo de opinión sobre COVID-19. 2020.
74. Crehana, Los alumnos de formación online crecen un 28% durante la cuarentena. 2020. www.equiposytalento.com/noticias/2020/04/24/los-alumnos-de-formacion-online-crecen-un-28-durante-la-cuarentena
75. Red2030. Internet en la España vaciada. 2021. https://red2030.com/internet-en-la-espana-vaciada/
76. Ruiz-Martinez, I. y Esparcia, J. Internet Acess in Rural Areas: Brake or Stimulus as Post-Covid-19 Opportunity. Sustainability 2020, 12, 9619; doi: 10.3390/su12229619
77. UE, Declaración de Bled. 2018. https://enrd.ec.europa.eu/news-events/news/new-declaration-smarter-rural-areas_en
78. CEPES, Confederación Empresarial Española de la Economía Social. 2020. - www.cepes.es
79. MAPA, Revista Desarrollo rural y sostenible, 2017. nº34.
80. Monzón, J.L., Chaves, R. La economía social en la Unión Europea. Informe elaborado para el Comité Económico y Social Europeo por el Centro Internacional de Investigación e Información sobre la Economía Pública, Social y Cooperativa (CIRIEC). 2012.
81. CEPES, Economía social: Palanca de crecimiento inclusivo para una recuperación social y económica acorde con la agenda 2030. Conferencia Empresarial Española de la Economía Social – CEPES. 2021.
82. Comeau, Y., Favreau, L . Lévesque B. & Mendell M. Emploi, Économie sociale et dévelopement local : les nouvelles filières, 2001. Quebec: PUQ
83. Demoustier, D. Economie sociale et développement local, Cahiers de l'Economie Sociale, 2005 IES – París: L'Harmattan
84. CEPES, Análisis del impacto socioeconómico de los valores y principios de la Economía Social en España. 2019.
85. UNESCO, Indicadores UNESCO de Cultura para el Desarrollo. 2014. es.unesco.org/creativity/sites/creativity/files/iucd_manual_metodologico_1.pdf



Obtención de los factores empleados en la valoración de árboles ornamentales no sustituibles en la última versión de la Norma Granada

A. I. Ayuga-García [1], C. García-Ventura [2], C. González-García [3], M. A. Grande-Ortiz [3], A. Sánchez de Medina-Garrido [3], P. Calaza-Martínez [4], E. Ayuga-Téllez [3]

[1] Igm Ingenieria y gestión medioambiental; aiayuga@e-igm.com
[2] URBASER; cgarciav@urbaser.com
[3] Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid; concepcion.gonzalez@upm.es; m.angeles.grande@upm.es; alvaro.sanchezdemedina@upm.es; esperanza.ayuga@upm.es
[4] Asociación Española de Parques y Jardines Públicaos; calaza@iies.es

Abstract: This work shows how the modification of the intrinsic and extrinsic factors considered in the Granada Standard (NG) has been obtained and weighted the relative importance of each one, analyzing other international valuation methodologies, through meetings of a group of experts and surveys carried out to professionals in the management of urban trees. In the organization of the factors, the division into intrinsic and extrinsic factors has been maintained, which have been divided into blocks of items. The intrinsic factors are divided into three blocks: structure (BIE), health status (BIES) and aspects related to the species to which it belongs (BIS). The extrinsic factors are also organized into three blocks: the first two are social (BES) and environmental (BEA) values, considering services and di-services, and the third is location (BEL). The weightings of each aspect considered in the different blocks were obtained based on the surveys carried out. Some of the characteristics were evaluated based on the results published in scientific journals, such as allergenicity, biodiversity or CO2 absorption. The formulas were determined by the experts and calibrated with simulation. Finally, the final expression was determined by the consensus of the experts.

Palabras clave: tasación de arbolado ornamental, características intrínsecas, características extrínsecas, opinión de expertos, toma de decisiones

1. Introducción

Los árboles son un elemento muy importante para una ciudad y sus habitantes. La presencia de los árboles tiene una gran influencia en el medio ambiente y en la calidad de vida de las personas. Por este motivo, es necesaria su gestión y, por tanto, su tasación y valoración. La relación e interacción entre el arbolado y la sociedad demanda la existencia de métodos que asignen un valor económico a los árboles [1]. Por este motivo, en varios lugares del mundo como Inglaterra, USA, Australia, Suiza, etc., surgieron metodologías específicas de valoración. En España, se desarrolló un método propio, la Norma Granada (NG), una herramienta utilizada para procedimientos expropiatorios, estimación de daños, regulación normativa, indemnizaciones, inventario, y otras [2].

Su primera versión data de 1990 [3] y en 1999 y en 2006 se desarrollaron otras con alguna corrección en 2007 que mejoraban ostensiblemente la metodología y aplicabilidad.

Tras diez años desde la publicación de esta última versión, los usuarios han detectado algunos aspectos que debían mejorarse. También se ha percibido un cambio en la percepción del

arbolado urbano por parte de la sociedad. La valoración de servicios y diservicios ambientales, por ejemplo, es objeto de los métodos de tasación más actuales como INVEST [4] o i-TREE [5]. Todo ello sugiere la modificación de algunos aspectos de la NG, especialmente para integrar perspectivas de valoración más contemporáneas.

2. Materiales y métodos

Este trabajo es parte de un proyecto integral en el que participan tres universidades, para ofrecer una versión completa de la nueva Norma [6]. En esta comunicación se muestra la modificación de los factores intrínsecos y extrínsecos considerados en la NG, ponderando la importancia relativa de cada uno, así como la conveniencia de mantener los existentes en la Norma de 2007 o de incluir algunos nuevos.

2.1. Revisión de métodos de valoración

Se ha considerado como punto de partida la versión anterior de la NG [7]. Se han analizado otras metodologías de valoración internacionales. Los métodos analizados fueron los siguientes: Tedesco, Swiss, French, Italian, CTLA, CAVAT, Finnish, FEM, Capitalización, ICONA, STEM+, Contato, Burnley, Danish, COPIMA, Municipalidad de Peñaolén (Chile) y la Amenity Valuation of Tree and Woodlans (AVTW) [8].

2.2. Método Delphi

Se ha hecho un análisis de los factores que se utilizan en los métodos y de la forma en que se usan para su comparación con los aplicados en la NG. Este estudio se ha utilizado también para la introducción de los nuevos factores.

Para la elaboración del listado de factores incluido en la muestra se empleó el método Delphi, técnica con la que se obtiene información subjetiva y cualitativa al realizar una serie de cuestionarios entre un grupo de expertos con conocimientos y experiencia en el área de estudio [9], en este caso, el arbolado urbano.

El grupo de trabajo lo formaron 9 personas: cuatro profesores y una alumna de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Forestal y Medio Natural, dos miembros de la Asociación Española de Parques y Jardines Públicos (AEPJP) y dos Técnicos especialistas en arbolado urbano.

Se han desarrollado varias reuniones en las que se presentaron diferentes propuestas que fueron debatidas en el grupo de trabajo. Al finalizar cada reunión se envió una encuesta a los participantes y tras obtener todas las respuestas, se redactó un resumen de resultados que se les remitió para su consideración. Este proceso se ha repetido hasta llegar a un consenso.

2.3. Encuestas

Por último, se realizaron dos encuestas a 21 miembros de la AEPJP.

La mayoría de ellos respondió que había realizado valoraciones de arbolado urbano y estaban familiarizados con la NG.

La primera encuesta constaba de 26 ítems de cuatro tipos (Tabla 1): respuestas dicotómicas de tipo si, no (10 ítems), de respuesta múltiple con tres opciones (8 ítems), de respuesta múltiple con ocho opciones (5 ítems) y ordenar propuestas (3 ítems).

Tabla 1. Típo y ejemplos de algunos enunciados de ítems en la primera encuesta

Tipo	Enunciado
Dicotómico	¿Está de acuerdo con la forma general de evaluar (presencia=1, %, ponderación)? ¿Le parece bien la forma en la que se ha usado el tránsito (conjunto de personas y vehículos)?
Múltiple	¿El incremento propuesto si es un parque histórico, un jardín botánico o un arboreto es de un 30%, le parece bien, alto o bajo? Para los siguientes daños estructurales marque la ponderación que crea adecuada (8 opciones con porcentajes distintos)
Ordenar	De las 8 opciones siguientes, le parece que aporta mayor beneficio ambiental… (ordene de menor 1 a mayor 8) De las 6 opciones siguientes, le parece que perjudica más socialmente… (ordene de menos 1 a más 6)

2.2. Simulación

Para obtener los coeficientes y fórmulas de los factores se empleó el método Delphi y las fórmulas consensuadas se calibraron y modificaron posteriormente mediante simulación de todos los posibles resultados de valoración para los factores.

3. Resultados y discusión

Los resultados se resumen en aspectos generales y organización de factores de la propuesta, recopilación de factores, la ponderación de los mismos y su formulación.

En la organización de los factores se ha mantenido la división en factores intrínsecos y extrínsecos de la anterior NG, los cuales se han dividido en bloques de ítems. Estos consisten en una lista de aspectos o características que se consideran más relevantes para la valoración ornamental.

3.1. Aspectos generales de la valoración

El valor final de cada bloque de ítems varía de 0 a 1. Como novedad frente a la antigua NG, cada ítem que se evalúa lleva asociada una ponderación (Wi). El valor de las ponderaciones se obtuvo mediante la toma de decisiones de los expertos a partir de los resultados de la encuesta realizada a miembros de la AEPJP.

Para realizar la valoración el evaluador debe indicar: si el árbol presenta alguno de los ítems y, en algunos de ellos, el evaluador deberá aportar un grado de afección o contribución del ítem al valor económico mediante una escala cualitativa asociada a un porcentaje (también consensuada por los expertos a partir de los resultados de la encuesta) tal y como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Correspondencia grado-porcentaje

Grado de afección/contribución (Ai)	Porcentaje
Muy bajo	20%
Bajo	40%
Medio	60%
Alto	80%
Muy alto	100%

En conjunto, para un grupo de ítems el evaluador deberá incluir psi se presenta el ítem asignando valor 1, o nada siendo valor 0. El evaluador también incluirá el correspondiente grado/porcentaje para el ítem. En la mayoría de los métodos analizados los valores se mueven en un rango de puntos, en el que el valor escogido es una asignación subjetiva del tasador

3.2. Factores inrínsecos

Los factores intrínsecos considerados son: daños estructurales, estado sanitario, estructura arbórea y especie y los extrínsecos son beneficios sociales, beneficios ambientales y localización.

Los factores intrínsecos, que en [3] se encuentran organizados según las partes del árbol, se van a dividir en tres bloques: estructura (BIE), estado sanitario (BIES) y aspectos vinculados a la especie a la que pertenece (BIS).

El BIE (Tabla 3) se ha distribuido según las partes principales del árbol, y en cada parte se han dispuesto los aspectos que se van a evaluar y las ponderaciones. Se mantienen algunos de los presentes en [3], y aparecen aspectos nuevos como la presencia de corteza incluida, de codominancia o de uniones múltiples.

Tabla 3. Bloque Intrínseco Estructura (BIE)

Características consideradas en el bloque de Estructura		Wi Ponderación del ítem en %
Zona radical y cuello	Raíces superficiales	30
	Raíces estrangulantes	40
	Heridas y estrangulamientos	40
	Cavidades	40
	Compactación del suelo	30
Tronco	Inclinación acusada	40
	Torsión sobre el eje	30
	Grietas o fisuras	40
	Fendas	30
	Heridas	30
	Cavidades	50
	Protuberancias	30
Ramas principales y cruz	Descompensación	40
	Heridas	30
	Codominancia	30
	Cavidades	40
	Grietas o fisuras	40

	Protuberancias	30
	Corteza incluida	40
	Uniones múltiples	30
Ramas secundarias	Copa desequilibrada	30
	Heridas	30
	Codominancia	30
	Cavidades	30
	Grietas o fisuras	30
	Corteza incluida	30
	Uniones múltiples	30
Otros		30

En el BIES (Tabla 4) se han reunido los aspectos sanitarios presentes en [3].

Tabla 4. Bloque Intrínseco Estado Sanitario (BIES)

Características consideradas en el estado sanitario	Wi Ponderación del ítem en %
Presencia de cuerpos de fructificación	40
Presencia de insectos	20
Pudriciones	50
Perforaciones en tronco y ramas	40
Chancros	40
Tumores	30
Exudaciones	30
Ramas secas	30
Escobas de bruja	30
Yemas anormales	20
Agallas	20
Hojas cloróticas	20
Hojas con puntos de color	20
Manchas internerviales	20

Perforaciones en las hojas	20
Otros	30

Por último, en el BIS se han incorporado ítems relacionados con la especie del ejemplar: si es de una especie invasora según el catálogo español (*Inv*), la biodiversidad (B) y la clase diamétrica (CD) en la que se encuentra (valores tabulados en base a los trabajos [10,11]. Ninguno de estos factores se valora en [3], la rareza ha desaparecido de las características que se evalúan.

El estado sanitario y la especie se tienen en cuenta en la mayoría de los métodos de tasación de forma muy general. Sólo en la antigua NG, en FEM y el Danish se encuentra un análisis del estado estructural de los diferentes elementos del árbol. La especie se tiene en cuenta en la mayoría de los métodos analizados, aunque en muchos casos es a través de su esperanza de vida como en Tedesco, Burnley, Danish, AVTW o el vigor o adaptación en CTLA [7]

3.3. Factores extrínsecos

Los factores extrínsecos también se organizan en tres bloques: los dos primeros son valores de carácter social (BES) y ambiental (BEA), considerando servicios y diservicios que no se tienen en cuenta actualmente. El tercero es la localización (BEL), que incluye aspectos diferentes que en [3].

El BES (Tabla 5), organizado en singularidades, valores estéticos y diservicios, recoge aspectos de [3] e incorpora nuevos. Unos relativos a características del arbolado que pueden afectar a la salud de la sociedad como es el potencial máximo alergénico o la toxicidad, y otros que afectan al valor estético del arbolado.

Tabla 5. Bloque Factores Extrínsecos de Carácter Social (BES)

	Valores de carácter social	Wi Ponderación del ítem en %
Singularidades	Históricas, culturales, simbólicas, tamaño	60
Estéticos	Forma o porte atractivo	40
	Atractivo cromático	30
	Floración intensa	40
	Fragancia de las flores	30
	Poda topiaria	20
	Poda inadecuada	50
	Deterioro por vandalismo	40

	Potencial máximo alergénico	40
	Toxicidad	30
Diservicios	Espinas	30
	Frutos malolientes	30
	Frutos y flores que manchan	20

El potencial máximo alergénico se evalúa a través de una tabla de valores obtenida con los datos de [12].

Los diservicios no se tienen en cuenta en ningún método de valoración revisado, aunque en el caso del i-Tree o el INVEST estos sí se incorporan en la valoración. Casi todos los métodos tienen en cuenta el valor estético de forma general [4,5].

El BEA (Tabla 6) presenta algunos aspectos ya presentes en la NG como la sombra y el control de la erosión, pero se han añadido otros nuevos como la captación de CO_2 o la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), que se considera un diservicio del arbolado ornamental.

Tabla 6. Bloque Factores Extrínsecos de Carácter Ambiental (BEA)

Valores de carácter ambiental	Wi Ponderación del ítem en %
Pantalla sonora	40
Pantalla visual	40
Sombra	60
Control de la erosión	40
Reducción del viento	40
Captación de CO_2	50
Reducción de contaminación	50
Emisión compuestos orgánicos volátiles	30

Los valores de carácter ambiental se evalúan también mediante tablas que se basan en el tamaño de la copa, la altura del árbol, el diámetro del tronco (para el CO_2) o bien la especie para la emisión de COV, todos ellos basados en trabajos científicos [13-16].

Los métodos analizados que tienen en cuenta en sus factores los beneficios ambientales como tal son el método STEM, el i-Tree y el INVEST, este último pensado especialmente para valoraciones de este tipo [4,5,7].

Para terminar, el BEL representa los diferentes sitios en los que se puede encontrar el arbolado urbano. Una vez indicada la localización del ejemplar, el evaluador indicará un porcentaje de visibilidad del árbol en la misma. Además, como en la NG de 2007, se añade valor al árbol en caso de que sea un parque histórico, un jardín botánico o arboreto y si hay escasez de arbolado o el único ejemplar en la zona.

La mayoría de los métodos, salvo los basados en fórmulas de capitalización exclusivamente, tienen en cuenta la localización del árbol. Casi todos relacionado con el tamaño de la ciudad,

aunque en Contato y CAVAT aparece relacionado con la densidad de población y en el caso de Contato y AVTW con la presencia de otros árboles, como en la nueva NG [3,7].

3.3. Fórmulas

En la Tabla 7 se recogen las ecuaciones que permiten calcular los valores de los diferentes bloques y factores, junto con las ponderaciones de cada bloque que se obtuvieron con el método Delphi. Todas las fórmulas se validaron con simulación y cada bloque toma valores entre 0 y 1.

Tabla 7. Tabla de fórmulas de cálculo de cada bloque y el coeficiente de ponderación de cada bloque, Pi, en la ecuación del valor final de cada ejemplar.

Bloques	Ecuaciones	Ponderación Pi
BIE & BIES	$V_i = \frac{I_i * A_i * W_i}{10000}$ $BIE = \left(1 - \frac{\sum V_i}{nº total\ ítems\ / nº ítems\ marcados}\right) * \left(1 - \left(\frac{\sum Ii * W_i}{\sum W}\right)\right)$ $BIES = \left(1 - \frac{\sum V_i}{nº total\ ítems\ / nº ítems\ marcados}\right) * \left(1 - \left(\frac{\sum Ii * W_i}{\sum W}\right)\right)$	0,4
BIS	$BIS = B + CD - O,2 * Inv$	0,2
BES	$k = 1 - \frac{\sum W\ /100}{(nº\ total\ ítems)}$ $BES = \left(\frac{\sum I_i * W_i/100}{(nº\ ítems\ positivos)} + k\right) * \left(\sum \frac{Ii * W_+}{\sum W_+} - \sum \frac{Ii * W_-}{\sum W_-}\right)$	0,45
BEA	$V_i = \frac{I_i * A_i * W_i}{10000}$ $BEA = \left(\frac{\sum V_i}{nº\ tatal\ ítems - 1} + k\right) * \left(\sum \frac{W_+}{\sum W_+} - \left(\frac{Ii_- * W_- * A_{i-}}{10000}\right)\right)$	0,45
BEL	$BEL = \sum I_i * W_i + Visibilidad + Valor\ especial$	0,1

Donde Ii es la presencia de la característica Ai es el valor asignado por el evaluador, según la tabla 2, el nº de ítems es el número de características de cada bloque, W_+ es la ponderación de características positivas y W_- es la ponderación de características negativas.

4. Conclusiones

La revisión de factores realizada para la nueva NG incluye factores intrínsecos y extrínsecos al árbol. Se han revisado dichos factores para incluir aspectos relevantes en la valoración ornamental. En algunos casos se han eliminado características, en otros se han agrupado y en otros se han añadido. El método para obtener los factores y su importancia es un método científico, lo que da validez a la metodología. Los elementos subjetivos se han minimizado y, a su vez, se ha simplificado la evaluación respecto a la NG anterior. Se han incluido aspectos ambientales que los trabajos de investigación muestran como relevantes y tienen poca presencia en otros métodos de valoración.

5. Agradecimientos

A la Asociación Española de Parques y Jardines Públicos (AEPJP) que impulsó el proyecto y a los miembros que contribuyeron a los resultados con sus respuestas a las encuestas.

Referencias

1. Grande-Ortiz M.A., Ayuga-Téllez E., Contato-Carol M.L. Methods of Tree Appraisal: A Review of Their Features and Application Possibilities. Arboriculture & Urban Forestry, Julio 2012,. 38, 130-140.
2. Asociación Española de Parques y Jardines Públicos. La herramienta de la Norma Granada disponible en vivirlosparques. Febrero 2019, de Asociación Española de Parques y Jardines Públicos, 2011. Sitio web.
3. Asociación Española de Parques y Jardines Públicos. Norma Granada. Método de valoración de árboles y arbustos ornamentales. Asociación Española de Parques y Jardines Públicos: Gráficas Apel. (Edición realizada 2006, corregida 2007).
4. Natural Capital Project, 2022. InVEST 3.13.0.post10+ug.g22001ba User's Guide. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, and Stockholm Resilience Centre
5. Nowak, David J. Quantifying and valuing the role of trees and forests on environmental quality and human health. In: van den Bosch, M.; Bird, W., eds. Nature and Public Health. Oxford textbook of nature and public health. Oxford, UK: Oxford University Press. 2018, Chapter 10.4: 312-316.
6. Calaza-Martínez, P.; Arrieta-León, J.; Ayuga-Téllez, E.; Ayuga-García, A.; Eiras Carlín, J.; Medina Martínez, F.; García-Ventura, C.; et al. *Norma Granada. Método de Valoración de árboles, palmeras y arbustos ornamentales Manual de aplicación*, Asociación Española de Parques y jardines Públicos, Madrid. España, 2020.
7. Ayuga-García, A.I. Análisis y reformulación de los factores intrínsecos y extrínsecos de la Norma Granada: nueva propuesta. Universidad Politécnica de Madrid. Grado en Ingeniería Forestal, 2019.
8. CTLA. Guide for plant appraisal, 9ª Ed. Savoy, IL. Council of Tree and Landscape Appraisers, ISA, 2000. 143pp.
9. Prieto Ballester, J. M., & Pérez Calderón, E. Análisis de la gobernanza en los parques nacionales españoles a partir de un análisis Delphi. Papers de Turisme, 2017, (60), 41-64.
10. Richards, N.A. Diversity and stability in a street tree population. Urban Ecology, 1983, 7(2), 159-171.
11. Santamour, F.S.J. Trees for Urban Planting: Diversity, Uniformity, and Common Sense. Proc. 7th Conf. Metropolitan Tree Improvement Alliance (METRIA), 1990, 7:57–65.
12. Cariñanos P, Casares-Porcel M & Quesada-Rubio JM. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. Landscape Urban Plan., 2014, 123: 134-44
13. Navés F., Pujol J., Argimon X., Sampere L. El árbol en jardinería y paisajismo. Guía de aplicación para España y países de clima mediterráneo y templado. (Segunda edición revisada y ampliada). Ediciones Omega, S.A. 1995.
14. Aguaron E., McPherson, E.G. Comparison of methods for estimating carbon dioxide storage by Sacramento's urban forest. In Carbon sequestration in urban ecosystems (pp. 43-71). Springer Netherlands. 2012.
15. Benjamin, M. T., Sudol, M., Bloch, L., & Winer, A. M. Low-emitting urban forests: a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates. Atmospheric Environment, 1996, 30(9), 1437-1452.
16. Calfapietra C., Fares S., Loreto F. Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone. The capacity to emit isoprenoids confers to plants tolerance to O3 and alters the flux of O3 between atmosphere and biosphere. Environmental Pollution, 2009, 157, 1478-1486.



El bosque de alimentos urbano con arreglo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Agenda 2030, ONU): el caso del BA de la Coop La Morera e Isla de Tercia (Sevilla)

A. Ruiz Canales[1], F. Aix Gracia[2]

[1] acanales@umh.es. Departamento de Ingeniería. CIAGRO. Universidad Miguel Hernández de Elche (Alicante).
[2] F. Aix Gracia, faix@upo.es Departamento de Antropología, Psicología Básica y Salud Pública, Universidad Pablo de Olavide (Sevilla).

Abstract:

Forest garden are an agriculture modality that plants complementary and synergy species in order to generate food and other outputs as less human intervention as possible. Community and housing cooperative La Morera (Seville) plans its urban forest gardens in the place that will be its own residence and in river lands close to Gualdalquivir riverside as well. They aim to consolidate their community, achieve food sovereignty as well as another that are precisely close to Sustainable Development Aims of 2030 Agenda, such as such as health, care attitude, welfare, responsible consuming, responsible water management, sustainable energy, climate change fight and resilience, innovation, biodiversity, education, gender equality and social engagement. Our data was a result of interviews and documents consulting.

Palabras clave: bosques comestibles, cooperativa de vivienda, huertos urbanos, permacultura, soberanía alimentaria

1. Introducción

Los bosques de alimentos (BA) o bosques comestibles constituyen una fórmula de agro-silvicultura de reciente implantación que, sin embargo, viene experimentado un auge notable en el marco de la permacultura o agricultura respetuosa con el medio ambiente. Algunos antecedentes se encuentran en las agricultura tolteca y maya de la milpa, que constituyó una forma de adaptación al medio a lo largo de ocho milenios que permitió el florecimiento de la cultura maya [1] y permitió la coexistencia sostenible de la agricultura con el bosque tropical. Otros antecedentes de los BA se encuentran en el sudeste asiático [2], donde se viene practicando secularmente hasta hoy día.

El auge de los BA en la permacultura occidental se inicia con Robert Hart, quien asilvestró un huerto de 500 m² imitando a los bosques para conseguir que fuese lo más autónomo posible. Lo acuñó con el término Forest Garden [3], que se ha traducido al español como Bosque de Alimentos. Integró distintas especies de plantas, arbustos y árboles, en siete capas que imitaban a la naturaleza. 1) La capa de "dosel" es la capa más alta, e incluye árboles maduros de gran tamaño. Tradicionalmente, las coníferas y el cedro han sido árboles de dosel para los jardines forestales, actualmente incorporan árboles frutales como el roble, la pacana, la papaya, el caqui y la nuez. 2) Capa de pequeños árboles y grandes arbustos. Suelen ser árboles frutales enanos, como la manzana enana, la pera, la cereza y el melocotón. 3) Capa de arbustos frutales. Son arbustos productores de bayas, tolerantes a la sombra, como las grosellas, el arándano o la frambuesa. 4) Capa de herbáceas perennes, algunas de las cuales contribuirán a la capa de cobertura del suelo

por autosiembra o esparcimiento (ruibarbo, acedera, eneldo, tomillo, consuelda y orégano, así como plantas de flor). 5) Capa de cobertura de suelo. Esta capa está formada por plantas rastreras que formarán un mantillo vivo para el 'suelo del bosque' y una cubierta vegetal comestible. 6) Raíces y rizosfera. En esta capa subterránea se incluyen plantas perennes con raíces útiles, como la zanahoria, y hongos beneficiosos. 7) Capa vertical. Está formada por especies de enredaderas y trepadoras. En este caso, son generalmente adiciones tardías al jardín, puesto que necesitan árboles fuertes para trepar [4].

Es un sistema biológicamente sostenible a largo plazo y una vez establecido apenas exige trabajo de mantenimiento. Requiere inicialmente un gran número de plantas y un trabajo considerable. El objetivo es el autoabastecimiento, una dieta saludable y un modelo para desarrollar pequeñas comunidades humanas sostenibles. Incluye elementos filosóficos, experienciales y culturales [5]. Los BA aportan el carácter de lo perenne (cultivos no estacionales, de media y larga duración), de gran interés para el desarrollo comunitario. La continuidad de una misma vida vegetal (especialmente los árboles) y su evolución en paralelo al desarrollo de la comunidad, aportan un valor de acompañamiento insustituible al proceso de maduración comunitario [6].

En España y América Latina la aparición de los BA en el marco de la permacultura apenas alcanza dos décadas en los casos más pioneros. Éstos se basan en la necesidad alimentaria, tanto en la vertiente saludable frente a los alimentos industrializados como frente al hambre mundial [7]. Otros motivos son las críticas al sector agroalimentario [8], el temor al colapso o las eventuales crisis de las cadenas de suministro alimentario.

A continuación, se presenta el Bosque de Alimentos de la Cooperativa de Vivienda (en Cesión de Uso) La Morera y el Bosque de Alimentos a desarrollar en Isla de Tercia (junto con otros colectivos de la ciudad de Sevilla) y su integración dentro del proyecto comunitario, más el análisis de su pertinencia a la luz de los ODS. La metodología para la obtención de datos ha sido la realización de entrevistas y análisis de documentos. La metodología del BA pasa por su tipología según los diferentes contextos climáticos, de altitud y tipos de suelo. Por el contexto donde se ubica, se presenta el método para desarrollar nuestros Bosques de Alimentos Mediterráneos en dos ámbitos distintos: a) el Bosque de Alimentos dentro del que se sitúa la propia edificación de La Morera, llamémosle Bosque de Alimentos La Morera y b) el Bosque de Alimentos a desarrollar en Isla de Tercia junto con otros colectivos de la ciudad de Sevilla, Bosque de Alimentos Isla de Tercia.

2. Materiales y métodos

2.1. Bosque de Alimentos La Morera

En cada una de las dos áreas de 300m2, se plantará una hilera en zig zag de 7 álamos blancos (*Populus Alba*), árboles de gran porte, los cuales ampararán al resto de vegetales y contribuirán a preservar la umbría.

Se implantará un sistema de riego hidropónico para el desarrollo de los cultivos verticales: enredaderas con flores (blancas, violetas, rojas y amarillas) y sin ellas, y otras plantas trepadoras destinadas a las fachadas y a las pasarelas entre los edificios. Entre ellas, se elegirán las de mayor densidad vegetal para cubrir las fachadas y paredes que dan al sur y al sureste en aras de mitigar el calentamiento acusado entre mayo y septiembre. Entre las enredaderas, se dará lugar especial a las parras de uva de mesa para cubrir los techados de las pasarelas y de las plantas bajas.

Sendas líneas de siete álamos centrales de gran porte quedarán rodeadas por una segunda línea de una decena de árboles de porte medio como almendro (*Prunus dulcis*) [9], avellano (*Corylus avellana*), higuera (*Ficus carica*), laurel (*Laurus nobilis*), majuelo (*Crataegus monogyna*), los cuales se combinarán con unos veinticinco frutales como albaricoque (*Prunus armeniaca*), ciruelo (*Prunus domestica*), granado (*Punica grana-tum*), kaki (*Diospyros kaki*), lima (*Citrus aurantifolia*), limonero

(*Citrus limon*), mandarino (*Citrus reticulata*), membrillo (*Cydonia oblonga*), naranjo (*Citrus sinensis*), níspero (*Eriobotrya japonica*), olivo (*Olea europea*), que proporcionarán alimentos y, junto con los árboles centrales, generarán materia orgánica para alimentar el bosque y eventualmente madera para construcciones y generación de energía. Entremezclada con la segunda línea, habrá una tercera línea con arbustos y otras plantas, ya sean comestibles, aromáticas y/o medicinales.

Enfatizando estas dos áreas del BA también como espacios de sociabilidad y desde la perspectiva de jardinería y diseño del paisaje, se crearán espacios centrales en cada área a modo de pradera de unos 30m2 con sus respectivos pequeños estanques con fuentecilla de chorro perpetuo. Partiendo de estas plazas y conectando los laterales de cada área, habrá caminos de piedra que atraviesen sendas zonas verdes para evitar que el exceso de pisada compacte el suelo. Estos caminos estarán jalonados por pequeñas plazoletas con bancos que propicien los encuentros de *petit comité*.

Se contará con toda una serie de recursos vegetales para estructurar las tres áreas. A destacar: diversos setos vivos para demarcación de espacios y que permitan el alojamiento de reptiles e insectos; receptáculos para la elaboración de compost vegetal y animal, junto a los residuos orgánicos de las 25 viviendas; charca artificial con peces rodeada por sendos pequeños montículos rocosos que funcionarán como refugio para anfibios, invertebrados y reptiles; macizos de flores y especies auxiliares para atracción de polinizadores, control de plagas y reservorio de biodiversidad, así como hoteles para insectos; cajas-nido para aves y bat-cajas para murciélagos; favorecimiento y siembra de especies herbáceas autóctonas mediterráneas alimentarias tradicionales, así como hierbas aromáticas y medicinales.

Como parte integrada del Bosque de Alimentos, en ambas áreas entre los edificios de La Morera, se distribuirán ocho bancales elevados de 1,2x1,2x4m para el cultivo en permacultura de hortalizas de temporada, que se prestarán a la observación intergeneracional, especialmente de pequeños/as y mayores.

Las cubiertas del edificio funcionarán como praderas, permitiendo el cultivo de hierba incluso entre las placas solares generadoras de energía fotovoltaica. Asimismo, se estudiará la implantación de colmenas y de gallineros de ponedoras de razas autóctonas andaluzas en régimen de semilibertad. A este fin, se ha mantenido contacto con la Asociación Andaluza de Permapicultura, la cual está al tanto de iniciativas similares en ciudades europeas amparadas por consistorios como el de París.

Poner en marcha un bosque de alimentos puede suponer entre tres y cinco años, dependiendo del ritmo de trabajo, la cantidad de árboles a plantar y las condiciones climáticas. A partir de este periodo, el bosque puede marchar con menor atención humana. Los productos cosechados en el Bosque de Alimentos serán destinados a la cocina común para ser consumidos con la lógica de la autosuficiencia alimentaria. A ello contribuirá la huerta y el Bosque de Alimentos de Isla de Tercia que presentamos a continuación.

2.2. Bosque de Alimentos y Huerta en Permacultura Isla de Tercia

La Isla de Tercia es un área de de 27 Has de tierra agreste con potencial uso agrícola que está situada al norte de la SE-20 y es el resultado de la corta del río Guadalquivir y del Canal del Tamarguillo. Emplazada al norte de la ciudad de Sevilla (noroeste del barrio de San Jerónimo), pertenece al término municipal de Santiponce. Se encuentra a menos de 2km del emplazamiento de La Morera, un recorrido fácil para hacer caminando o en bicicleta.

En el plano institucional, la gestión de este singular territorio corre a cargo de la Dirección General de Patrimonio, perteneciente a la Consejería de Presidencia. Ahora bien, en términos de organización de usos Isla de Tercia está compuesta por una diversidad de colectivos afines que disfrutan del espacio en cesión de uso: Ecologistas en Acción, Asociación de Agroecología Isla de Tercia, Club de Aeromodelismo, Iekin (colectivo por la recuperación de especies autóctonas de

trigo), Asociación Andaluza de Permiapicultura (colectivo de apicultores de recuperación de abejas salvajes) y Club de Tiro con Arco.

La junta directiva de la Asociación de Agroecología Isla de Tercia ha manifestado su entusiasmo a favor de que la Cooperativa La Morera se integre como colectivo dentro de la asociación. Se comenzará a cultivar una parcela de huerta de 300m2, extensión que irá incrementándose a medida que avance la iniciación de un mayor número de cooperativistas en la permacultura y manteniendo siempre en perspectiva el alcanzar el autoabastecimiento y la anhelada soberanía alimentaria.

Además de este proyecto agrícola, la Cooperativa La Morera se ha integrado en el grupo motor para la promoción del Bosque de Alimentos Isla de Tercia (BAIT) compuesto por varios colectivos, entre ellos Ecologistas en Acción. Según se acordó en reunión el lunes 12 de diciembre de 2023 en la sede de Ecologistas en Acción (Centro de Ecología Social Germinal Parque s/n, 41015 Sevilla), el desarrollo del BAIT se acometerá por sectores según la capacidad de sus colectivos integrantes y dichos sectores se irán ampliando a medida que el proyecto encuentre alianzas entre otros colectivos de la ciudad y pueblos cercanos que sean sensibles al ideario de la biodiversidad y la soberanía alimentaria y de la salud.

3. Resultados y discusión

Tanto el Huerto en Permacultura Isla de Tercia como el Bosque de Alimentos Isla de Tercia son proyectos completamente convergentes con el Bosque de Alimentos La Morera y permitirán hablar con propiedad de soberanía alimentaria y de la salud.

3.1. Los BA y la permacultura en el marco de los Objetivos de Desarrollo de la Agenda 2030

Los ODS no sólo interpelan a las agencias gubernamentales sino también a la sociedad civil organizada. A través de su propuesta de huertos urbanos y BA, La Morera se suma a los ODS, tal como mostramos a continuación agrupándolos en cuatro grandes bloques.

El bloque A comprende los ODS 1 (fin de la pobreza), 2 (lucha contra el hambre y mejora de la agricultura sostenible), 3 (garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades), 8 (crecimiento económico sostenible) y 12 (producción y consumo responsables). La incorporación inmediata a los huertos urbanos y el comienzo de los BA supone una apuesta decidida por el autoabastecimiento y una aspiración a la soberanía alimentaria. La forma de vida que envuelve a la permacultura invita a la producción de alimentos y al consumo responsable, velando por una relación respetuosa con el entorno y consiguientemente observando la huella ecológica de los bienes de consumo y rehuyendo del consumismo. En esta misma línea converge el cuidado de la salud mediante la alimentación saludable y el uso de plantas medicinales, como es propio de la etnobotánica y la etnomedicina. Desde La Morera se contempla la posibilidad de generar negocios de proximidad relacionados con la hostelería y el comercio de alimentos. Algunos cooperativistas ya están familiarizados con el cultivo y uso de plantas medicinales como la *Atemisia Annua*, el *Aloe Vera*, la *Moringa oleífera* y el *Kalanchoe daigremontiana*.

El bloque B comprende los ODS 6 (disponibilidad de agua, su gestión libre y saneamiento) y 7 (energía asequible y limpia). El BA La Morera va a contar con un sistema de gestión de aguas que aproveche las aguas pluviales y que depure las aguas grises para el riego. Los propios BA constituyen verdaderos sistemas integrales de optimización del agua, tanto por la filtración de la misma como por el mantenimiento de la umbría. Por su parte, la energía fotovoltaica va a constituir la fuente de energía eléctrica de la vivienda y varios cooperativistas ya se han expertizado en su diseño tanto para la vivienda y BA (por lo que pueda requerir el riego hidropónico y los dispositivos de supervisión) como para su implantación comunitaria en el barrio de San Jerónimo. La Asociación de Agroecología Isla de Tercia ha instalado en la primavera

de 2023 su pequeña planta fotovoltaica para la extracción del agua de pozo, con lo que ello supone de avance en soberanía energética.

El bloque C comprende los ODS 9 (construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación), 11 (ciudades y comunidades sostenibles), 13 (acción por el clima) y 15 (gestión sostenible de los bosques, lucha contra la desertificación, reversión de la degradación de las tierras, detener la pérdida de la biodiversidad). Los BA de La Morera contribuyen a combatir y mitigar el cambio climático tanto por lo que representan en tanto granjas de carbono como por su efecto atemperador del clima; y la edificación lo secunda, ya que responde a criterios bioclimáticos. La premisa investigadora promete ser una constante tanto con relación a los BA como al edificio, actitud que se verá acompañada por el espacio del edificio destinado a un pequeño taller-laboratorio para ensayos tecnológicos. Cabe subrayar el apoyo de los BA a la reforestación, a la recuperación de suelos y la contribución a la biodiversidad de la zona norte de la ciudad de Sevilla. Esto no sería posible sin la premisa de no abandonar la ciudad y sus conflictos sino encararlos y buscar soluciones ensayando su implantación.

El bloque C comprende los ODS 4 (garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos) y 5 (lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas). Los BA y los huertos urbanos sirven al propósito de la educación como palanca de cambio medioambiental y toma de consciencia de la ecodependencia [10] y de la interdependencia, lo cual resulta propiciatorio de un planteamiento de igualdad de género, especialmente porque el ideario de los integrantes de la cooperativa corresponde con el eco-feminismo [11].

Las mencionadas iniciativas y sus correspondientes ODS están llevados a diseminarse por el barrio de San Jerónimo y también por la ciudad a causa del papel transmisor que La Morera puede ejercer como centro social.

4. Conclusiones

En este trabajo se han mostrado dos ejemplos de bosques de alimentos (BA), el Bosque de Alimentos Isla de Tercia y el Bosque de Alimentos La Morera.

Las dos propuestas de BA permiten avanzar en los aspectos de soberanía alimentaria, desarrollo comunitario y salud.

Adicionalmente, incluyen una gran parte de los objetivos de desarrollo sostenible. ODS 1 (fin de la pobreza), 2 (lucha contra el hambre y mejora de la agricultura sostenible), 3 (garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades), 8 (crecimiento económico sostenible) y 12 (producción y consumo responsables). ODS 4 (garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos) y 5 (lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a todas las mujeres y las niñas). ODS 6 (disponibilidad de agua, su gestión libre y sanea-miento) y 7 (energía asequible y limpia). ODS 9 (construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación), 11 (ciudades y comunidades sostenibles), 13 (acción por el clima) y 15 (gestión sostenible de los bosques, lucha contra la desertificación, reversión de la degradación de las tierras, detener la pérdida de la biodiversidad).

Esta manera de producir alternativa a la agricultura convencional incluye numerosas posibilidades como experiencia piloto y de ejemplo para otros casos de estudio.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Cooperativa La Morera su colaboración en la elaboración de esta comunicación.

Adicionalmente, los autores de esta comunicación agradecen el apoyo tecnológico prestado por la empresa TELENATURA EBT, S.L. (https://www.telenaturaebt.es).

Referencias

Las referencias se citarán en el texto numéricamente, entre corchetes: [1]. [2,3], etc.

[1] Ford, A and Nigh, R. 2009 "Origins of the Maya Forest Garden: Maya resource management", en Journal of Ethnobiology 29(2): 213–236, Fall/Winter; Ford A and Nigh, R. 2015 The Maya Forest Garden: Eight Millenia of Sustainable Cultivation of Tropical Woodlands, NY, Routledge.

[2] Kaya, M., Kammesheidt, L. and Weidelt, J. 2002 "The forest garden system of Saparua island, Central Maluku, Indonesia, and its role in maintaining tree species diversity", in Agroforestry Systems 54: 225–234, 2002. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.

[3] Whitefield, P. 1996 "How to make a forest garden". Hampshire, Permanent Publications, p. xv).

[4].https://emegrupo.com/sectores/hosteleriayeventos/?gclid=EAIaIQobChMIkY61jrD0_gIVBkkdCR0lZQDZEAEYASAAEgJRdfD_BwE

[5] Whitefield, P. 1996 "How to make a forest garden". Hampshire, Permanent Publications; Crawford, M 2012 "Creating a Forest Garden: working with nature to grow edible crops", Cambridge, Green Books; Crawford, M. and Aitken, C. 2013 "Food from your forest garden How to harvest, cook and preserve your forest garden produce", Cambridge, Green Books; Stobart, A. 2020 "The medicinal forest garden handbook. Growing, harvesting and using healing trees and shrubs in a temperate climate", Hampshire, Permanent Publications.

[6] Wartman, P.; Van Acker, R.; Martin, R.C. 2018 Temperate Agroforestry: How Forest Garden Systems Combined with People-Based Ethics Can Transform Culture. Sustainability 2018, 10, 2246.

[7] https://side-ways.net/episode5_es-mobile/

[8] Contreras, Jesús. 1992. Alimentación y cultura: reflexiones desde la Antropología. Revista Chilena de Antropología, P. 105.

[9] https://www.guiadearbolesyarbustos.com/2021/03/arboles-arbustos-sevilla.html (04.05.23).

[10] Naredo, J.M. 2006 "Raíces económicas del deterioro ecológico y social. Más allá de los dogmas", Madrid: Siglo XXI; Fernández Durán, R. 2010 "El Antropoceno: la crisis ecológica se hace mundial. La expansión del capitalismo global choca con la Biosfera", Madrid, Coeditores Virus y Libros en Acción.

[11] Herrero, Y. 2013 "Miradas ecofeministas para transitar a un mundo justo y sostenible", en Revista de Economía Crítica, nº16, segundo semestre 2013

Explotaciones Porcinas en la Provincia de Albacete: Localización, Caracterización y Producción de Estiércol

F. Montero Riquelme[1], A. Brasa Ramos[1], H. Vergara Pérez[2], A. Olivas del Rey[3], J. Navarro Morales [1]

[1] Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, Universidad de Castilla-La Mancha, antonio.brasa@uclm.es.
[2] Departamento de Ciencia y Tecnología Agroforestal y Genética. Universidad de Castilla-La Mancha, herminia.vergara@uclm.es
[3] Instituto Técnico Agronómico de Albacete, aodr@dipualba.es

Abstract:

The aim of this paper focus on characterizing and locating pig farms in the province of Albacete, Spain, and determining its contribution to manure production or equivalent nitrogen. The data was provided by official sources of the regional government of Castilla-La Mancha and processed in accordance with the current regulations of best practice available and nitrates pollution. The results showed that most farms are for fattening pigs (63%); fattening and weaner livestock units reached 87%. Pig farms are preferentially located in the livestock districts of Albacete, Elche de la Sierra, Casas Ibáñez y Hellín. The total production of manure was 1.2 million m^3 /year in the whole province.

Palabras clave: ordenación territorial, purines, valorización, economía circular, UGM

1. Introducción

La ganadería porcina intensiva es el sector ganadero con mayor dinamismo y está en constante actualización y evolución [1]. Sus adaptaciones contemplan exigencias legales de tipo sanitario y medioambiental, derivadas de su propia actividad, que afectan al diseño y adaptación de explotaciones en factores clave como el emplazamiento y sus instalaciones. Es decir, este sector se enfrenta a un gran reto [2,3] que se constata por una preocupación social referente a tamaño y ubicación de las granjas, el estiércol generado, su almacenamiento y uso posterior. Como consecuencia puede verse comprometida la producción de carne de cerdo [4]. Por otra parte, la coyuntura actual del aumento de los precios tanto de las materias primas, los combustibles y fertilizantes químicos, justifica el estudio de alternativas viables como es el uso de los fertilizantes orgánicos (estiércol), por sus beneficios. El exceso de fertilización que puede suponer la pérdida de nutrientes por escorrentía, lixiviación e infiltración del suelo a los acuíferos y, en su caso, la contaminación del agua subterránea por nitratos, ha sido regulado a nivel europeo y nacional recientemente mediante el RD 1051/2022, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible de suelos agrarios. Reducir esta contaminación sigue siendo un reto pendiente, asumido en la Estrategia "De la Granja a la Mesa" de la Unión Europea" [5].

La distancia entre las granjas y las explotaciones agrícolas, en las que se requiere la aplicación de nutrientes en los cultivos, para cubrir sus necesidades, en ocasiones no es la adecuada, lo cual precisa revisar los sistemas de gestión actual [6].

Reducir los costes de producción agrícola, minimizando el uso de fertilizantes químicos de síntesis, en el marco de una agronomía competente y competitiva, permitiría crear una economía circular sostenible con un modelo integral de producción porcina que minimice el impacto de estas explotaciones en el medio ambiente [7], aprovechando los estiércoles líquidos disponibles para la fertilización de cultivos destinados a la alimentación animal.

El objetivo de este trabajo se centra en la caracterización de las explotaciones de ganado porcino, conocer su localización y su contribución a la producción de estiércol/Nitrógeno en la provincia de Albacete y su posible afección en las zonas vulnerables por contaminación de nitratos, lo que está en consonancia la normativa vigente (RD 306/2020).

2. Materiales y métodos

La información necesaria para realizar este trabajo fue facilitada por la Consejería de Agricultura, Agua y Desarrollo Rural de la JCCM con datos a fecha de marzo de 2023 relativos al registro de explotaciones de ganado porcino de la provincia de Albacete, incluyendo municipio, código REGA, sostenibilidad, coordenadas de ubicación de la granja, clasificación zootécnica, capacidad máxima, censo, fecha del censo, la fecha de alta y el régimen de actividad. Tras la consiguiente revisión y depuración de los datos, se clasificaron las explotaciones según la normativa vigente recogida en el anexo I del R.D. 306/2020. Asimismo, se realizaron los cálculos pertinentes para determinar el estiércol producido y el nitrógeno equivalente para cada clase zootécnica de explotación en función del tipo de ganado.

Con estos datos se elaboró un Sistema de Información Geográfica que permitió analizar las relaciones espaciales existentes entre los distintos parámetros del estudio [8], a escala municipal, por comarca ganadera y provincial.

3. Resultados y discusión

Según los datos facilitados por la Consejería de Agricultura, Agua y Desarrollo Rural de la JCCM (2023), en la provincia de Albacete existen 137 explotaciones de ganado porcino con una capacidad máxima de 412505 plazas por año.

De entre todas ellas, 15 están consideradas como centros de concentración: 8 mataderos, 3 centros de ocio y enseñanza, 2 tratantes con explotación propia y 2 clasificadas como otras. Comprenden una capacidad máxima anual total de 259, lo que constituye apenas un 0,06% del total provincial de plazas.

Las restantes 122 explotaciones porcinas están dedicadas a la producción y reproducción (Tabla 1) estando todas activas. En conjunto tienen una capacidad máxima de 412246 plazas/año, equivalentes a 65454 Unidades de Ganado Mayor (UGM). De acuerdo con las equivalencias de la tabla del Anexo I del Real Decreto 306/2020, respecto del tipo de ganado de cada explotación, el máximo teórico de producción de estiércol total alcanzaría 1201943 m^3/año.

Tabla 1. Clasificación zootécnica de las explotaciones de producción y reproducción de ganado porcino de la provincia de Albacete, ordenadas por producción de estiércol máximo teórico (Fuente: Consejería de Agricultura, Agua y Desarrollo Rural de la JCCM, 2023)

		Cap. máx anual				Estiércol	
Clasificación zootécnica	**Nº**	**Plazas**	**%**	**UGM**	**%**	**m³/año**	**%**
Cebo	*77*	*209461*	*50,8*	*25135*	*38,4*	*450341*	*37,5*
Multiplicación	*7*	*14441*	*3,50*	*13863*	*21,2*	*256328*	*21,3*
Tipo mixto	*7*	*12685*	*3,08*	*12178*	*18,6*	*225159*	*18,7*
Producción de ciclo cerrado	*8*	*4651*	*1,13*	*4465*	*6,82*	*82555*	*6,87*
Selección	*1*	*3984*	*0,97*	*3825*	*5,84*	*70716*	*5,88*
Transición de lechones	*7*	*148050*	*35,9*	*2961*	*4,52*	*60701*	*5,05*
Recría de reproductores	*9*	*15710*	*3,81*	*2199*	*3,36*	*39275*	*3,27*
Producción de lechones	*4*	*3172*	*0,77*	*793*	*1,21*	*16177*	*1,35*
Centro de recogida de semen	*1*	*81*	*0,02*	*24*	*0,04*	*496*	*0,04*
Experimentación	*1*	*11*	*0,003*	*11*	*0,02*	*195*	*0,02*
Total	*122*	*412246*	*100*	*65454*	*100*	*1201943*	*100*

La mayoría son explotaciones clasificadas como de Cebo (63% de todas las explotaciones de la provincia) y contienen 209461 plazas ganaderas (el 51% del total provincial). Por número de plazas, le siguen las explotaciones de transición de lechones con 148050 plazas ganaderas, que representan el 35,9%.

En base al criterio de su equivalencia en UGM, las de cebo ocupan el primer lugar (25135 UGM) seguidas de las de multiplicación y las de tipo mixto. La contribución acumulada de la producción teórica máxima anual de estiércol de estos tres tipos suma el 77,5% del total provincial. La de transición de lechones solo representa un 4,5% de las UGM totales de la provincia como consecuencia de la equivalencia en UGM (0,02) de este tipo de ganado y su producción de estiércol es del mismo orden (5%).

La distribución geográfica para los tres indicadores (Nº, Cap. máx. anual y producción de estiércol) tiene un comportamiento desigual, tal y como se aprecia en la Tabla 2 en la que se representa la distribución de explotaciones porcinas dedicadas a la producción y reproducción por comarcas ganaderas.

Tabla 2. Distribución por comarcas ganaderas de la provincia de Albacete de las explotaciones de producción y reproducción de ganado porcino, ordenadas por producción de estiércol máximo teórico (Fuente: Consejería de Agricultura, Agua y Desarrollo Rural de la JCCM, 2023)

		Cap. máx anual					Estiércol	
Comarca Ganadera	**Nº**	**Plazas**	**%**	**UGM**	**%**		**m³/año**	**%**
Hellín	19	239606	58,1	23361	35,7		431041	35,9
Albacete	25	39648	9,62	14095	21,5		259513	21,6
Balazote	8	13111	3,18	6991	10,7		128759	10,7
Casas Ibáñez	20	34625	8,40	6260	9,56		113537	9,45
Almansa	9	15814	3,84	5541	8,46		101851	8,47
Elche de la Sierra	23	38887	9,43	4091	6,25		73617	6,12
La Roda	7	11687	2,83	3027	4,62		55233	4,60
Alcaraz	6	5834	1,42	748	1,14		13432	1,12
Higueruela	1	6000	1,46	720	1,10		12900	1,07
Villarrobledo	4	7034	1,71	620	0,95		12059	1,00
Total	122	412246	100	65454	100		1201943	100

El mayor número de explotaciones se encuentra en la comarca de Albacete, seguida de Elche de la Sierra y de Casas Ibáñez. Sin embargo, la comarca de Hellín cuenta con la mayor capacidad máxima anual tanto en plazas como en su equivalencia a UGM.

A pesar del elevado número de explotaciones presentes en las comarcas de Elche de la Sierra y de Casas Ibáñez, su contribución en producción de estiércol máximo teórico supone un 6,1% y un 9,4%, respectivamente, frente al 36% de Hellín que cuenta con menos explotaciones, por la consideración referida anteriormente respecto al tipo de ganado de sus explotaciones.

Las comarcas de Hellín, Albacete y Balazote acumulan el 71% de la capacidad máxima anual en plazas y aportan el 68% del estiércol total provincial.

La distribución comarcal de las explotaciones porcinas por clase zootécnica se representa en la Figura 1, así como la capacidad máxima total comarcal en UGM. Se observa que, en las comarcas de Hellín, Albacete, Casas Ibáñez y Elche de la Sierra existen focos de concentración donde se localiza la mayor parte de las explotaciones, predominando las de cebo. Las explotaciones de recría se localizan en Balazote, Hellín y La Roda. Las de ciclo cerrado se concentran en Balazote, Albacete y Almansa. La mayor parte de las explotaciones de multiplicación están en Albacete. Las explotaciones de tipo mixto están concentradas en Hellín y Albacete.

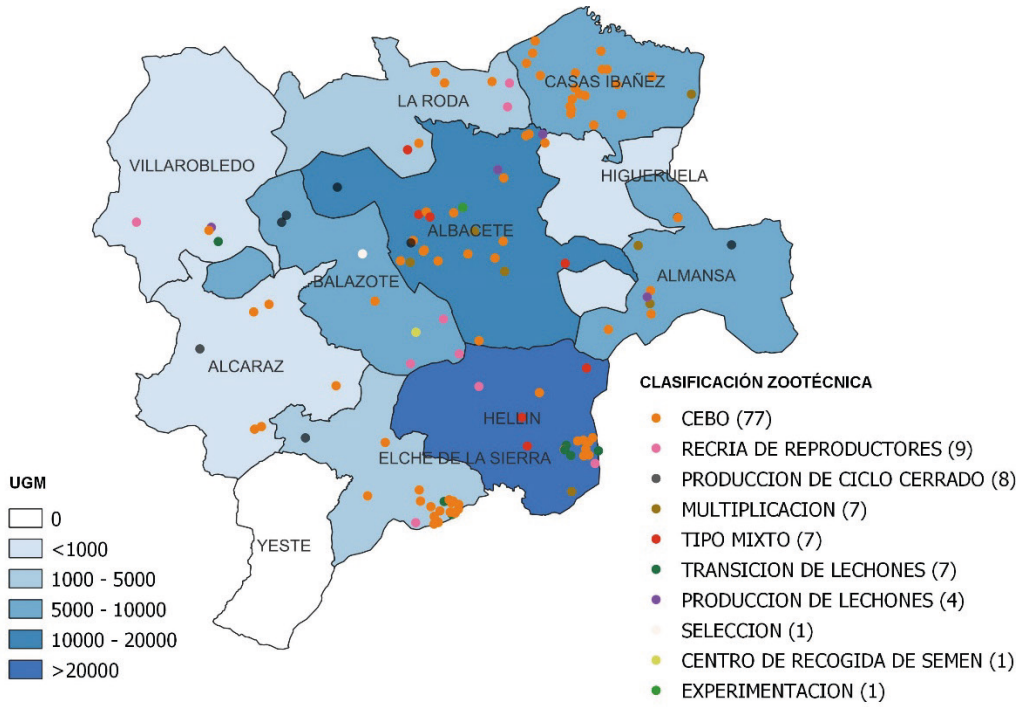


Figura 1. Distribución comarcal de las explotaciones porcinas dedicadas a la producción y reproducción según clases zootécnicas y capacidad máxima total expresada en UGM.

En la Figura 2 se observa la distribución comarcal de las explotaciones clasificadas por su capacidad productiva (UGM), así como la producción de nitrógeno generado. Dos tercios de las explotaciones (63%) están ubicadas en zona vulnerable a la contaminación por nitrato. La mayor parte de explotaciones de Grupo Tercero (más de 480 UGM) se localizan en la comarca de Hellín (no considerada zona vulnerable), seguida de las comarcas de Albacete y Balazote. En la comarca de Casas Ibáñez tan solo existe una explotación de este tipo, abundando las de Grupo Segundo (120-480 UGM).

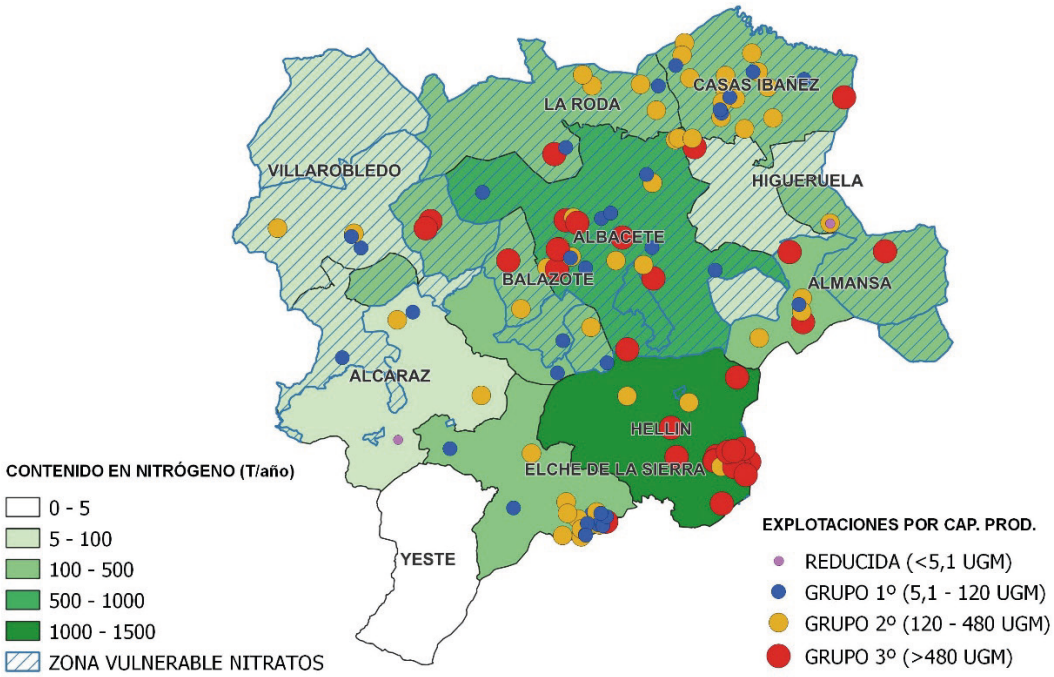


Figura 2. distribución comarcal de las explotaciones porcinas de producción y reproducción clasificadas por su capacidad productiva (UGM) y contenido total de nitrógeno generado en relación con las zonas vulnerables a la contaminación por nitratos.

4. Conclusiones

Existe una gran desigualdad respecto a la distribución de las explotaciones porcinas en lo que respecta a las comarcas ganaderas. El 63% de las explotaciones de producción y reproducción de la provincia de Albacete, de las cuales la clasificación zootécnica más numerosa es la de cebo, se localizan en zonas vulnerables a contaminación por nitratos, por lo que la distribución de estiércol generado requerirá mayores superficies de cultivo, alternativas agronómicas sostenibles y una planificación precisa de la nutrición.

Finalmente, este trabajo servirá de base para crear un modelo de economía circular basado en el aprovechamiento del estiércol generado para el abonado de los cultivos agrícolas usados para fabricar piensos para alimentación animal y producción de carne de cerdo, en consonancia con las nuevas exigencias y estrategias de la nueva PAC (2023 – 2027).

5. Agradecimientos

Este trabajo se está realizando en el marco del proyecto piloto “Implantación de un modelo de economía circular para la gestión sostenible del estiércol líquido de porcino en Castilla-La Mancha” (2022-2024) al amparo de la Orden 203/2020, de 30 de diciembre, de la Consejería de Agricultura, Agua y Desarrollo Rural, y la resolución de 04/05/2021 de la Dirección General de Agricultura y Ganadería, en el Grupo Operativo “ECIPUR” (https://www.ecipur.es/) en el que participan la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) ICPOR (Integración Porcina de Cerdo Blanco e Ibérico, el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP) y ASAJA Cuenca.

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Delegación Provincial de Agricultura, Agua y Desarrollo Rural en Albacete por su colaboración en la obtención de los datos y su tratamiento.

17.

Referencias

1. Díaz, M.A. El sector porcino español. De la incertidumbre al liderazgo. Monografías Cajamar y jornada agroalimentaria IRTA (2018). Volumen nº 36. Capítulo 3. Pág (95 – 109).
2. Láinez, M.L. Martí, J.V. Torres, A. La gestión de purines en la comunidad valenciana. Revista Porci (2003). nº 77. Pág (21 – 37). Conselleria de Agricutura, Pesca y Alimentación. Universitat Politécnica de Valencia.
3. Láinez, M.L. Regulación de la producción porcina intensiva. Revista Porci (2003). nº 76. Pág (27 – 40). Conselleria de Agricutura, Pesca y Alimentación. Universitat Politécnica de Valencia. Revista porci.nº 76. Pág (27 – 40).
4. Blanco, G. Sáncho, V. Cartanyá, J. Babot, D. Gestión de los purines en las explotaciones ganaderas. Revista Mundo Ganadero (2021) Grupo de Gestión Porcina. Universidad de Lleida.
5. Saura, C. Donate-Hernandez, J.M. Gómez, M.D. Aplicación del ecoetiquetado a la producción sostenible de carne de ganado porcino en intensivo. XIII Congreso de Economía Agroalimentaria (2021). Pág (701 – 704).
6. Bigeriego M. La ganadería y los nuevos compromisos mediambientales. Revista Porci (2005) nº 87. Pág (8 – 22).
7. Buxade, C. La gestión integral y las instalaciones, claves en la temática de la contaminación mediambiental en la explotación porcina. Revista Porci (2004). Nº 83. Pág (21 – 32).
8. Calafat-Marzal, C. Gallego-Salguero, A. Quintanilla-García, I. (2019) Identificación mediante Sistemas de Información Geográfica de áreas problemáticas de ganadería intensiva por incumplimiento de las normas vigentes: el caso de la Comunidad Valenciana. Departamentos de Economía, Ciencias Sociales y de Cartografía, Geodesia y Fotogrametría de la Universitat Politécnica de Valencia





Suelo y Aguas / Solo e água



Efficiency of large-scale aided phytostabilization in a mining pond

M.D. Gómez-López*[1], V. Shahrokh[1], S. Martínez-Martínez[1], Á. Faz[1], R. Zornoza[1], J.A. Acosta[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Área de Ingeniería Agroforestal (Departamento de Ingeniería Agronómica). Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia). E-Mail: lola.gomez@upct.es

Abstract:

Mining activities accumulate large quantities of waste in tailing ponds, which results in several environmental impacts. In Cartagena–La Unión mining district (SE Spain), a field experiment was carried out in a tailing pond to evaluate the effect of aided phytostabilization on reducing the bioavailability of zinc (Zn), lead (Pb), copper (Cu) and cadmium (Cd) and enhancing soil quality. Nine native plant species were planted and pig manure and slurry along with marble waste were used as amendments. After 3 years, vegetation development was observed differently on the pond surface. In order to evaluate the factors affecting this inequality, four areas with different VC and an area without treatment (control area) were sampled. Soil physicochemical properties, total, bioavailable and soluble metals, and metal sequential extraction were determined. Results revealed that pH, organic carbon (OC), calcium carbonate equivalent (CCE) and total nitrogen (TN) increased after the aided phytostabilization, while electrical conductivity (EC), total sulphur (TS) and bioavailable metals significantly decreased. In addition, results indicated that differences in VC among sampled areas were mainly owing to differences in pH, EC and concentration of soluble metals, which in turn were modified by the effect of non-restored areas on close restored areas after heavy rains due to a lower elevation of the restored areas compared to the unrestored ones. Therefore, to achieve the most favorable and sustainable long-term results of aided phytostabilization, along with plant species and amendments, micro-topography should be also taken into consideration, which causes different soil characteristics and thus different plant growth and survival.

Palabras clave: phytoremediation, vegetation cover percentage, amendments

1. Introduction

Mining activities spread many contaminants in ecosystems [1]. Several contaminants from adjacent mining districts can be leached into soils, surface and groundwater and subsequently transferred to the food web. In addition, mine tailings characterized by null vegetation, poor fertility, low pH, and high contents of potentially toxic elements [2] may result in massive environmental degradation, biodiversity loss and health risks to human populations in the surrounding regions [3]. Considering all those facts, providing an effective remediation method to rehabilitate the tailing ponds has been a great challenge in recent decades.

Different physical, chemical and biological approaches have been applied to remediate mining wastes rich in heavy metals [4]. Among the different approaches with their own advantages and disadvantages, special attention is drawn to the phytoremediation technologies.

Aided phytostabilization as an eco-friendly, efficient, cost-effective, simple, and applicable in long term deals with the reduction in mobility and bioavailability of heavy metals in soils. This

technique requires both incorporation of the vegetation with appropriate plant species and, in some cases, the adequate amendments [5].

The selected plant species for phytostabilization are preferred to be native as they are adapted to the local climatic and environmental conditions, also characterized by the fast growth, extensive root system development, large amount of biomass and tolerance to metal contamination and nutrient deficiency [6]. Among the hyperaccumulator plants, those accumulate heavy metals in their below ground parts are the most effective species for phytostabilization[7].

Different amendments can be used in abandoned soils and mine sites to achieve the optimum conditions for plant growth by improving the biological, physical and chemical properties of soil and also to stabilize metal(loid) in soil [8]. Inorganic materials rich in carbonate are successfully applied to reduce the acidic conditions of several acid-forming mine wastes [9]. Moreover, organic residues can significantly improve the organic matter content and fertility level; increase microbial populations or activities and possibly adsorb the metals on solid surfaces through complexation with humic substances [10].

It is well known that improvement of soil health and plant growth can be two major indicators of the effectiveness of reclamation methods and reduction of environmental risks [11]. In this regard, we applied organic and inorganic amendments in a tailing pond to improve soil conditions for establishment of native species. However, after 3 years of the amendments application and planting, a different vegetation development was observed on the surface of the tailing pond. In addition, topography can creates sites of variable hydrological processes, soil water availability, soil characteristics and vegetation [12]. Furthermore, considering the influence of microtopography on landscape properties such as soil biogeochemistry and soil surface roughness and relief [13], raises this question that whether this factor could affect the efficacy of phytostabilization of tailings ponds. Therefore, the objectives of this study were (i) to evaluate changes in the soil characteristics after application of amendments and planting, and (ii) to elucidate the factors including microtopography affecting the effectiveness of aided phytostabilization technique in a tailing pond with high concentration of Cd, Cu, Zn and Pb

2. Materials y method

2.1. Study area

The study was conducted in a tailing pond in the Cartagena–La Union Mining district, Murcia, SE Spain, with an area of 1.4 ha (Figure 1). The climate is Mediterranean semiarid with an annual rainfall of 275 mm and a temperature of 18 °C. Tailings are characterized by absence of vegetation, sandy loam texture, extreme acidity, low content of nutrients and organic matter and high metal(loid)s concentrations[14].

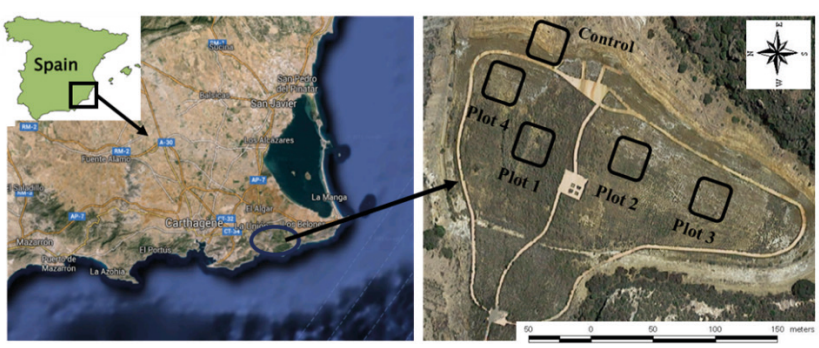


Figure 1. Location of the study area and view of tailing pond

2.2. Experimental design and soil sampling

The tailings pond surface was tilled, levelled and a drainage system was established to prevent the formation of runoff and flooded zones. In order to enhance soil nutrients and soil organic matter, neutralize acidity, reduce the availability of heavy metals, facilitate vegetation establishment and improve soil structure, marble wast

After 3 years of the amendments application and planting, a different vegetation development was observed on the surface of the tailing pond, therefore in order to identify what factors could cause this difference, four plots (10 m x 10 m) with different vegetation coverage (VC) were selected, plot 1 with VC of 85%, plot 2 with VC of 45%, plot 3 with VC of 20%, plot 4 with VC of 0%. In addition, a fifth plot of mining pond with no vegetation nor amendment application was chosen to be used as control plot (Figure 1), which represents the characteristic of the tailing pond before rehabilitation. In each plot, random soil sampling (0-50 cm) was carried out with five replications.

In order to evaluate the biodiversity and heterogeneity of plant communities, all plant species were identified and then species richness and Shannon–Wiener index (H) estimated [15].

2.3. Laboratory analysis

Electrical conductivity (EC) and pH were determined in ratios of 1:5 and 1:2.5 sample to deionized water suspension, respectively. Particle size distribution was done by Robinson pipette methodology. Available phosphorus (P) was evaluated using the Olsen method [16]. Total nitrogen (TN), total sulfur (S) and total organic carbon (TOC) were examined by an elemental CHNS analyzer (EA-1108, Carlo Erba). Aggregate stability and calcium carbonate equivalent (CCE) were measured using USDA-NRCS [17]. Porosity (P) was calculated using real and bulk densities.

Bioavailable metal concentrations were determined with 0.01 M CaCl2 (1:10 soil-extractant ratio) [18]. Water soluble metals were examined using a 1:5 soil-deionized water ratio [19]. Pseudo-total metals (Pb, Cu, Zn and Cd) were evaluated using $HNO_3/HClO_4$ digestion at 210° C for 90 min [20]. Sequential extraction procedure developed by Tessier *et al.* [21] and modified by Li *et al.* [22] was used for determining the chemical speciation of metals in soil. The following fractions were obtained: 1) exchangeable, 2) bound to carbonate and specifically adsorbed, 3) reducible and bound to Fe/Mn-oxides, 4) oxidizable and bound to sulfides and organic matter and 5) residual phase. Measurements of the concentrations of metals were measured using an atomic absorption spectrophotometer (AAnalyst 800, Perkin–Elmer).

2.4. Data Analysis

Kolmogorov-Smirnov test was applied to ensure the data fit a normal distribution. Some data did not follow the normal distribution and log transformation was done. All data obtained were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SAS statistical program (ver.9.1) and differences among traits were compared by the least significant difference (LSD) test ($p \leq 0.05$).

3. Results y discussion

3.1. Plant growth

As shown in Table 2, different plant species were established unevenly in the studied plots. A total of 152 individuals of 9 plant species were recorded growing in three plots (Plots 1, 2 and 3) in the tailing pond. The most common species was *P. miliaceum* with the abundance varied between 10 and 34 individuals among the revegetated plots.

Table 2. Richness, Shannon-Weaver Index, vegetation cover and plant species

Plant/plot	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4
Atriplex halimus L.	34	5	0	0
Cynodon dactylon (L.) Pers.	0	6	3	0
Diplotaxis erucoides (L.) DC.	0	4	0	0
Lobularia maritima (L.) Desv.	8	0	0	0
Oxalis pes-caprae L.	2	1	0	0
Phagnalon saxatile (L.) Cass.	6	2	0	0
Piptatherum miliaceum (L.) Coss.	24	10	34	0
Senna occidentalis (L.) Link.	1	0	0	0
Stipa tenacissima L.	8	4	0	0
Richness	7	7	2	0
Shannon-Weaver Index	1.5	1.76	0.28	0
Vegetation cover (%)	85	45	20	0

Although amendments were applied homogeneously in the whole tailing pond, plants grew differently on the tailing pond, as showed in the different values of vegetation cover observed in each plot (Table 2). Due to the similar parent material, remediation practices and climate condition of the studied plots, it would be likely that apart from these factors, other driving parameters such as topographic position of the plot might also contribute to the vegetation development diversity.

The Shannon–Weaver biodiversity indexes calculated for the plots 1, 2 and 3 were 1.5, 1.76 and 0.28, respectively, whereas their associated richness was in the order of 7, 7 and 2 (Table 2). *P. miliaceum*, dominated in plots 2 and 3, showed a good adaptation to the soil conditions of the plots, except for the plot 4. This grass and *A. halimus L.*, major species in plot 1, were the dominant species of the vegetation community in the tailing pond (Table 2).

3.2. Effect of amendments and phytostabilization on soil properties

The main physicochemical properties of the soils are reported in Table 3. Prior to the amendment application, pH of the tailing pond was acidic (pH= 2.9) which tended to increase toward neutral by aided phytostabilization, except for Plot 4. EC values were significantly lower in treated plots than in bare soils (Plot 4 and Control), without significant differences among vegetated parts.

Table 3. Physicochemical properties and metal concentrations (mg kg^{-1}) of soil samples from the studied tailing pond, mean (standard deviation)

Soil properties	Plot 1	Plot 2	Plot 3	Plot 4	Control
pH	7.1(0.6)a	5.8(1.4)ab	4.7(1.5)b	3.3(0.3)c	2.4(0.3)c
EC (dS m^{-1})	3.0(0.1)b	4.0(0.4)b	4.4(0.7)b	7.4(0.8)a	6.9(2.2)a
CCE (%)	2.9(2.3)a	1.5(0.6)ab	1.3(0.6)b	0.5(0.0)c	0.5(0.1)c
OC (g kg^{-1})	1.0(0.5)a	0.4(0.1)b	0.3(0.1)bc	0.3(0.2)bc	0.2(0.1)c
TN (g kg^{-1})	0.1(0.0)a	0.0(0.0)b	0.1(0.0)a	0.1(0.1)a	0.0(0.0)b
TS	0.4(0.2)d	0.5(0.2)cd	0.8(0.3)c	1.5(0.2)b	2.8(0.3)a
P	31.1(9.2)a	10.0(1.2)b	8.6(1.1)b	7.7(1.1)b	8.8(1.7)b
Clay (%)	9.2(1.1)b	7.8(0.4)c	7.8(0.9)c	10.8(1.4)a	9.4(1.1)b
Silt (%)	17.3(2.4)a	13.2(1.3)b	11.1(0.8)cd	9.6(0.9)d	12.7(1.3)bc
Sand (%)	73.5(1.6)c	79.1(1.4)ab	81.1(1.1)a	79.6(2.1)ab	77.8(1.7)b
Aggregate stability	15.5(1.7)b	17.8(2.4)b	18.4(3.7)b	17.3(2.0)b	21.5(2.7)a
Porosity	57.8(2.1)c	67.4(3.9)a	63.1(1.3)b	64.7(1.6)b	64.7(0.5)b

Total Pb	1298(72)b	1567(181)a	1753(174)a	1286(115)b	1176(208)b
Total Cu	57(3.9)c	59(2.3)c	76(20)b	74(3.3)b	94(10)a
Total Zn	4120(940)a	2738(236)b	2268(276)b	3524(513)a	2364(234)b
Total Cd	7.8(2.0)a	4.7(0.6)b	4.3(0.5)b	6.4(1.4)a	4.5(0.4)b
Bioavailable Pb	49(20)a	12.6(3.2)b	0.7(0.1)c	8.8(1.5)b	0.6(0.2)c
Bioavailable Cu	1.3(0.3)b	0.9(0.24)b	1.0(0.1)b	3.3(0.7)a	3.2(0.2)a
Bioavailable Zn	83(21)c	39.8(20)c	60.9(8)c	823(79)a	290.6(20)b
Bioavailable Cd	0.5(0.0)c	0.3(0.1)c	0.4(0.1)c	2.7(0.6)a	1.0(0.1)b
Soluble Pb	0.7(0.1)a	0.1(0.0)b	0.0(0.0)c	0.1(0.0)b	0.0(0.0)c
Soluble Cu	0.1(0.0)c	0.1(0.0)c	0.1(0.0)c	1.7(0.3)b	2.2(0.2)
Soluble Zn	1.1(0.2)d	0.7(0.1)d	50.8(9)c	565(47)a	214.7(28)b
Soluble Cd	0.1(0.0)d	0.1(0.0)d	0.3(0.1)d	2.1(0.1)a	0.8(0.1)b

Rows with different letters indicate significant differences at $p < 0.05$.EC: electrical conductivity, CCE: calcium carbonate equivalent, OC: organic carbon, TN: total nitrogen, TS: total sulphur, P: phosphorus

After application of marble waste, CCE content in soil enhanced significantly by up to 2.9% in plot 1. Aided phytostabilization had a significant effect on OC values in plots 1 and 2 compared to the other plots (Table 3). Such increment could not be only related to the effect of organic amendments but also attributed to the development of vegetation cover. Some authors concluded that the application of pig slurry and pig manure in tailing ponds improve soil structure and promote microbial activity and population [23].

The amount of TN showed a significant increase in treated plots compared to the control, except for plot 2, whereas for the rest of samples the differences were not significant. After amendment application, the highest available P value was measured in the soil of plot 1 compared to the control (Table 3). Pig slurry and manure as a source of slow-release nutrients are rich in nutrients essential for vegetation such as N and P.

Our findings also indicated a significant positive correlation between the percentage of vegetation cover and the values of pH, CCE, OC, P and silt, while the contents of EC, TS and sand decreased with increasing the vegetation cover percentage (Table 3). Such positive correlation between pH, total organic carbon, available P and vegetation development was also observed by previous investigators [24]. The application of soil amendments contributed to the soil quality and fertility improvement facilitating a higher colonization of vegetation [25].

As the general conditions of the studied plots, including parent material and the management of phytoremediation process, have been similar, therefore the difference in the percentage of vegetation cover among plots could be attributed to different soil characteristics. For instance, plot 4 remained practically bare and exhibited differences for the soil properties, including pH, EC, TS and clay compared to the other vegetated plots. Many environmental processes (e.g. evapotranspiration, rainfall and runoff) and physical factors (e.g. topography) operating at various intensities over different scales give rise to a complex spatial variability of hydrological processes and thus different patterns of soil water content, soil properties and vegetation on and within a landscape [12]. Therefore, the different soil and vegetation characteristics of plot 4 might be attributed to the position of this plot in the tailing pond, which location is closest to non-rehabilitated areas and a slightly lower elevation than these areas, therefore on some occasions, it can receive runoff water from these non-rehabilitated areas. Inherent acidic conditions of this plot as well as accumulation of higher amounts of soluble and available metals, and salts from adjacent areas have made it toxic and undesirable to plant growth and prevented the vegetation establishment in such soil. Therefore, both the topographic position and amendment application could affect the soil properties and thus the vegetation cover of the studied plots and to somewhat created different variation patterns among the remediated groups.

3.3. Effect of aided phytostabilization on the availability of metals

The total metal concentrations in this tailing pond (Pb: 1176-1753, Cu: 57-94, Zn: 2268-4120 and Cd: 4.3-7.8 mg kg^{-1}) were lower than those in other contaminated mining districts under similar climatic conditions [26]. After the application of amendments and promotion of vegetation development, the values of total metals indicated a different trend in each plot as compared to the control, except for Cu that reduced in treated areas (Table 3). The purpose of aided phytostabilization technique is not to decontaminate the area, but to immobilize soil metals, reduce their availability to living organisms and thus minimize the risk to the environment and human health [27]. In this regard, no significant correlations were found between total concentrations of metals and vegetation cover percentage in treated plots, except for Cu, which confirmed this fact.

Regardless of the plot 4, available and soluble fractions of Cu, Zn and Cd were higher than the rest of studied plots (Table 3). This increase is probably attributed to the direct effect of soil pH. Contrarily, in plots 1, 2 and 3 the presence of carbonates and organic matter from the amendments promoted the formation of metal carbonates and complexation by organic matter [23] and therefore a decrease of available and soluble metals.

Available and soluble Pb in treated waste increased as compared to the control and the highest values of this metal were measured in plot 1. Krol et al. [28] found a strong dependence of heavy metals (Ni, Cd, Cu, Pb, Zn and Cr) leaching on the pH from metallurgical slag. They claimed that heavy metals concentrations decreased with an increase in the pH of the solution, except for Pb. Pb represented an upward release trend under alkaline conditions. In addition,

Plot 4 showed the highest concentrations of available and soluble Cu, Zn and Cd, this is likely due to the position of this area in the tailing pond [24]. During the intense precipitations, this lower elevation respect to not treated waste (control area) became waterlogged receiving runoff from this part of the tailing pond [25]. Due to the acidic nature of these waters, metal transportation from other contaminated adjacent areas as well as dried plants and plants residues enriched in heavy metals, in fact, the soil of plot 4 obtained the highest concentrations of bioavailable metals among the studied plots.

The results also revealed that the concentration of bioavailable Cu, Zn and Cd showed a negative significant correlation with the percentage of vegetation cover, whereas the correlation between bioavailable Pb and vegetation cover percentage was significantly positive. For Cu, Zn and Cd, exchangeable fraction of the soils in plots 1, 2 and 3 showed the lowest value, whilst that in the soils of plot 4 and control was the most dominant fraction (Figure 2). This result confirms the approach of phytostabilization regarding declining the bioavailability of metals in contaminated regions over time. Acosta et al. [25] also evaluated the suitability of aided phytostabilization on this tailing pond and reported that this technique decreased the mobility of metals mainly Pb, Zn and Cd. Furthermore, exchangeable fraction of metals in plot 3 showed a similar behavior to that in the control samples, probably owing to the lack of vegetation cover in this area.

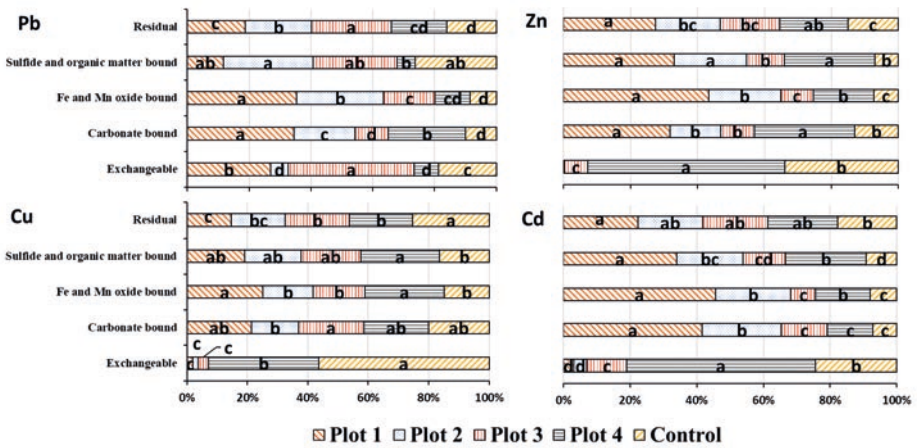


Figure 2. Distribution of Pb, Zn, Cu and Cd in the solid phases of studied plots

The exchangeable fraction of Zn, Cu and Cd significantly decreased with increasing the percentage of vegetation cover in treated soils. The highest and the lowest values of exchangeable phase were obtained in the plots 4 and 1, respectively. For Pb in control soil, the fraction with the highest concentrations and percentages was the oxidizable phase followed by exchangeable form. A significant high content of Pb bound to the oxidizable phase in this plot is likely attributed to the high content of sulphides in the surface layer. Similar result has been also reported on the tailing pond contaminated with Pb by Martínez-Martínez et al. [14]. After the application of amendments and vegetation establishment, the amount of exchangeable Pb in the soil decreased in the order: plot 3 > plot 1 > plot 2 = plot 4. Clearly, sequential extraction data of Pb did not follow a similar pattern to those of other metals.

4. Conclusions

Aided phytostabilization including the application of amendments along with vegetation of native species could significantly improve the chemical conditions of an acidic tailing pond, which resulted in the increment of vegetation cover percentage, richness and biodiversity index. Marble waste, pig slurry and manure were efficient in decreasing soil EC, TS and bioavailability of metals including Zn, Pb, Cu and Cd, while pH, $CaCO_3$, OC and TN were increased after application of these amendments. Besides the amendments, plots location was another factor that affected the soil properties and phytostabilization efficiency in the studied plots. Plot 4 due to its lower topography situation in the tailing pond receiving runoff water from the non-rehabilitated areas contained higher concentrations of heavy metals and remained bare. Therefore, this plot exhibited a trend similar to the control regarding the variation of soil characteristics after the reclamation strategy, which was confirmed by the results of sequential extraction analysis. Furthermore, pH, CCE, OC, TN and P were positively correlated with the percentage of vegetation cover, while a negative correlation was found between EC and TS and vegetation cover percentage. *A. halimus*, *P. miliaceum* and *P. saxatile* were the most dominant species stablished in the treated plots. This study showed that in relation to the establishment and growth of plants and consequently the efficiency of phytostabilization, even a slight change in slope can be a very critical factor that must be considered. Many researchers and managers ignore the examination of micro-topographic features as effective factors in phytoremediation process, and must be taking into account in remediation projects.

References

1. Karbowska B. Presence of thallium in the environment: sources of contaminations, distribution and monitoring methods. Environmental monitoring and assessment. 2016, 188(11), (1-19).
2. Conesa H.M., Faz Á., Arnaldos R. Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Unión mining district (SE Spain). Science of the total environment. 2006, 366(1), (1–11).
3. Confalonieri R., Jones B., Van Diepen K., Van Orshoven J. Scientific contribution on combining biophysical criteria underpinning the delineation of agricultural areas affected by specific constraints. Joint Research Centre- Institute for Environment and Sustainability. 2014
4. Wuana R. A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. International Scholarly Research Notices. 2011, (1–20).
5. Yang S.X., Liao B., Yang Z.H., Chai L.Y., Li J.T. Revegetation of extremely acid mine soils based on aided phytostabilization: A case study from southern China. Sci. Total Environ. 2016, 562, (427–434).
6. Costa J., Barbosa B., Fernando A. L. Wastewaters reuse for energy crops cultivation. In Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems. 2016, (507–514). Springer.
7. Mahar A., Ping W., Ronghua L.I., Zhang Z. Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: a review. Pedosphere. 2015, 25(4), (555–568).
8. Acosta J.A., Faz A., Martínez-Martínez S., Zornoza R., Carmona D. M., Kabas S. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation. Journal of Geochemical Exploration. 2011, 109(1–3), (8–17).
9. Barker A.V. Composition and uses of compost. In J. E. Rechcigl & H. C. Mackinnon (Eds.), Agricultural uses of by-products and wastes (pp. 140–162). ACS Symposium Series vol. 668. American Chemical Society. Washington, DC, USA. 1997.
10. Ye Z.H., Shu W. S., Zhang Z. Q., Lan C. Y., Wong M.H. Evaluation of major constraints to revegetation of lead/zinc mine tailings using bioassay techniques. Chemosphere. 2002, 47(10), 1103-1111.
11. Epelde L., Becerril J., Mijangos I., Garbisu C. Evaluation of the efficiency of a phytostabilization process with biological indicators of soil health. Journal of Environmental Quality. 2009, 38(5), 2041–2049.
12. Biswas, A. (2019). Joint multifractal analysis for three variables: Characterizing the effect of topography and soil texture on soil water storage. Geoderma, 334, 15–23.
13. Cross A.T., Zhong H., Lambers, H.. Incorporating rock in surface covers improves the establishment of native pioneer vegetation on alkaline mine tailings. Science Total Environment. 2021, 768, 145373.
14. Martinez-Martinez S., Acosta J. A., Cano A.F., Carmona D.M., Zornoza R., Cerda C.. Assessment of the lead and zinc contents in natural soils and tailing ponds from the Cartagena-La Union mining district, SE Spain. Journal of Geochemical Exploration. 2013, 124, 166–175.
15. Shannon C., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Chicago, IL. 1963.
16. Watanabe F.S., Olsen S. R. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO3 extracts from soil. Soil Science Society of America Journal. 1965, 29(6), 677–678.
17. USDA-NRCS. Soil Survey Laboratory Methods Manual (Vol. 42). Soil Survey Investigations Report, No. 42, Version 4. Nebraska. 2004.
18. Pueyo M., Lopez-Sanchez J.F., Rauret G. Assessment of CaCl2, NaNO3 and NH4NO3 extraction procedures for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils. Analytica chimica acta. 2004, 504(2), 217–226.
19. Ernst W.H.O. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants. Applied Geochemistry. 1996, 11(1–2), 163–167.
20. Risser J.A., Baker D.E. Testing soils for toxic metals. In R. . Westerman (Ed.), Soil Testing and Plant Analysis (3rd ed., Vol. 3, pp. 275–298). Soil Science Society of America, 3. Madison, Wisconsin. 2018.
21. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. Analytical Chemistry. 1979, 51, 844–851.
22. Li X., Coles B.J. Ramsey M.H., Thornton I. Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES. Chemical Geology. 1995, 124, 109–123.

23. Zornoza R., Faz Á., Carmona D.M., Acosta J.A., Martínez-Martínez S., De Vreng A. Carbon mineralization, microbial activity and metal dynamics in tailing ponds amended with pig slurry and marble waste. Chemosphere 2013, 90(10), 2606–2613.
24. Kabas S., Faz A., Acosta J. A., Zornoza R., Martínez-Martínez S., Carmona D. M., Bech J. Effect of marble waste and pig slurry on the growth of native vegetation and heavy metal mobility in a mine tailing pond. Journal of Geochemical Exploration. 2012, 123, 69–76.
25. Acosta J.A., Abbaspour A., Martínez G.R., Martínez-Martínez S., Zornoza R., Gabarrón M., Faz, A. Phytoremediation of mine tailings with Atriplex halimus and organic/inorganic amendments: A five-year field case study. Chemosphere. 2018, 204, 71–78.
26. De la Fuente C., Pardo T., Alburquerque J.A., Martínez-Alcalá I., Bernal M.P., Clemente R.. Assessment of native shrubs for stabilisation of a trace elements-polluted soil as the final phase of a restoration process. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2014, 196, 103–111.
27. Radziemska M., Koda E., Bilgin A., Vaverková M.D. Concept of aided phytostabilization of contaminated soils in postindustrial areas. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018, 15, 24–38.
28. Krol A., Mizerna K., Bozym M. An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. Journal of Hazardous Materials. 2020, 384-393.

Comparativa de biófertilizantes para el cultivó de *Helianthus annuus*

C. Ruiz[1,2], A. García[1,2], I. de Godos[1,2], R. Muñoz[1,2]

[1] Escuela de Ingeniería Forestal, Agronómica y de la bioenergía (EIFAB), Universidad de Valladolid, Campus Duques de Soria, 42004, Soria, España.

[2] Instituto de Procesos Sostenibles, Universidad de Valladolid, 47011, Valladolid, España

Abstract:

In this study, the growth of Helianthus annuus has been compared by monitoring the main parameters of the plant. The height, the dry weight, the diameter of the head and the production have been measured. It has been fertilized with three biofertilizers: digestate slurry, microalgae and a commercial NPK fertilizer. Both the irrigation dose and the substrate have been applied the same for all plants. They have been grown in pots, outdoors, located in a municipality in the province of Soria (Spain). Through this study, a greater growth has been verified through fertilization with microalgae, since these improve soil fertility by increasing its enzymatic and bacterial activity, thanks to nitrogen fixation and greater phosphorus assimilation.

Palabras clave: microalgas, dióxido de carbono, efecto invernadero, economía circular, suelos.

1. Introducción

Para solventar la carencia de nutrientes en los campos de cultivo en la actualidad se aplican fertilizantes sintéticos de forma intensiva.

Para la síntesis de estos fertilizantes químicos se necesitan altas cantidades de energía eléctrica, dando lugar a emisiones de CO_2 en todo el mundo. Los fertilizantes sintéticos dependen de los minerales extraídos de las rocas, el P es un recurso que podría agotarse en 50 – 100 años. Además, los fertilizantes sintéticos no son asimilables en cuanto al fosforo se refiere por parte de las plantas, solamente absorben entre el 30% y el 45% del P suministrado [1] El fósforo no asimilado se filtra o se transporta por escorrentía y acaba en zonas fluviales, donde puede ser un contaminante para el medio ambiente [2]. Por tanto, es necesario buscar alternativas a los fertilizantes químicos, mediante sistemas que fijen nutrientes de una forma eficiente y respetuosa con el medio ambiente [3].

El estiércol se ha utilizado como fertilizante ya que posee gran carga en nutrientes beneficiosos para el desarrollo de los cultivos, además, la materia orgánica evita la acidificación de los suelos con el paso del tiempo. Sin embargo, el estiércol posee metales pesados como mercurio (Hg), cobre (Cu), arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr) y níquel (Ni) presentes en los piensos de alimentación animal. Si se emplea el estiércol como fertilizante, se produciría una contaminación de los suelos, por la fijación de metales pesados. También preocupa la gran cantidad de patógenos que poseen los estiércoles, que pueden llegar por escorrentía a cauces de agua para consumo humano y son capaces de causar enfermedades a la población. Además, los patógenos pueden llegar a los alimentos y transmitirse por esta vía a los seres humanos. Los más comunes son: Campylobacter, Listeria monocytogenes, Escherichia coli y Salmonella [4].

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos que se encuentran en la mayor parte de los ecosistemas del planeta. El interés en el cultivo de microalgas es muy amplio ya que tienen diferentes usos, para producción de biocombustibles biodiesel o bioetanol, como sumidero de CO_2, para depuración de aguas residuales [5],[6]. Además, poseen suplementos con macro y micronutrientes como la espirulina, y bioestimulantes [7]. También poseen moléculas que promueven y regulan el crecimiento de las plantas, como las auxinas, giberelinas y citoquininas, además de polisacáridos y compuestos antioxidantes e inhibidores de patógenos[8]. Por tanto, numerosos estudios se centran en el análisis del uso de las microalgas como fertilizante para diferentes cultivos que aporten beneficios a las plantas. Las microalgas con nutrientes disueltos son asimiladas por las plantas por las raíces, y en comparación con otros fertilizantes, a través de las hojas [9]. Los fertilizantes en base de algas se utilizan como fertilizantes de liberación lenta de nutrientes [4]. Además, la fertilización con microalgas puede mejorar la fertilidad del suelo de cultivo al mejorar la actividad enzimática y bacteriana del suelo, gracias a la fijación de nitrógeno [8].

2. Materiales y métodos

En este artículo se realiza un ensayo para comparar el desarrollo del cultivo de girasol aplicando diferentes fertilizantes, tanto fertilizantes comerciales como diferentes biofertilizantes.

Los girasoles se plantaron en macetas de 30 L, con una superficie de 1385 cm^2, la fecha de plantación corresponde al 18 de junio del 2022. Se emplearon semillas hibrido de girasol de la variedad Gibraltar®. Se sembraron en las mismas condiciones y utilizando la misma calidad de tierra, para todas las plantas. La tierra procede de un campo de cultivo ubicado en el término municipal de Bayubas de Arriba (Soria).

Se utilizaron 3 biofertilizantes: purín de cerdo procedente de una granja de cebo localizada en Sauquillo de Boñices, Soria (España). Otro biofertilizante fue digestato, procedente de la digestión

anaerobia del purín de cerdo citado anteriormente, la digestión anaerobia se realizó en digestores de 600 ml en los laboratorios de la Universidad de Valladolid (Soria). Otro biofertilizante empleado fue microalgas, este biofertilizante se obtiene mediante el cultivo de estas en un fotobiorreactor de 32 l de capacidad, empleando como fuente de nutrientes purín de cerdo diluido 1:30. Además, se utilizó un fertilizante sintético de única aplicación NPK Duramón®. Así se pretende comparar el crecimiento de las plantas de girasol utilizando fertilizantes comerciales y de origen biológico.



Figura 26. A la izquierda plantas a 3/09/22, y a la derecha plantas a 16/09/2022.

Los ensayos se realizaron por triplicado para los 4 fertilizantes además de un control sin fertilizar (blanco), en total se sembraron 15 macetas. Los fertilizantes se aplicaron cuando las plantas tenían unos 10 cm de altura. Se hizo seguimiento de la longitud de las plantas durante el ensayo y tamaño de la inflorescencia en el periodo de marchitamiento de los pétalos, (HD) diámetro de la cabeza. Así como medición al final del ensayo de: (TW) peso total de la planta, (NS) número de semillas por cabeza, (SW) [10].

Respecto a las necesidades nutricionales, se recomienda una dosis de: 80 kilogramos por hectárea de nitrógeno. 20 kilogramos por hectárea de fósforo [11], [10]. Se realizó analítica de nitrógeno total Kjeldahl (NTK) de los fertilizantes aplicados, y se dosificaron en base a la concentración de nitrógeno presente en cada uno de los fertilizantes. Ver tabla 1.

Se aplicó 366.219 ml de purín, 5570.655 ml de microalgas, 362.859 ml de digestato, 5540.00 de fertilizante NPK por triplicado.

Tabla 14. Dosis aplicadas de cada fertilizante

	NTK (g/l)	Dosis recomendada (kg/ha)	Dosis recomendada (mg/cm²)	Superficie (cm²)	Masa N (mg)	Dosis de biofertilizante (ml)
Purín	3.026	80	0.8	1385	1108	366.219
Microalgas	0.199	80	0.8	1385	1108	5570.655
Digestato	3.054	80	0.8	1385	1108	362.859
	NTK (%)	**Dosis recomendada (kg/ha)**	**Dosis recomendada (mg/cm²)**	**Superficie (cm²)**	**Masa N (mg)**	**Dosis de biofertilizante (mg)**
Fertilizante NPK	20	80	0.8	1385	1108	5540.000

El ensayo tiene una duración desde el mes de junio hasta el mes de octubre. La dosis de riego recomendada durante todo el ensayo es de 420 l/m², aplicando una dosis equitativa semanal por planta de unos 3 l. Todas las muestras se han expuesto a las mismas condiciones de temperatura y precipitación [12], [11].

Tabla 15. Dosis de riego

Meses	Litros/m² mes	ml/cm² mes	Superficie (cm²)	Dosis ml/mes	Dosis ml/día	Dosis ml/Semana
Junio	93.3	9.3	1385.0	12926.7	430.9	3016.2
Julio	93.3	9.3	1385.0	12926.7	430.9	3016.2
Agosto	93.3	9.3	1385.0	12926.7	430.9	3016.2
Septiembre	93.3	9.3	1385.0	12926.7	430.9	3016.2
Octubre	93.3	9.3	1385.0	12926.7	430.9	3016.2

3. Resultados y discusión

3.1. Analítica de fertilizantes

Se realizaron analíticas de los fertilizantes aplicados para la caracterización de su contenido en nitrógeno (N) y fósforo (P). En la siguiente tabla se presenta la concentración en mg/l de N y P que contiene los siguientes biofertilizanes y en % para el fertilizante comercial.

Tabla 16. Contenido de nitrógeno y fósforo en los fertilizantes aplicados

	Concentración (mg/l)			%
	Purín	**Digestato**	**Microalgas**	**NPK**
Nitrógeno (NTK)	3025.5	3053.5	198.9	20.0
Fósforo ($P\text{-}PO_4^{3-}$)	197.2	244.3	34.9	10.0

Se aplicó la dosis de fertilizante a partir de la concentración de N y se calculó la cantidad de P que se aplicó. En la siguiente tabla aparece la cantidad en mg de N y P que se aplicó en cada maceta.

Tabla 17. Cantidad de nitrógeno y fósforo aplicado a cada

	Cantidad aplicada (mg)			
	Purín	**Digestato**	**Microalgas**	**NPK**
Nitrógeno (NTK)	1108.0	1108.0	1108.0	1108.0
Fósforo ($P\text{-}PO_4^{3-}$)	72.2	88.6	194.5	241.8

3.2. Estudio del crecimiento

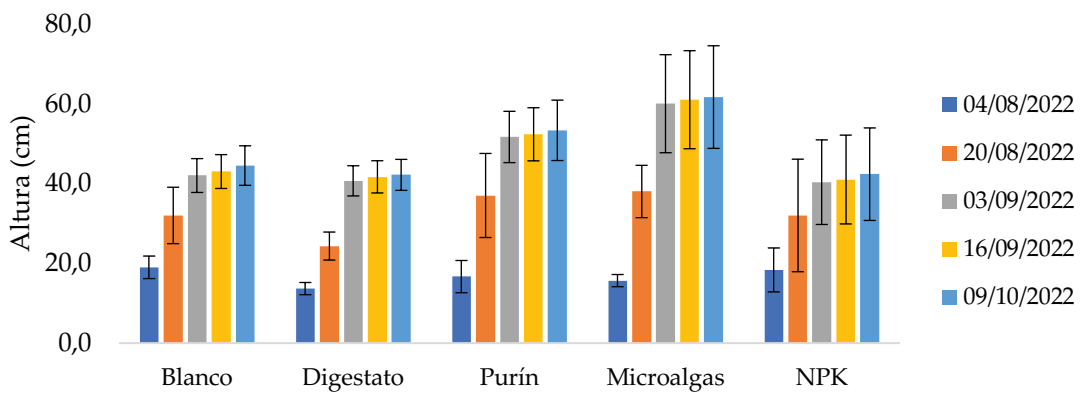


Figura 27. Crecimiento medio durante el ensayo.

El periodo de mayor crecimiento de las plantas se observa desde el primer mes hasta el segundo desde su plantación. A partir del desarrollo del capítulo hasta la maduración, se ralentizó el crecimiento.

El digestato y el NPK apenas presenta mejora en el crecimiento de las plantas, como se puede comprobar en la media del peso y la altura de las plantas (ver figura 2 y 3). El purín si que ofrece una mejora en el crecimiento 35,34% con respecto al blanco. El fertilizante a base de

microalgas ofrece un mayor incremento en el crecimiento de las plantas con un 130,44% con respecto al blanco.

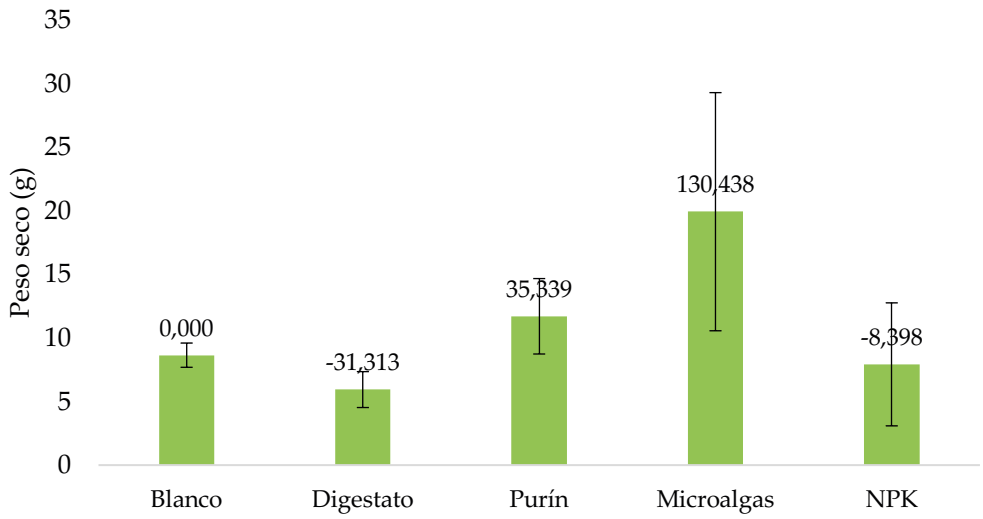


Figura 28. Porcentaje de mejora del peso seco al aplicar biofertilizantes con respecto al blanco.

El diámetro del capítulo y el número de semillas en este tienen relación, como se observa en las figuras 4 y 5. El digestato y el NPK apenas ofrecen mejoría. Sin embargo, se observa un incremento con el purín y con las microalgas.

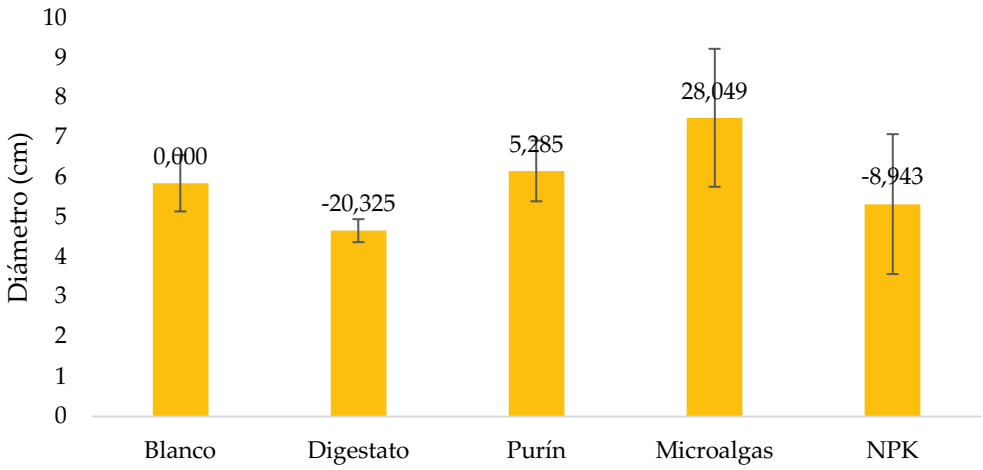


Figura 29. Crecimiento del capítulo.

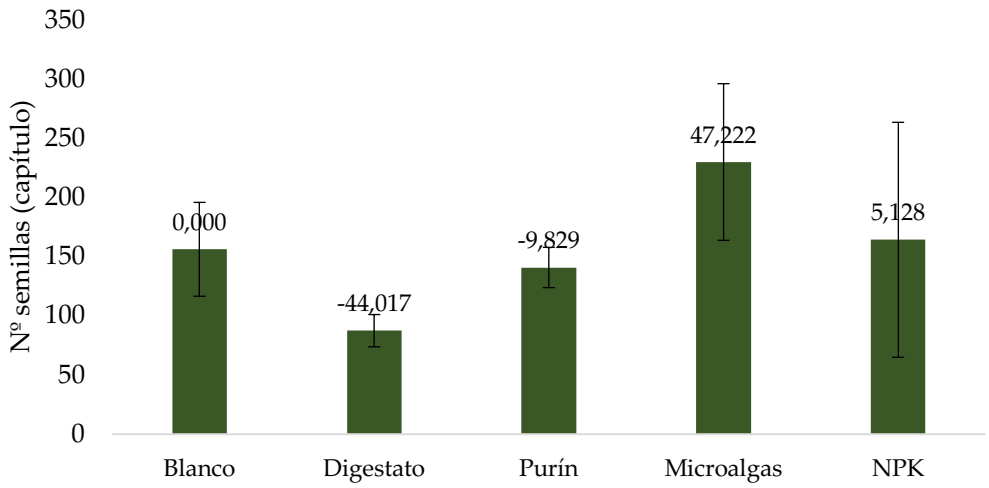


Figura 30. Número de semillas por capítulo.

Según los resultados, el biofertilizante que mejores parámetros ha proporcionado de crecimiento y producción es el obtenido de la biomasa algar. La mejora que se consigue con digestato y NPK respecto al blanco no es representativa.

El contenido de fósforo que poseen las microalgas es mayor que el que pose el purín y el digestato (ver tabla 4), es por esto por lo que puede explicarse un mayor crecimiento en plantas cultivadas con microalgas. Sin embargo, se aplicó un mayor contenido en fósforo por medio del fertilizante comercial (NPK), 47.3 mg más que la dosis aplicada con las microalgas y el crecimiento con NPK fue inferior. Por consiguiente, no influye el crecimiento de las plantas en la concentración de fósforo, sino en la capacidad que posee el biofertilizante para su asimilación por parte de las plantas.

4. Conclusiones

Las microalgas se pueden aplicar de forma directa como biofertilizante para cultivos como girasol *Helianthus annuus.* Las microalgas son capaces de incrementar la fertilidad del suelo por medio de la fijación de nitrógeno, aumentar la actividad enzimática y bacteriana en este. El contenido de nitrógeno aplicado ha sido el mismo en todos los ensayos por tanto el mayor crecimiento observado en las plantas que poseen microalgas como biofertilizante, puede deberse a las moléculas que poseen las microalgas, las cuales promueven y regulan el crecimiento de las plantas. Estas moléculas son: auxinas, giberelinas y citoquininas, además de polisacáridos y compuestos antioxidantes.

5. Agradecimientos

Este trabajo se desarrolla en base al proyecto LIFE Smart Agromobility, el cual se desarrolla en el contexto del programa LIFE y el subprograma de acción por el clima impulsado por la Comisión Europea.

Referencias

[1] A. Oita, F. Wirasenjaya, J. Liu, E. Webeck, and K. Matsubae, "Trends in the food nitrogen and phosphorus footprints for Asia's giants: China, India, and Japan," *Resour Conserv Recycl*, vol. 157, p. 104752, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2020.104752.

[2] E. K. Lee, X. Zhang, P. R. Adler, G. S. Kleppel, and X. X. Romeiko, "Spatially and temporally explicit life cycle global warming, eutrophication, and acidification impacts from corn production in the U.S. Midwest," *J Clean Prod*, vol. 242, p. 118465, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.118465.

[3] S. Huo *et al.*, "The influence of microalgae on vegetable production and nutrient removal in greenhouse hydroponics," *J Clean Prod*, vol. 243, p. 118563, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.118563.

[4] Q. Lu and Y. Xiao, "From manure to high-value fertilizer: the use of microalgae as a nutrient carrier for sustainable agriculture," *Algal Res*, vol. 67, p. 102855, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.ALGAL.2022.102855.

[5] M. P. Sudhakar and S. Viswanaathan, "Algae as a Sustainable and Renewable Bioresource for Bio-Fuel Production," *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Microbial Biotechnology in Agro-environmental Sustainability*, pp. 77–84, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-444-64191-5.00006-7.

[6] M. S. Kumar and V. Buddolla, "Future Prospects of Biodiesel Production by Microalgae: A Short Review," *Recent Developments in Applied Microbiology and Biochemistry*, pp. 161–166, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-816328-3.00012-X.

[7] L. Islas-Weinstein and J. L. Maldonado-García, "Immunomodulatory Supplements," *Encyclopedia of Infection and Immunity*, pp. 777–790, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-818731-9.00132-4.

[8] R. C. Shrestha *et al.*, "The effects of microalgae-based fertilization of wheat on yield, soil microbiome and nitrogen oxides emissions," *Science of The Total Environment*, vol. 806, p. 151320, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.151320.

[9] M. R. Suchithra *et al.*, "Effectiveness of green microalgae as biostimulants and biofertilizer through foliar spray and soil drench method for tomato cultivation," *South African Journal of Botany*, vol. 146, pp. 740–750, May 2022, doi: 10.1016/J.SAJB.2021.12.022.

[10] J. García-López, I. J. Lorite, R. García-Ruiz, R. Ordoñez, and J. Dominguez, "Yield response of sunflower to irrigation and fertilization under semi-arid conditions," *Agric Water Manag*, vol. 176, pp. 151–162, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.AGWAT.2016.05.020.

[11] M Díaz-Zorita y MV Fernández Canigia, "Areas homogéneas de producción agrícola en la provincia de Buenos Aires, Argentina," 1996.

[12] J. C. M. y F. J. B. Alfredo Bono, "FERTILIZACION EN GIRASOL," pp. 1–26, 1999.

Modelización de los fenómenos de nitrificación en redes de distribución de aguas regeneradas

Ignacio Gómez Lucena[1], Emilio Camacho Poyato[1], Juan Antonio Rodríguez Díaz[1]

[1] Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba; g72golui@uco.es, ecamacho@uco.es, jarodriguez@uco.es

Abstract: the present work consists of the development of a model to simulate the nitrification reactions in reclaimed irrigation water distribution networks. These models are important since the chemical composition of reclaimed water varies throughout the year, but also changes along the distribution network. It has been observed that nitrate concentrations increase across the irrigation network in contrast to the reduction observed in the ammoniacal forms. It confirms that nitrification processes are occurring. In order to carry out a precision fertigation, it is necessary to determine the quality of the water arriving at the farms. In many cases, the nutrients reclaimed water carries already satisfy the nutritional needs of the crop. This allows for a reduction in the amount of fertiliser applied to the soil, which leads to a costs reduction and has a significant positive impact on the environment. [1] [2,3]

Palabras clave: nitrógeno, regeneración, modelos, fertirrigación

1. Introducción

Las aguas regeneradas son aguas residuales procedentes de núcleos urbanos o actividades industriales que han sido tratadas en una estación depuradora. Este tratamiento permite que vuelvan a ser utilizadas con diversos fines, como el riego de cultivos y áreas verdes, fines industriales, la limpieza de calles o la extinción de incendios, entre otros.

Las aguas regeneradas, por su naturaleza, son muy ricas en nutrientes, entre los que destaca el nitrógeno. Por este motivo, presentan una gran aptitud para ser empleadas en el riego agrícola. Las formas nitrogenadas que más abundan en las aguas regeneradas son el amoníaco, el ion amonio y el ion nitrato. También está presente, en menor medida, el ion nitrito. La nitrificación es un proceso bioquímico llevado a cabo por bacterias nitrificantes, que se completa en dos etapas. En el primer paso, el ion amonio (NH_4^+) se oxida a ion nitrito (NO_2^-); en el segundo paso, el ion nitrito se oxida a ion nitrato (NO_3^-). La oxidación del amonio es llevada a cabo por las bacterias oxidantes del amonio (AOB). La oxidación de nitrito a nitrato es llevada a cabo por las bacterias oxidantes del nitrito (NOB). Los procesos de nitrificación están afectados por diversos factores, destacando el pH, la concentración de oxígeno disuelto en agua, la temperatura, y la cantidad de sustrato inicial (amonio y nitrito).

Estudios previos en comunidades de regantes que emplean aguas regeneradas han demostrado que la calidad de las aguas regeneradas (haciendo referencia a su composición química) varía a lo largo del año, pero también varía a nivel espacial dentro de la red de distribución. Se ha observado que los puntos más distantes de la estación de bombeo reciben agua con una mayor concentración de nitratos, lo que evidencia una clara nitrificación a lo largo de la red. Para realizar una fertirrigación de precisión, es necesario conocer con exactitud la calidad del agua que llega a las parcelas. De este modo, el abonado debe tener en cuenta y complementar los nutrientes que ya incorpora el agua regenerada. Por este motivo, se ha desarrollado un modelo que permite simular estas reacciones de nitrificación y determinar la calidad del agua que llega a cada parcela en una red de riego.

2. Materiales y métodos

2.1. Zona de estudio

El modelo se ha desarrollado a partir de los datos de calidad de agua tomados entre 2018 y 2020 en la Comunidad de Regantes (CR) de Tintín (Montilla, Córdoba). Esta CR recibe el agua regenerada procedente de la Estación de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) de Montilla. La CR cuenta con una extensión de 650 ha, en las que predomina el cultivo del olivo. El riego se realiza mediante goteo subterráneo, con goteros autocompensantes de 2,2 L/h, espaciados a 1 metro y enterrados a una profundidad de 40 cm.

El agua regenerada procedente de la EDAR es conducida a una balsa de decantación, y posteriormente, a una balsa de almacenamiento, donde se aplica un tratamiento de ultrasonidos para reducir la concentración de algas. A continuación, el agua pasa al sistema de impulsión, que se encarga de dotar a la corriente de la energía suficiente para alcanzar todos los puntos de la CR, satisfaciendo los requisitos de presión mínima. La filtración del agua se realiza mediante un sistema de filtros de mallas.

2.2. Modelización hidráulica

La red de distribución de la CR Tintín se ha modelizado en Epanet [1], para estudiar su comportamiento hidráulico. A cada nodo se le ha asignado su demanda base y los turnos de riego se han modelizado mediante un patrón de demanda. La implantación de la red en este software también ha sido necesaria para calcular los tiempos de viaje del agua. La calidad del agua que llega a cada nodo es función del tiempo que tarda el agua en llegar desde el sistema de impulsión hasta el nodo en cuestión [2]. Para correr el software Epanet en el lenguaje de programación Python, se ha empleado la librería Epanet Python Toolkit (EPyT), que permite realizar simulaciones hidráulicas de la red y calcular los tiempos de viaje del agua desde el sistema de impulsión hasta los nodos que conforman la red de distribución.

2.3. Modelización de la nitrificación

Para simular los procesos de nitrificación en la red de distribución se ha adaptado el modelo desarrollado por Le et al. [3] para corrientes libres. Este modelo es aplicable únicamente en condiciones de abundancia de oxígeno y temperatura adecuada Como principal novedad, el modelo desarrollado en este trabajo trata de simular las reacciones de nitrificación en condiciones no óptimas de temperatura y oxígeno disuelto. Además, incorpora el efecto que tienen los siguientes factores sobre la velocidad de las reacciones de nitrificación:

- Concentración de amonio
- Concentración de nitrito
- pH
- Concentración de oxígeno disuelto en agua
- Temperatura

La influencia de estos factores (Figura 2) se ha determinado por separado para las AOB y las NOB. Estos parámetros toman valores de 0 a 1, donde 0 implica una inhibición total de la nitrificación, y 1 implica que las condiciones son óptimas para el desarrollo de la reacción. Para cuantificar estos valores se ha revisado bibliografía al respecto [4], [5], [6], [7], en la que se estudia el efecto de cada uno de estos factores sobre la velocidad de la nitrificación por separado.

Este modelo también simula el efecto que la propia nitrificación tiene sobre el pH del medio y la concentración de oxígeno disuelto. Estos dos parámetros afectan a la velocidad de las reacciones, pero las reacciones de nitrificación también afectan a los valores de pH y oxígeno

disuelto. A medida que amonio y nitrito son oxidados, el pH se reduce y la concentración de oxígeno disuelto en agua disminuye, ya que las reacciones de nitrificación liberan protones al medio y consumen oxígeno. Estos dos fenómenos son simulados mediante dos ecuaciones diferenciales. El modelo se compone de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dNH_4}{dt} = -k_a * \theta_{pH} * \theta_T * \theta_{NH4} * \theta_{OD} * NH_4 \quad (1)$$

$$\frac{dNO_2}{dt} = k_a * \theta_{pH} * \theta_T * \theta_{NH4} * \theta_{OD} * NH_4 - k_n * \theta_{pH}' * \theta_T' * \theta_{NO2} * \theta_{OD}' * NO_2 \quad (2)$$

$$\frac{dNO_3}{dt} = k_n * \theta_{pH}' * \theta_T' * \theta_{NO2} * \theta_{OD}' * NO_2 \quad (3)$$

$$\frac{dOD}{dt} = a * \frac{dNH_4}{dt} + b * \frac{dNO_3}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dpH}{dt} = c * \frac{dNH_4}{dt} \quad (5)$$

Donde NH_4 es la concentración de amonio (mg/L); k_a es la constante de oxidación del amonio (h-1); θ_{pH} es el factor de inhibición por pH para las AOB; θ_T es el factor de inhibición por temperatura para las AOB; θ_{NH4} es el factor de inhibición por concentración de sustrato para las AOB; θ_{OD} es el factor de inhibición por concentración de oxígeno disuelto en agua para las AOB; NO_2 es la concentración de nitrito (mg/L); k_n es la constante de oxidación del nitrito (h-1); θ_{pH}' es el factor de inhibición por pH para las NOB; θ_T' es el factor de inhibición por temperatura para las NOB; θ_{NO2} es el factor de inhibición por concentración de sustrato para las NOB; θ_{OD}' es el factor de inhibición por concentración de oxígeno disuelto en agua para las NOB; OD esa la concentración de oxígeno disuelto en agua (mg/L); a y b son parámetros adimensionales que relacionan el consumo de oxígeno con la variación de la concentración del amonio y el nitrato; NO_3 es la concentración de nitrato (mg/L), pH es el valor de pH del agua; c es un parámetro adimensional que relaciona la variación del pH con la variación de la concentración de amonio.

Estas ecuaciones, así como la influencia de los factores de inhibición, han sido implementados en el lenguaje de programación Python. Para facilitar la programación, elaborar gráficas y resolver las ecuaciones diferenciales se han empleado las siguientes librerías: *numpy*, *pandas*, *scipy.integrate* y *matplotlib.pyplot*.

2.4. Calibración del modelo

Para calibrar las ecuaciones y los parámetros del modelo se han empleado datos de calidad de agua tomados en diferentes puntos de la red de distribución de la CR Tintín a lo largo de tres campañas de riego (2018, 2019, 2020).

Los parámetros de calidad de agua que se han analizado para desarrollar el modelo son los siguientes:

- Concentración de amonio (NH4+) en mg/L
- Concentración de nitrato (NO3-) en mg/L
- pH
- Temperatura del agua en ºC

- Concentración de oxígeno disuelto en agua, en mg/L

Con los datos reales de calidad de agua se ha calculado la variación de estos parámetros entre el sistema de impulsión y cada nodo de la red. Estas variaciones se han relacionado con el tiempo de viaje del agua (previamente calculado) y, de este modo, se han calibrado las ecuaciones que integran el modelo.

Para calibrar las ecuaciones que simulan el consumo de oxígeno y la variación del pH durante las reacciones, se emplea la librería pyMCMCstat de Python. Esta librería integra los métodos de Monte Carlo basados en Cadenas de Markov (MCMC). Los métodos MCMC son una clase de algoritmos utilizados para simular y analizar modelos estadísticos y matemáticos complejos. Estos algoritmos se basan en las cadenas de Markov, que son procesos estocásticos en donde la probabilidad de que ocurra un evento x_n depende exclusivamente del estado anterior x_{n-1}.

La idea central de los métodos MCMC es construir una cadena de Markov que se aproxime gradualmente a la distribución de probabilidad deseada. En cada paso de la cadena, se propone un nuevo estado aleatorio, que se acepta o se rechaza comparando el resultado obtenido con la distribución de probabilidad objetivo. A medida que la cadena avanza, la distribución de probabilidad de los estados visitados se aproxima a la distribución de probabilidad objetivo.

Los métodos MCMC son muy utilizados en diversas áreas, como la estadística, la física, la biología o la informática, entre otras. Algunos ejemplos de su aplicación incluyen el análisis de datos bayesianos, la simulación de modelos estocásticos y la estimación de parámetros en modelos matemáticos. Estos métodos requieren de alta capacidad de computación, ya que el algoritmo converge a partir de un número elevado de iteraciones (1000, 10000, 100000…). Pero si el algoritmo se implementa correctamente, y los datos tienen capacidad explicativa, la convergencia de la cadena está garantizada.

3. Resultados y discusión

3.1. Modelización hidráulica

Tras implementar la red de distribución de la CR Tintín en el software Epanet, se obtiene una vista general de la misma, y se puede proceder a realizar simulaciones hidráulicas y calcular el tiempo de viaje del agua, desde el sistema de impulsión hasta cada uno de los nodos que conforman la red de distribución de la CR.

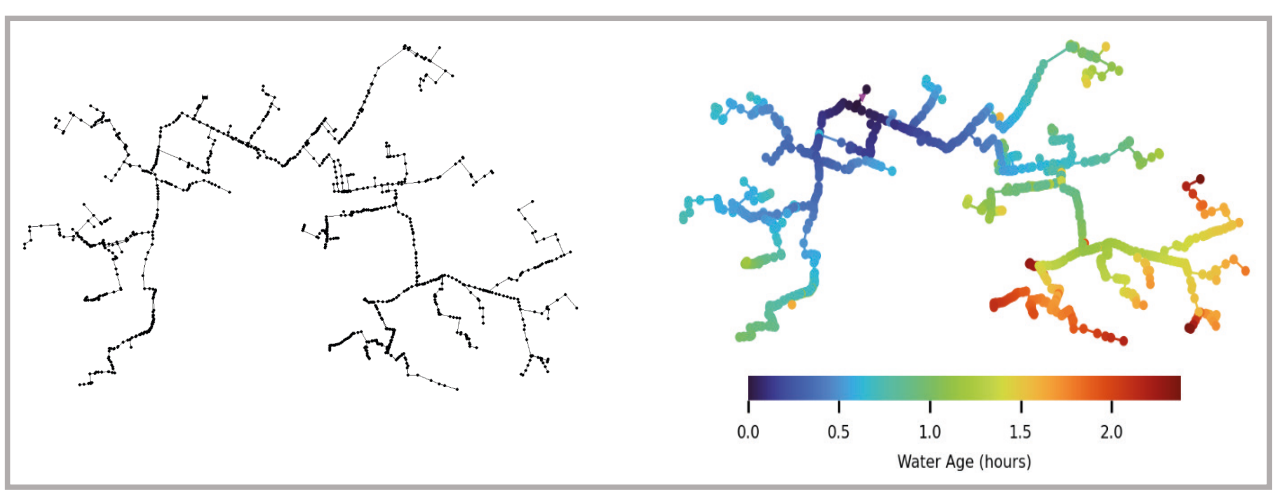


Figura 32. Red de distribución de la CR Tintín y tiempos de viaje

3.2. Parámetros del modelo

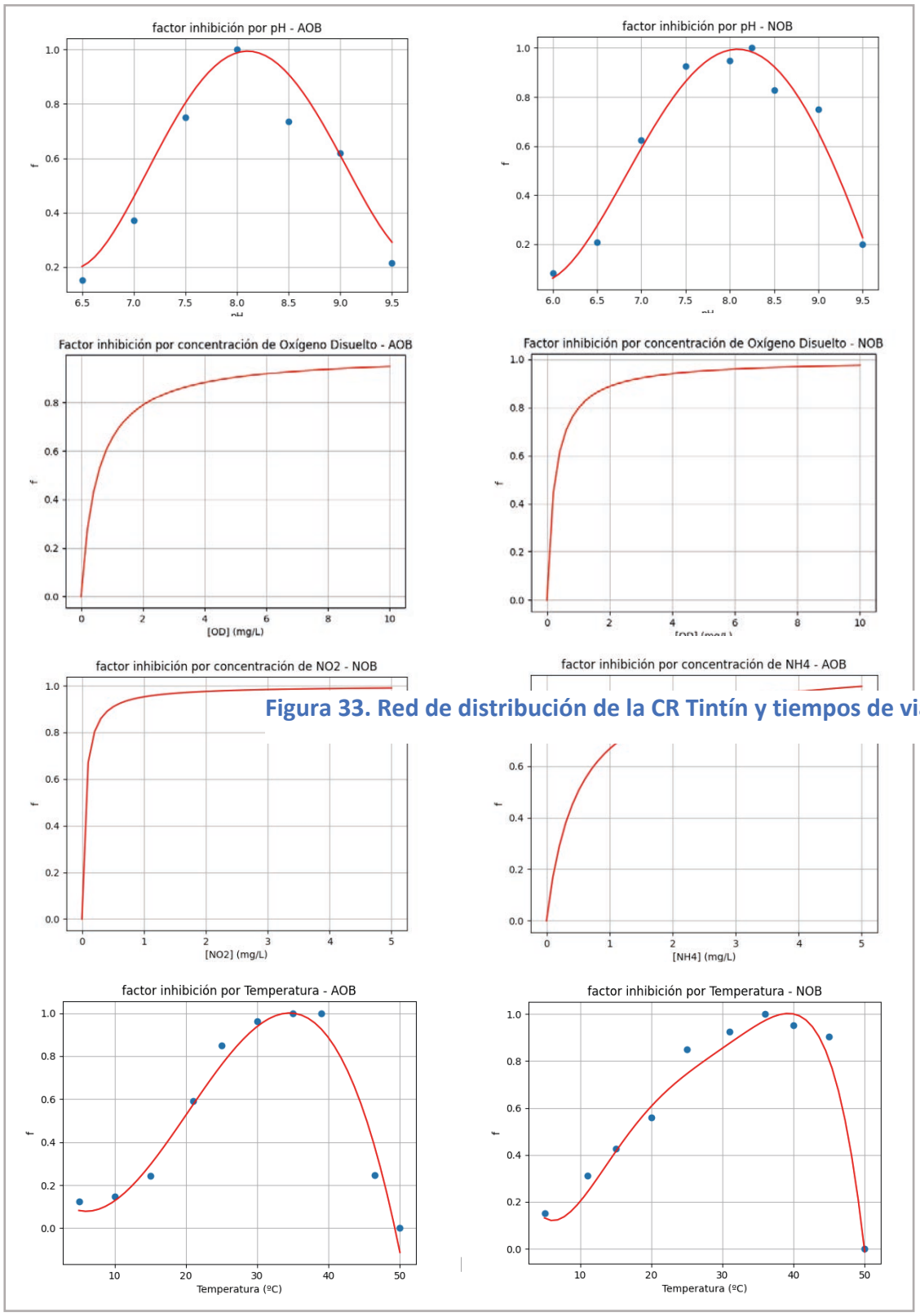


Figura 33. Red de distribución de la CR Tintín y tiempos de viaje

Figura 2. Parámetros del modelo

Como se muestra en la Figura 2, los diferentes parámetros, que son factores de inhibición, toman valores entre 0 y 1. Estos factores representan la influencia en la nitrificación de la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto y la concentración de sustrato, de forma separada, para las AOB y las NOB. El pH óptimo se sitúa en torno a entre 7,5 y 8,5. La temperatura óptima es de 35 ºC para las AOB, y de 38 ºC para las NOB. No obstante, las bacterias nitrificantes se desarrollan bien en un amplio intervalo de temperatura.

Parámetro	Media	Unidad	Error estándar
a	1,2	Admiensional	0,13
b	-0,15	Admiensional	0,14
c	0,26	Admiensional	0,07
k_a	0,75	h^{-1}	-
k_n	1,46	h^{-1}	-

Tabla 1. Resultados de la calibración de las constantes

3.3. Ajuste del modelo

A continuación, se muestran dos simulaciones realizadas con el modelo, y sus respectivas comparaciones con los datos reales de calidad de agua, para comprobar el ajuste. El modelo requiere que las condiciones iniciales sean introducidas manualmente. A partir de unos valores iniciales introducidos de pH, temperatura, oxígeno disuelto en agua, concentraciones de amonio, nitrito y nitrato, el modelo es capaz de simular las transformaciones químicas que tienen lugar durante el proceso de nitrificación en la red

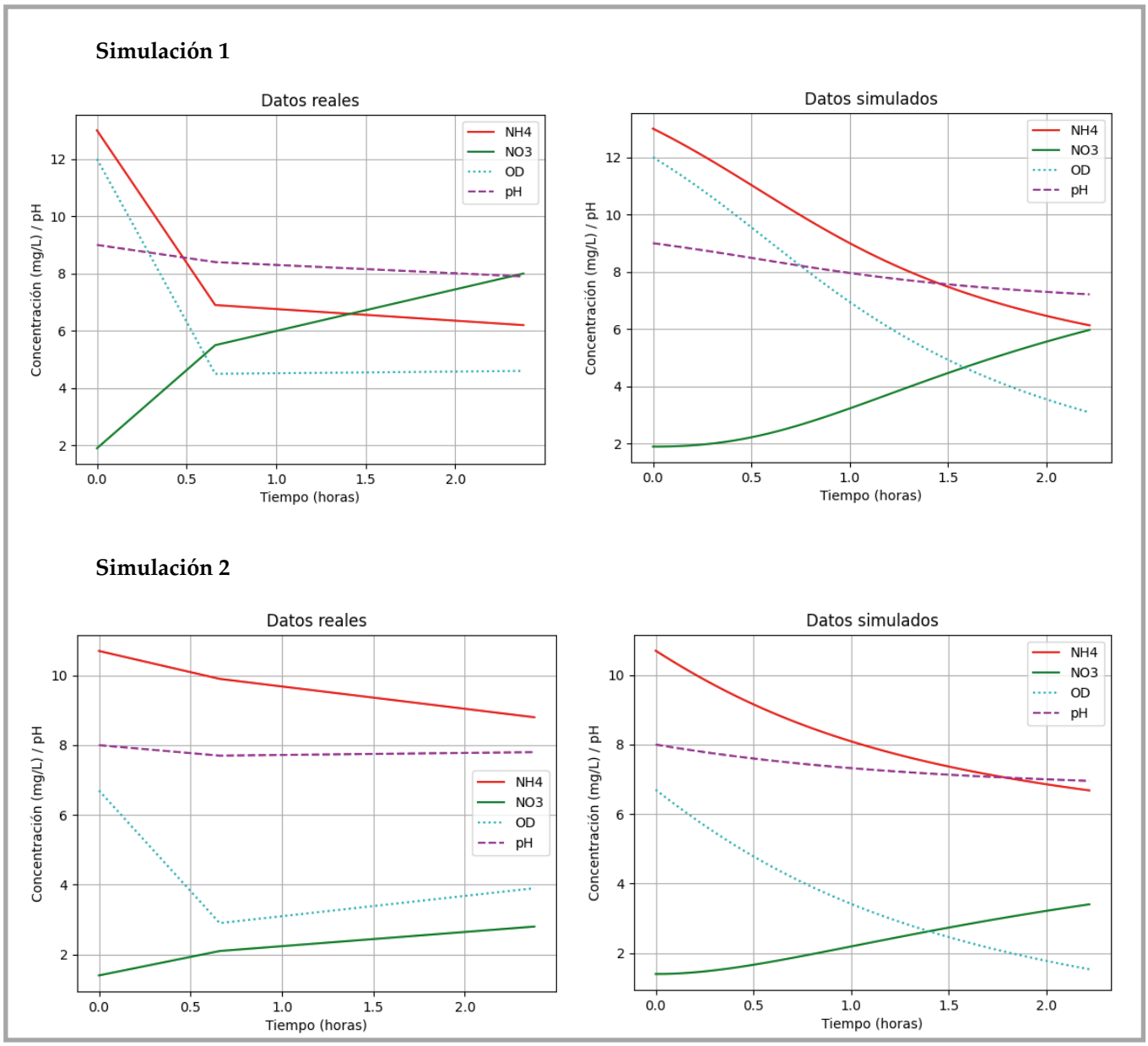


Figura 3. Ajuste del modelo

4. Conclusiones

Modelizar los procesos de nitrificación en redes de riego resulta de vital importancia para determinar la calidad del agua que llega a cada regante dentro de una comunidad. Esto permite ajustar el plan de fertilización.

Las reacciones de nitrificación son extremadamente complejas y dinámicas, influenciadas por diversos factores y difíciles de modelizar con precisión.

El modelo desarrollado constituye una primera aproximación para simular las reacciones de nitrificación en redes de riego que emplean aguas regeneradas. Este modelo continuará en desarrollo y se perfeccionará con los datos de calidad de agua que se tomarán en la campaña 2023.

5. Referencias

29. L. Rossman, H. Woo, F. Tryby. EPANET 2.2 User Manual. U.S. Environmental Protection Agency. 2020.
30. C. Alcaide, I. Fernández, I. Martín, E. Camacho, J. Rodríguez. Spatio-temporal analyisis of nitrogen variations in an irrigation distribution network using reclaimed water for irrigation olive trees. Agricultural Water Management. 2022, vol. 262
31. H. Le, J. Fettig, G. Meon. Kinetics and simulation of nitrification at various pH values of a polluted river in the tropics. Ecohydrology and Hydrobiology, vol. 19, no. 1. 2019, pp. 54-65.
32. C. Grunditz, G. Dalhammar. Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of Nitrosomonas and Nitrobacter. Water Research, vol. 35, no. 2. 2001, pp. 433-440.
33. H. Daebel, R. Manser, W. Gujer. Exploring temporal variations of oxygen saturation constants of nitrifying bacteria. Water Research, vol. 41, no. 5. 2007, pp. 1094-1102.
34. V. Pambrun, E. Paul, M. Spérandio. Modeling the partial nitrification in sequencing batch reactor for biomass adapted to high ammonia concentrations. Biotechnology and Biotengineering, vol. 95, no. 1. 2006, pp. 120-131.
35. R. Jones, P. Dold, I. Takács, K. Chapman, B. Wett, S. Murthy, M. Shaughnessy. Simulation for operation and control of reject water treatment processes. Proceedings of the Water Environment Federation, vol. 2007, no. 14. 2007, pp. 4357-4372.

Respuesta al riego deficitario de los componentes de cosecha en olivar

Marta Sánchez-Piñero[1], Mireia Corell[1], Alfonso Moriana[1], Luis Andreu[1], Pedro Castro-Valdecantos[1], Noemí Medina-Zurita[1], María-José Martin-Palomo[1]

[1] **Dpto de Agronomía, ETSIA, University of Seville. Crta de Utrera Km 1. 41013 Seville (Spain)**

Abstract: Olive orchards are nowadays the most important fruit tree in irrigated surface in Spain. Water management at the basin level consider the same irrigation volume for oil or table cultivars. The aim of this work was to present data describing the different respond to water stress in both types of olive trees. Two three-seasons experiments in table and oil commercial farms near Seville were compared to report the water stress respond of the yield components. Fruit drop was almost insensitive to severe water stress conditions in both type of orchards. However, fruit size was very sensitive to water stress. The respond of fruit size to crop load limited the capacity of deficit irrigation in table olive. On the other hand, low fruit size in oil experiments did not affect olive yield response. Estimation of oil yield vs water stress relationship suggested that in oil cultivars irrigation restriction during pit hardening, mainly Summer season, could be great. Then water needs in table olive would be greater than oil. In these orchards, water stress should be minimized before harvest to obtain the potential maximum fruit sizes.

Palabras clave: crecimiento de frutos, endurecimiento de hueso, número de frutos, potencial hídrico.

1. Introducción

El olivar se ha convertido en uno de los cultivos con mayor superficie en regadío a nivel nacional, con más de 400.000 ha [1]. Aunque se trata de una especie muy resistente a la sequía, la cantidad de agua disponible suele ser inferior a las necesidades potenciales del cultivo, lo que supone que sea necesario realizar una programación de riego deficitario. El riego deficitario controlado (RDC) se basa en la selección del estado fenológicos más resistentes al estrés hídrico desde el punto de vista de la cosecha [2]. El estado fenológico en olivar se divide de forma simplificada en tres fases: Fase I, floración-cuajado, Fase II, endurecimiento de hueso y Fase III, rehidratación/acumulación de aceite. La gran capacidad de resistencia al estrés hídrico de esta especie, no supone que todos los estados fenológicos sean igual de resistentes y tengan igual efecto en la cosecha final.

El año medio en clima Mediterráneo, con las lluvias concentradas en el periodo de otoño y primavera, suponen que la Fase I coincida, habitualmente, con un periodo en el que no es preciso el riego. Sin embargo, esta Fase I es la más sensible al estrés hídrico y niveles relativamente moderados en comparación con el verano (-3 MPa de potencial hídrico al mediodía) suponen una pérdida total de cosecha [3]. Condiciones menos severas dan lugar a una disminución en el tamaño del fruto que no es recuperable y que además reduce la cosecha [4]. La Fase II, de endurecimiento masivo del hueso, es la más resistente al estrés hídrico, aunque niveles excesivos disminuyen la cosecha obtenida [5]. Finalmente, la Fase III, se ha descrito como una fase

moderadamente resistente en la que niveles por debajo de -2 MPa afectarían a la cantidad de aceite en fruto [6]. Sin embargo, no todos los trabajos coinciden en estas conclusiones. Así, por ejemplo, en aceituna para aceite, [7] se sugiere que el inicio del riego a partir de Fase II es la mejor estrategia. Por el contrario, en aceituna de mesa, [8] sugiere que no hubo perdidas de cosecha significativas en riego deficitario, aunque sí tendencias a una menor cosecha relacionada con una peor rehidratación.

No es habitual, en los trabajos de riego, considerar el nivel y la duración del estrés hídrico para definir las estrategias de riego deficitario ni distinguir entre componentes de cosecha (nº de frutos, tamaño de fruto y contenido en aceite). El objetivo del presente trabajo es analizar, en base a los experimentales, la respuesta de los componentes de cosecha en función del nivel de estrés sufrido en un ensayo de aceituna de mesa y otro de aceite para poder establecer las principales diferencias entre ambos tipos de programaciones.

2. Materiales y métodos

Los datos presentados en esta comunicación son un resumen de los obtenidos en dos ensayos de riego en un experimento en mesa [9] y otro en aceite [10]. El experimento en mesa tuvo lugar en los años 2015, 2016 y 2017 en una finca de cv Manzanilla de Sevilla a un marco de 7*4 m de árboles con 30 años en el año 2015. La parcela experimental estaba ubicada en la finca "Doña Ana" localizada en Dos Hermanas (Sevilla, 37º 25'N, -5º 95'O). Los tratamientos de riego estaban distribuidos en un diseño en bloques con cuatro repeticiones. Cada repetición estaba formada por 3 líneas de 4 árboles, en las que los dos centrales eran los árboles de medida. Los tratamientos realizados fueron:

- Control. El objetivo de este tratamiento era conseguir un riego óptimo basado en medidas de potencial hídrico de tallo al mediodía. Los umbrales de riego se plantearon según [11] con -1.2 MPa hasta el comienzo del endurecimiento de hueso y -1.4 MPa desde este punto hasta cosecha.
- RDC-1. Igual que Control pero con un periodo de estrés moderado con un umbral de -2 MPa en Fase II desde el comienzo de endurecimiento de hueso hasta la tercera semana de agosto, rehidratándose desde entonces.
- RDC-2. Igual que Control pero en Fase II el umbral de riego se redujo hasta -3.5 MPa hasta la mitad del periodo, rehidratándose a partir de entonces.
- RDC-3. Igual que Control, pero durante toda la Fase II el umbral fue de -3.5 MPa, rehidratándose a partir de entonces.

El experimento en aceite tuvo lugar en los años 2017, 2018 y 2019 en una finca de cv Arbequina a un marco de 4*1.5m de árboles con 11 años de edad en el año 2017. La parcela experimental estaba ubicada en la finca "El Morillo" localizada en Carmona (Sevilla, 37º 49', -5º 67'O). Los tratamientos de riego estaban distribuidos en un diseño en bloques al azar con 4 repeticiones por tratamiento. Cada repetición estaba formada por 3 líneas de 18 árboles, en la que la línea central se utilizaba como árboles de medida. Los tratamientos realizados fueron:

- Control. El objetivo de este tratamiento era un riego que proporcionase condiciones óptimas de estado hídrico. Se aplicó el 150% de la evapotranspiración del cultivo (ETc).
- RDC-1. La programación se realizó en base a medidas de dendrometría [12]. Procurando un riego óptimo hasta endurecimiento de hueso y desde primeros de septiembre. Durante el endurecimiento de hueso se dio un estrés moderado.
- RDC-2. El riego fue controlado en su cantidad estacional con 150 mm en 2017, 170 mm en 2018 y 270 mm en 2019 (un año extremadamente seco). Las decisiones de riego se basaron en medidas de dendrometría evitando condiciones de estrés hídrico antes de endurecimiento de hueso, con niveles severos durante el endurecimiento y rehidrataciones parciales a partir de primeros de septiembre.

- RDS. La misma cantidad de riego que en RDC-2 pero con una aplicación constante que no tenga en cuenta la fenología del cultivo.

En todos los casos se determinó el inicio del endurecimiento del hueso considerando el cambio en la velocidad de crecimiento de la longitud de la aceituna [13]. El tamaño del fruto se estimó en cosecha contando el número de frutos en un kilogramo de muestra. El estado hídrico de los árboles se evaluó midiendo periódicamente el potencial hídrico del tronco al mediodía en una hoja por repetición. La integral de estrés hídrico se calculó según una fórmula modificada de [14], cambiando el potencial más positivo de la serie por una referencia fija de -1.2 MPa [11]:

$$IS = |\sum (SWP - (-1.2)) * n| \quad (1)$$

Donde:
IS: Integral de estrés (MPa*día)
SWP: Potencial hídrico de tronco medio entre dos fechas
N: nº de días entre dos fechas de medida

3. Resultados y discusión

Las cosechas y cantidades de riego de los dos ensayos se presentan en la Tabla 1. No hubo diferencias significativas en el ensayo de mesa en cosecha ni en tamaño de fruto, el atributo de calidad más importante. Sin embargo, el tamaño de los frutos (Tabla 1), aunque no presentó diferencias signifciativas tendió a valores más altos (frutos más pequeños) especialmente en el tratamiento más estresado (RDC-3). Tampoco hubo diferencias significativas en cosecha de fruta en el ensayo de aceite (Tabla 1). Aunque en este caso, sí que se presentaron diferencias significativas en el tamaño de los frutos en los años 2018 y 2019.

Tabla 1. Cantidad y calidad de cosecha obtenidas en el ensayo de olivar de mesa (2015-2017) y aceite (2017-2019). Cosecha, coseha de fruta (t ha^{-1}); Riego, (mm), Tamaño, (frutos kg^{-1}) . Fuente: [9, 10]

	Mesa			Aceite		
	Cosecha	**Riego**	**Tamaño**	**Cosecha**	**Riego**	**Tamaño**
		2015			**2017**	
Control	3.1 ± 1.0a	154 ± 28a	192 ± 8a	7.3± 0.6a	431±18a	1021± 66a
RDC-1	1.9 ± 0.5a	89 ± 13a	198 ± 15a	7.0± 0.9a	188±33 b	1140± 112a
RDC-2	1.9 ± 0.6a	108 ± 28a	185 ± 6a	6.2± 1.2a	150±18b	1179± 86a
RDC-3/RDS	3.4 ± 0.9a	54 ± 16a	210 ± 20a	6.7± 1.3a	149±5b	950± 66a
		2016			**2018**	
Control	18.3 ± 2.1a	264 ± 39a	324 ± 13a	17.7± 2.0a	533±19a	654± 18b
RDC-1	14.5 ± 1.1a	190 ± 26a	349 ± 17a	15.6± 2.0a	334±15b	702± 6ab
RDC-2	17.3 ± 1.5a	266 ± 90a	353 ± 11a	16.6± 1.3a	173±22c	751± 32a
RDC-3/RDS	14.8 ± 1.5a	108 ± 22a	372 ± 13a	14.4± 1.4a	175±5c	676± 24ab
		2017			**2019**	
Control	12.2 ± 2.0a	274 ± 35a	244 ± 3a	12.2± 0.3a	972±14a	669± 29ab
RDC-1	9.5 ± 1.1a	295 ± 39a	262 ± 16a	12.3± 0.8a	446±9b	601± 23b
RDC-2	13.8 ± 0.5a	360 ± 52a	252 ± 11a	10.0± 0.5a	269±33c	729± 38a
RDC-3/RDS	10.5 ± 1.4a	105 ± 14b	286 ± 8a	11.3± 0.5a	248±21c	628± 45ab

La caida de frutos fue más sensible en cv Manzanilla (mesa) que en cv Arbequina (aceite) (Figura 1). La línea solida de la Figura 1 presenta el ajuste sugerido por [9] a partir de los datos del ensayo de la Tabla 1. Al contrario que en mesa, incluso en niveles de estrés hídrico muy

severo, no parece que haya un incremento en el porcentaje de caida en cv Arbequina. No obstante, incluso en la variedad de mesa, la influencia sobre la cosecha final fue, posiblemente, menor que la esperada (Tabla 1) donde en nigún caso hay diferencias del 30% en cosecha. [8] muestran datos de hasta 30% de caida de frutos en brotes en mesa, que se ajustaron a la curva de la Figura 1, pero estos niveles tuvieron diferencias en cosecha mucho menores, no significativas.

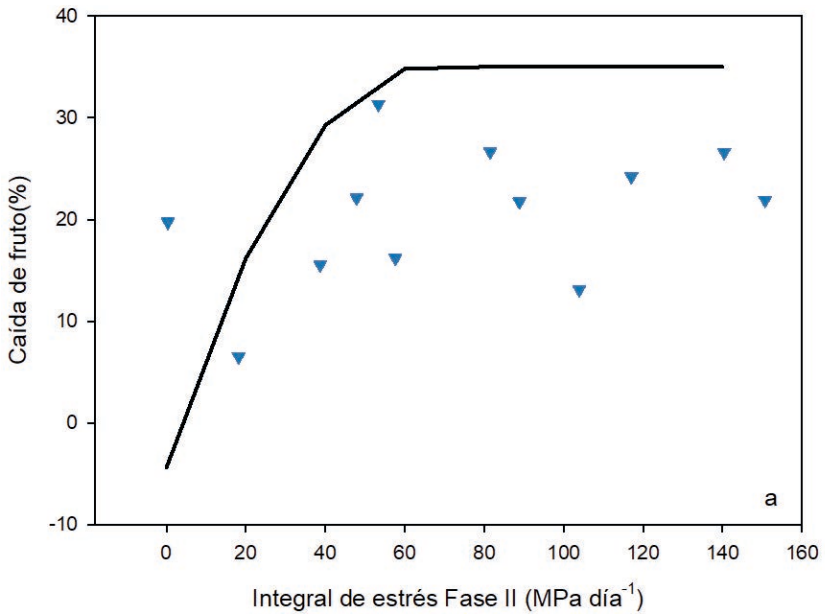


Figura 1. Relación entre el porcentaje de caida de frutos y la integral de estrés en Fase II en cv Arbequina en teres años de ensayo. Cada punto es la media de 4 datos. La línea presenta el ajuste sugerido por [9] para cv Manzanillo. Fuente: [10].

El tamaño de fruto , por el contrario, sí resultó ser un factor de importancia en la determinación de la cosecha en relación al estrés hídrico en los ensayos de mesa y aceite. En el caso de los ensayo en aceituna de mesa se trata además de una variable de gran importancia para determinar la calidad de la cosecha. Sin embargo, el tamaño del fruto tiene una gran relación con el nivel de carga, lo que puede alterar el efecto del estrés hídrico. La Figura 2 presenta los datos de tamaño final de fruto (nº de frutos por kg) para los cuatro tratamientos diferentes de riego en el ensayo de mesa en función de la cosecha final obtenida. Los ajustes de los tratamientos con menos nivel de estrés hídrico (Control y RDC-2) presentaron ajustes más cercanos que los que tuvieron restricciones mayores (RDC-1 y RDC 3). El estrés hídrico provocado por los tratameintos más estresados (RDC-1 y RDC-3) tienden a separar cada vez más el tamaño de fruto respecto de los mejor regados (Figura 2). Las diferencias en tamaño fueron muy pequeñas por debajo de 5 t/ha de cosecha, dando en todos los casos unos tamaños de frutos muy altos. Estas diferencias se incrementan con la carga, siendo aceptables hasta 10 t/ha pero no a partir de ahí.

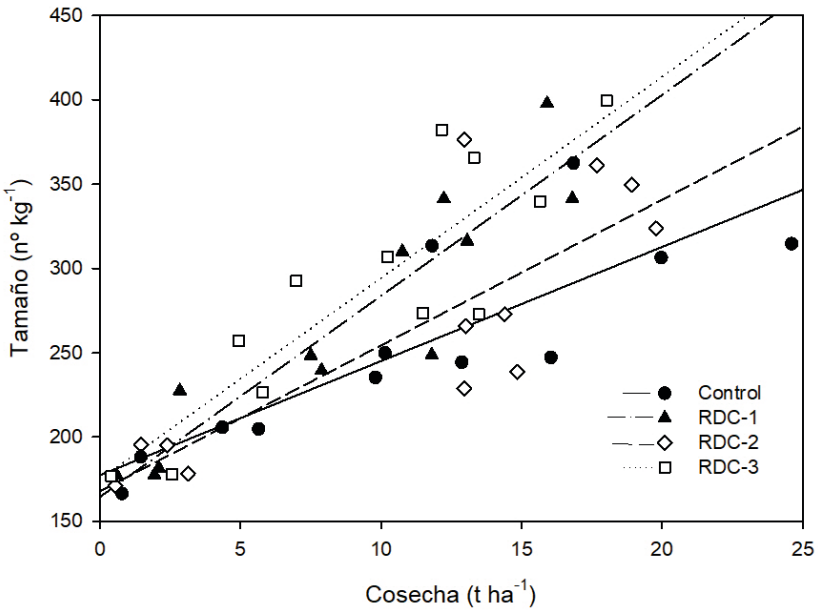


Figura 2. Relación entre el tamaño de fruto y la coseha final obtenida en tres años de ensayo. Cada punto es un dato invidual de cada repetición. Fuente: [9].

La disminución en tamaño por efecto de los tratamientos más estresados (RDC-1 y RDC-3) llegó hasta valores del 25% respecto al Control en cosechas alrededor de 10 t/ha. Aunque en este ensayo los datos medios de cosecha no tuvieron diferencias significativas (Tabla 1), estas relaciones sugieren una gran dificultad en realizar este tipo de programación de riego en niveles de cosecha elevados. Las diferencias principales entre los tratamientos más estresados (RDC-1 y 3) y los menos estresados (RDC-2 y Control) estuvieron relacionadas con el estrés acumulado en la fase previa a la rehidratación (Figura 3) con la que se encontró mejor relación que con valores mínimos de potencial hídrico [9]. Una acumulación de estrés hídrico provocaría que la rehidratación, aunque llegase a niveles del tratamiento Control fuese insuficiente.

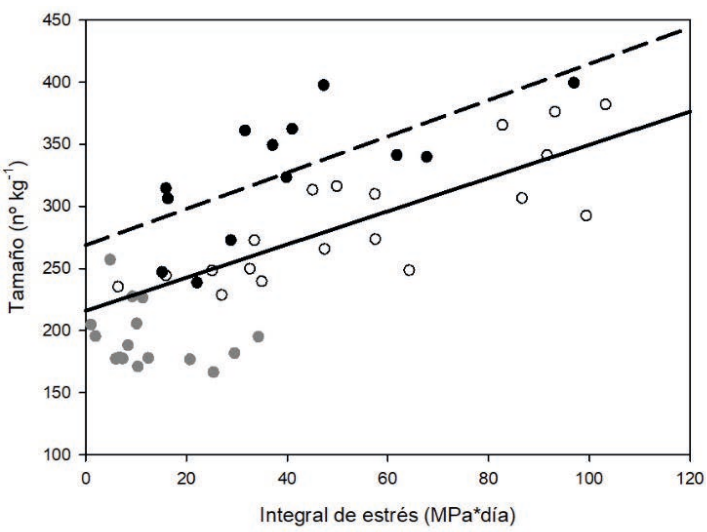


Figura 3. Relación entre la integral de estrés hídrico en Fase II y el tamaño de fruto en cosecha para tres niveles de cosecha. Circulo gris hasta 4 t ha^{-1}; Circulos blancos de 4 a 12 t ha^{-1}; Circulos negros, más de 12 t ha^{-1}. Cada punto es una medida individual de una repetición.

[8] presenta en olivar de mesa tendencias a menores tamaños finales de fruto, auque no hay diferencias en potencial hídrico. [15] concluye que el crecimiento del fruto es muy sensible al estrés, aunque sugiere que si los niveles no bajan de -2 MPa no debería de haber afección del tamaño. Estos datos indican que no es el nivel de estrés hídrico representado por el potencial mínimo, el que realmente afectaría al tamaño final. Este último trabajo [15] sólo sometió a estrés a los árboles unas semanas antes de cosecha. Estos datos sugieren que el tamaño de fruto en aceitunas de verdeo está muy ligado a un control del estrés en Fase II o a rehidratación más larga en la fase de recuperación, antes de cosecha. En cualquier caso, la respuesta podría estar asociada a un nivel acumulado de estrés hídrico durante el desarrollo de la aceituna, lo que limita la capacidad de realizar el riego deficitario.

El efecto del tamaño del fruto en el caso del ensayo de aceite tuvo una menor importancia. La cosecha de aceite no estuvo significativamente afectada en tratamientos que tuvieron un menor tamaño de fruto, incluso después del periodo de rehidratación y lluvias (año 2018 y 2019. Tabla 1y Figura 4).

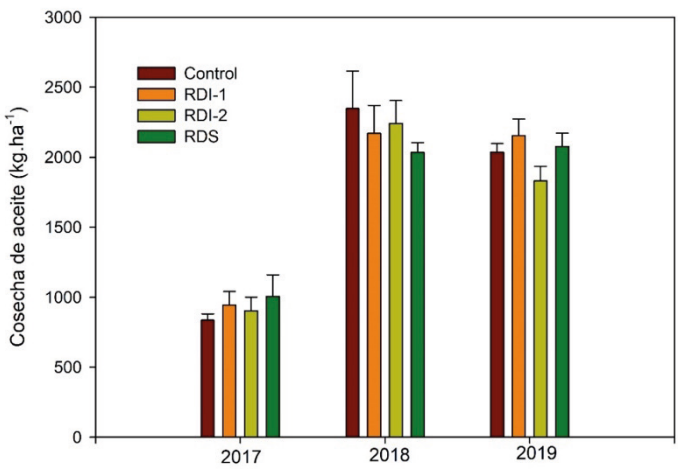


Figura 4. Cosecha de aceite en cada uno de los tratamientos de riego. Cada barra es la media de 4 datos. Las líneas verticales indican el error estándar. Barra rojas, Control, Barra naranja, RDC-1, Barra verde claro, RDC-2, Barra verde oscuro, RDS. No hay diferencias signicativas entre tratamientos. Fuente: [10]

La caída en cosecha del año 2017 (Tabla 1 y Figura 4) en todos los tratamientos estuvo relacionado con un estrés hídrico, debido a problemas con el riego que tuvieron lugar antes de Fase II y que supuso una caida generalizada del tamaño del fruto. Esto sugiere que la Fase I es la que realmente marca el tamaño final potencial del fruto e incluso su rendimiento en aceite (Figura 4), [16] presenta en diferentes variedades la posibilidad de estimar el tamaño del fruto en cosecha a partir de los datos obtenidos al final de Fase I. [4] describe resultados similares sobre el efecto del estrés hídrico en esta Fase, sin poder recuperar el tamaño de fruto aunque hay una rehidratación posterior. Sin embargo, cuando la caida del tamaño del fruto tiene lugar en Fase II, esta sería reversible e incluso aumenta el rendimiento en aceite de los tratamientos más estresados (Figura 4 y 5). La Figura 5, sugiere que niveles de estrés hídrico acumulado (integral de estrés hídrico) de hasta 200 MPa*día obtendrían un máximo de cosecha de aceite, que no de fruta (Tabla 1). La mayor parte de este estrés estacional tuvo lugar durante la Fase II, lo que sugiere que el potencial de ahorro de agua en verano es muy elevado en condiciones normales de pluviometría en primavera. Diferentes autores describen resultados similares con unas reducciones en cosecha de aceite pequeñas en condicioens de estrés hidrico moderados durante la Fase II [17] pero no en niveles muy severos de -5 o -6 MPa [18]. Los niveles alcanzados en[10] fueron similares a los de

[18] pero de menor duración que estos, lo que podría indicar una influencia mayor de la duración que del nivel de estrés hídrico.

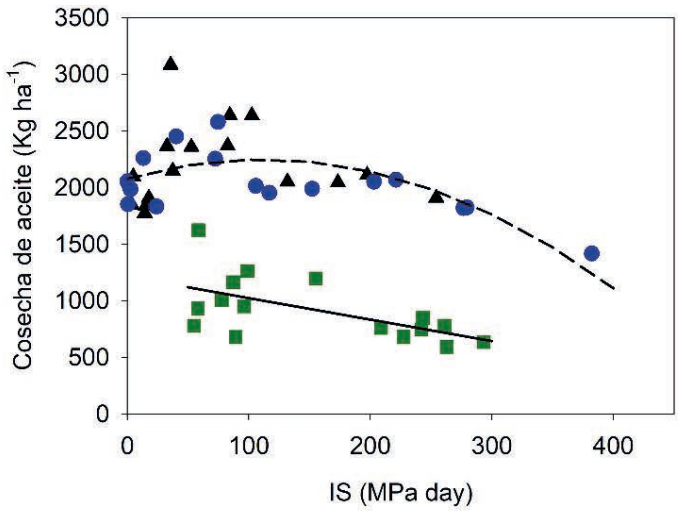


Figura 5. Relación entre la cosecha de aceite y la integral de estrés a lo largo de otdo el año (IS). Cada punto es un dato individual de cada repetición. Cuadrado verde, año 2017; Triangulo negro, año 2018; Cículo azul, año 2019. Fuente:[10].

4. Conclusiones

Las estrategias de riego deficitario y los niveles de estrés hídrico que se pueden plantear son diferentes entre cosechas para mesa o para aceite. De los componentes de cosecha estudiados, el número de frutos parece ser el más resistente al estrés hídrico y no parece que esté muy afectado incluso en niveles de estrés elevado en ninguno de los dos tipos de producción. Por el contrario, el crecimiento del fruto sí es muy sensible lo que sugiere unas mayores necesidades en mesa, donde es un atributo muy importante. El tamaño de fruto disminuyó en condiciones de estrés hídrico en Fase II y aunque se recuperó, el tamaño de fruto fue reducido. Este efecto del estrés hídrico estuvo también afectado por la carga que por sí sola disminuyó el tamaño. Hasta niveles de cosecha en torno a 10 t/ha sería posible aplicar un tratamiento deficitario asumiendo una perdida en calidad mayor cuanto más alta sea la cosecha. Por el contrario, en aceituna de aceite el tamaño sólo fue limitante en Fase I. En Fase II, con niveles de estrés que no superen los 200 MPa*día de integral de estrés la cosecha de aceite no estuvo afectada, aunque hubiese menores tamaños de fruto en cosecha. Estrategias de riego que disminuyan el potencial de forma intensa, pero con poca duración o manejos que aseguren un nivel de estrés moderado podrían maximizar la acumulación de aceite.

5. Agradecimientos

Marta Sánchez-Piñero disfruta de un contrato predoctoral del VI plan propio de la Universidad de Sevilla (VI-PPITUS)

Referencias

1. MAPA 2023. Yearbook of the Spanish Agriculture Ministry. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx (accessed 19 April 2023).

2. Chalmers, D.J.; Wilson, I.B. Productivity of peach trees: Tree growth and water stress in relation to fruit growth and assimilate demand. Ann. Bot. 1978, 42, 285-294. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a085459.
3. Moriana, A.; Orgaz, F.; Fereres, E.; Pastor, M. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 2003, 128, 425-431. https://doi.org/10.21273/JASHS.128.3.0425.
4. Gucci, R.; Caruso, G.; Gennai, C.; Esposto, S.; Urbani, S.; Servili, M. Fruit growth, yield and oil quality changes induced by deficit irrigation at different stages of olive fruit development. Agric Water Manage 2019, 212, 88-98. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.022.
5. Goldhamer, D.A. Regulated deficit irrigation for California canning olives. Acta Horticulturae, 1999, 474: 369-372.
6. Hueso, A.; Trentacoste, E.R.; Junquera, P.; Gómez-Miguel, V.; Gómez del Campo, M. Differences in stem water potential during oil synthesis determine fruit characteristics and production but not vegetative growth or return bloom in an olive hedgerow orchard (cv Arbequina). Agric. Water Manage. 2019, 223, http://dx.doi.org/ 10.1016/j.agwat.2019.04.006.
7. Lavee, S., Hanoch, E., Wodner, M, Abramowitch, H. The effect of predetermined deficit irrigation on the performance of cv Muhasan olives (Olea europaea L) in the eastern coastal plain of Israel. Scientia Hort. 2007, 112, 156-163
8. Girón, I.F.; Corell, M.; Martín-Palomo, M.J.; Galindo, A.; Torrecillas, A.; Moreno, F.; Moriana, A. Feasibility of trunk diameter fluctuations in the scheduling of regulated deficit irrigation for table olive trees without references trees. Agric. Water Manage. 2015, 161,114-126. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.014.
9. Corell, M.; Martín-Palomo, M.J.; Girón I.; Andreu. L.; Galindo, A.; Centeno, A.; Pérez-López, D.; Moriana, A. Stem water potential-based regulated deficit irrigation scheduling for olive table trees. Agric. Water Manage. 2020, 242 https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106418
10. Corell, M, Pérez-López, D, Andreu, L, Recena, R, Centeno, A, Galindo, A, Moriana, A, Martín-Palomo, MJ. Yield response of a mature hedgerow oil olive orchard to different levels of water stress during pit hardening. Agric. Water Manage., 2022, 261 doi: 10.1016/j.agwat.2021.107374
11. Moriana, A.; Pérez-López, D.; Prieto, M.H.; Ramírez-Santa-Pau, M; Pérez-Rodriguez, J.M. Midday stem water po-tential as a useful tool for estimating irrigation requirements in olive trees. Agric. Water Manage. 2012, 112, 43-54. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.003.
12. Martín-Palomo, M.J., Corell, M., Andreu, L., López-Moreno, Y.E., Galindo, A., Moriana, A. Identification of water stress conditions in olive tres through frequencies of trunk growth rate. Agric Water Manage. 2021, 247, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106735
13. Rapoport, H.F.; Pérez-López, D.; Hammami, S.B.M.; Aguera, J.; Moriana, A.. Fruit pit hardening: physical meas-urements during olive growth. Annals Appl. Biol. 2013, 163, 200-208. http://dx.doi.org/10.1111/aab.12046
14.. Myers, B.J.. Water stress integral a link between short term stress and long term growth. Tree Physiol- 1988, 4, 315–323.
15. Martín-Palomo, M.J., Corell, M., Girón, I., Andreu, L., Galindo, A., Centeno, A., Pérez-López, D., Moriana, A. Absence of yield reduction after controlled water stress during preharvest period in table olive trees. Agronomy, 2020, 10, doi:103390/agronomy10020258
16. Sánchez-Piñero, M., Martín-Palomo, M.J., Moriana, A., Corell, M., Pérez-López, D. Endocarp development study in full irrigated olive orchards and impact on fruit features at harvest. Plants, 2022, 11, 3541 doi 10.3390/plants11243541
17. Ben-Gal, A.; Ron, Y.; Yermiyahu, U.; Zipori, I.; Naoum, S.; Dag, A. Evaluation of regulated deficit irrigation strate-gies for oil olives: A case study for two modern Israeli cultivars. Agric. Water Manage. 2021, 245, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106577.
18. Ahumada-Orellana, LE, Ortega-Farias, S, Searles, PS, Retamanes, JB. Yield and water productivity responses to irrigation cut-off strategies after fruit set using stem water potential thresholds in a super-high density olive orchard. Front. Plant Sci., 2017, doi 10.3389/fpls.2017.01280

Efecto del contralavado en la retención de sólidos a lo largo del medio filtrante en filtros de arena

M. Duran-Ros[1], J. Pujol[1], T. Pujol[2], J. Graciano-Uribe[2], S. Cufí[1], G. Arbat[1], F. Ramírez de Cartagena[1], J. Puig-Bargués[1]

[1] Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria; Escuela Politécnica Superior; Universidad de Girona; miquel.duranros@udg.edu, joan.pujol@udg.edu, silvia.cufi@udg.du, gerard.arbat@udg.edu, francisco.ramirez@udg.edu, jaume.puig@udg.edu

[2] Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial; Escuela Politécnica Superior; Universidad de Girona; toni.pujol@udg.edu, jonathan.graciano@udg.edu

Abstract: Pressurized sand media filters are widely used in drip irrigation systems to prevent emitter clogging. This filter performance might be improved with more information about the retention of solids at different bed depths before and after backwashing, which is a necessary operation for restoring filtration capacity once the filter is clogged. In this study, experiments in a scaled sand media filter were conducted to clog the filter at two different filtration velocities (30 and 60 m/h) using an A4 coarse sand dust. The suspended solids retained in slices of 5 mm (in the first 20 mm of the bed) and 20 mm (from 20 to 200 mm depth) thick were determined following the van Staden and Haarhoff (2011) procedure before and after backwashing the filter. The solids retained in each slice per mass of media were significantly ($p<0.05$) affected by the double interactions between filtration velocity, bed media depth and backwashing. The solids retained in the first 5 mm of the bed were significantly higher than at other depths for both filtration velocities. Overall, backwashing removed 73% of the solids retained in the filter bed, although removal efficiency tended to diminish with bed depth.

Palabras clave: riego por goteo, obturación, sólidos en suspensión, filtración, contralavado

1. Introducción

La necesidad de mejorar la productividad de la agricultura de regadío ante los cada vez más frecuentes períodos de escasez de agua ha propiciado la adopción de tecnologías de riego más eficientes como el riego por goteo [1], cuya superficie a nivel mundial ha aumentado de 10.8 a 15.9 Mha entre 2012 y 2021 [2]. El principal problema del riego por goteo es la obturación de los goteros, que puede provocar una deficiente uniformidad de aplicación del agua [3,4]. Por este motivo, los sistemas de riego por goteo deben disponer de algún sistema de filtrado para retener aquellas partículas capaces de obturar los goteros. Los filtros de arena son normalmente más eficientes que los filtros de anillas y malla, especialmente cuando se utilizan aguas de riego con cargas elevadas de partículas [5]. Esto es debido a que, en este tipo de filtros, la retención de las partículas se realiza tanto en superficie, fundamentalmente por tamizado, como también a lo largo del medio filtrante, mediante distintos mecanismos que actúan simultáneamente como la intercepción, inercia, sedimentación, difusión y acción hidrodinámica [6]. Cuando en el lecho filtrante se van acumulando partículas, la caída de presión a lo largo del filtro se incrementa paulatinamente hasta que es necesario contralavar el lecho para eliminar los sólidos acumulados y restaurar la capacidad filtrante inicial.

Muchas de las investigaciones recientes en filtros de arena para sistemas de riego por goteo se han centrado en proponer distintas mejoras de su diseño para reducir la caída de presión y

mejorar la uniformidad del flujo en el filtro [7-9]. Sin embargo, pocos estudios han analizado cómo varía la retención de sólidos a lo largo del lecho filtrante, lo que es necesario para optimizar las condiciones de operación de este tipo de filtros. Algunos autores observaron que la eficiencia en la retención de sólidos inorgánicos se incrementaba con mayores caudales y menores tamaños de arena [10,11] y que dependía también del tipo de partículas (inorgánicas u orgánicas) predominantes en el agua de riego [12]. Normalmente, la mayoría de los sólidos retenidos por los filtros de arena se encuentran en las capas superficiales [12,13], aunque hay algunas variaciones dependiendo de la velocidad y el tamaño de la arena utilizada. La retención de sólidos va disminuyendo con la profundidad del lecho, si bien, en algunos casos, se ha observado un incremento en las últimas capas [14]. Otro aspecto es la posible existencia de flujos preferenciales que provoquen una distinta deposición de partículas en el lecho filtrante. Duran-Ros et al. [15], trabajando con un filtro a escala en condiciones de laboratorio que filtraba agua regenerada, utilizaron la tomografía óptica de contacto y no observaron diferencias en los sólidos retenidos en distintas lonchas del medio filtrante. Sin embargo, el efecto del contralavado en la retención de sólidos a lo largo del medio filtrante no se ha estudiado en profundidad. Por este motivo, el objetivo principal de este trabajo es analizar la cantidad de sólidos retenidos a lo largo del lecho filtrante con distintas velocidades de filtración y cuantificar las diferencias antes y después de realizar el contralavado.

2. Materiales y métodos

2.1. Dispositivo experimental

Los experimentos se realizaron con un filtro de arena a escala de laboratorio construido en polimetilmetacrilato. El filtro tenía un diámetro interno de 110 m y disponía de un difusor con una plancha perforada de 80 mm de diámetro que repartía homogéneamente el agua en la superficie del medio filtrante y de un drenaje consistente en una plancha de acero inoxidable perforada en el fondo. Se diseñó y construyó un dispositivo con un elevador de husillo que permitía elevar el drenaje del filtro para obtener lonchas de medio del grosor que se desease.

El dispositivo experimental utilizado en el laboratorio (Figura 1) permitió operar con dos velocidades de filtración (30 y 60 m/h, respectivamente) ajustando la válvula de compuerta ubicada después del caudalímetro. La presión a la entrada del filtro se ajustó a 120 kPa con la válvula de salida del filtro. El sistema operó mediante circuito cerrado.

2.2. Procedimiento experimental

Antes de cada experimento, se hizo circular agua de red por el dispositivo hasta que el agua de salida presentaba una turbidez inferior a 1,5 unidades nefelométricas de turbidez (NTU). A continuación, el filtro se rellenó con 2,67 kg de arena silícea CA-07MS (Sibelco Hispania, Bilbao, España) hasta una altura de 200 mm. Esta arena tenía un diámetro D_{10} (diámetro de tamiz que deja pasar un 10% de la masa de arena) de 0,48 mm, un diámetro D_{60} (diámetro de tamiz que deja pasar un 60% de la arena) de 0,83 mm, un coeficiente de uniformidad (D_{60}/D_{10}) de 1,73, y una porosidad (cociente entre el volumen de huecos y el volumen ocupado por arena) de 0,40. Una vez colocado el lecho filtrante, se contralavó el filtro para eliminar las partículas más finas, puesto que podrían provocar posibles obturaciones, con una velocidad un 50% superior a la que se utilizaría en el ensayo (es decir, a 45 y 90 m/, respectivamente) y hasta que la turbidez del agua filtrada no superaba 1,5 NTU. Posteriormente, el filtro se drenó y se filtró agua de red durante 5 min para asegurar que la turbidez de salida continuaba estando por debajo de 1,5 NTU, puesto que es la máxima turbidez del agua admitida para un filtro limpio [16].

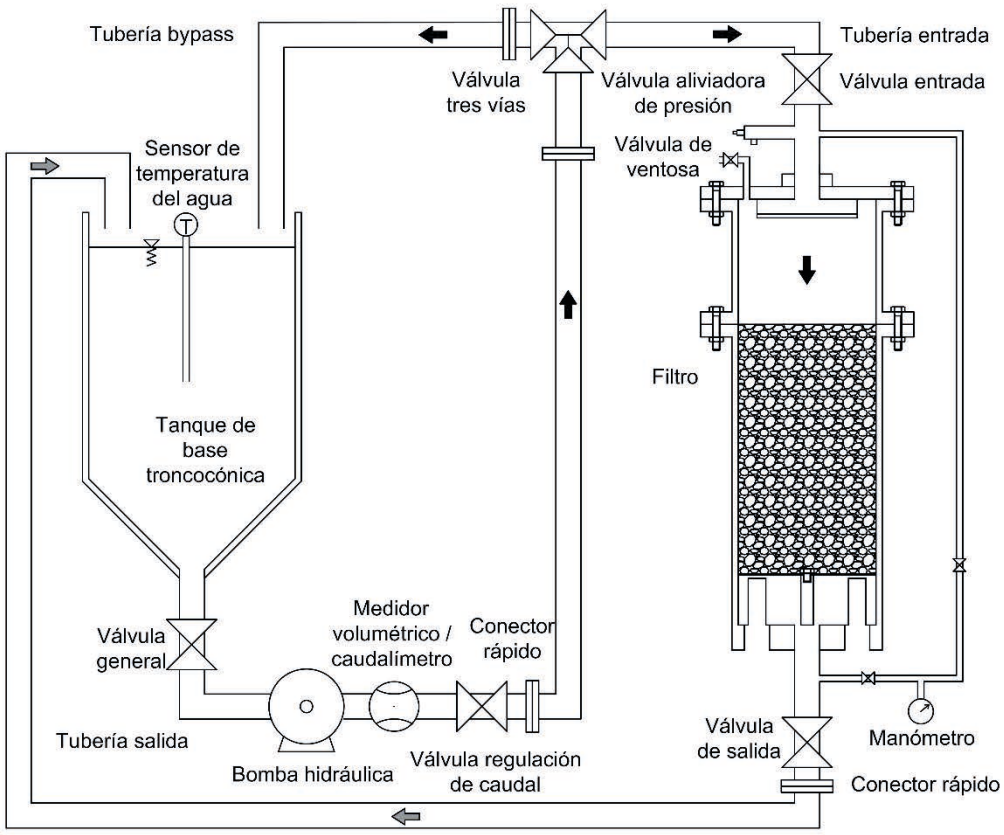


Figura 1. Dispositivo experimental utilizado en el laboratorio. Sistema en posición de filtración.

Para realizar los experimentos en condiciones controladas, se añadió, como material colmatante, polvo de ensayo Arizona clase A4 (Powder Technology Inc., Arden Hills, MN, EE.UU.), con D_{10} = 5,1 µm y D_{60} = 43,9 µm, al tanque troncocónico de 0,06 m^3 que contenía el agua para realizar el experimento. En cada ensayo, se añadieron 0,28 g de polvo de ensayo al tanque cada 5 o 2,5 min en función de si la velocidad era 30 o 60 m/h, respectivamente, para mantener así la carga de sólidos a la entrada del filtro en 0,012 g/L. Cada 2,5 min se registraron el volumen filtrado, el caudal de filtración, la presión a la entrada y a la salida del filtro, y la temperatura del agua. Los ensayos finalizaron cuando la caída de presión en el filtro aumentaba en 50 kPa con respecto la inicial, puesto que se consideraba que, en estas condiciones, el filtro estaba obturado. En los experimentos en los que se realizó un contralavado, éste se efectuó durante 3 min con una velocidad de filtración un 50% superior a la del filtrado, es decir, 45 y 90 m/h, respectivamente. Los experimentos se realizaron un mínimo de tres veces para cada velocidad de filtración.

Al finalizar un experimento, se obtenían lonchas del medio filtrante mediante el dispositivo helicoidal existente en la base del filtro. El grosor de las lonchas era de 5 mm en los 20 mm superiores del lecho, y de 20 mm entre los 20 y los 200 mm de profundidad. Por lo tanto, se obtuvieron de 13 lonchas en cada ensayo. Las lonchas se recogían y guardaban en un recipiente de 1000 ml para determinar los sólidos retenidos siguiendo el método de van Staden y Haarhoff [17]. En concreto, para las cuatro primeras lonchas (5 mm), se vertió toda la arena de la loncha en una probeta de 250 ml, y para el resto de lonchas (20 mm de grosor), se tomó una muestra de unos 50 ml de arena. A continuación, se añadieron 100 ml de agua, se cerró el recipiente, se agitó invirtiéndolo vigorosamente 20 veces y se decantó el sobrenadante. Este procedimiento se realizó un total de 5 veces, excepto para la loncha superficial que necesitaba de 10 rondas para obtener un sobrenadante claro. Con este procedimiento se obtuvo una solución de 500 ml (1000 ml para

la primera loncha) de agua con el material retenido por la arena del filtro. Una muestra de la suspensión recogida se utilizó para determinar los sólidos en suspensión totales siguiendo los métodos estándar para el examen de aguas y aguas residuales [18] y poder así, determinar los gramos de material retenido por gramo de medio de filtración.

2.3. Tratamiento estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa SPSS Statistics software (IBM, New York, EE.UU.). La relación entre los sólidos retenidos respecto la masa de medio filtrante en cada loncha se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un modelo que incluía como efectos fijos el tipo de operación (antes o después del contralavado), la velocidad de filtración y la profundidad de la loncha, así como sus interacciones dobles y triples. La determinación de medias significativamente diferentes ($p < 0.05$) se realizó utilizando el test de Tukey.

3. Resultados y discusión

Los resultados del análisis de la varianza del modelo de la relación de sólidos retenidos en cada loncha respecto la masa de medio filtrante en la loncha se muestran en la Tabla 1. El modelo fue estadísticamente significativo ($p < 0.05$), como también lo fueron los efectos de la velocidad de filtración, condiciones de operación (contralavado o no), profundidad de la loncha y todas las interacciones dobles (velocidad y condición de operación, velocidad y profundidad de lecho y condición de operación por profundidad de lecho). En cambio, la interacción triple entre velocidad, contralavado o no, y profundidad de lecho no fue estadísticamente significativa ($p = 0.09 > 0.05$). Puesto que todas las interacciones dobles fueron significativas, se analizarán por separado en los siguientes subapartados.

Tabla 1. Niveles de significación (p-valores) del modelo estadístico, cada factor y las interacciones dobles y triple que explican el cociente entre los sólidos totales retenidos por la masa de cada loncha de medio filtrante.

Factor	p-valor
Modelo	< 0,0001
Velocidad de filtración	< 0,0001
Condición de operación	< 0,0001
Profundidad del lecho filtrante	< 0,0001
Velocidad de filtración x condición de operación	0,0062
Velocidad de filtración x profundidad del lecho filtrante	< 0,0001
Condición de operación x profundidad del lecho filtrante	< 0,0001
Velocidad de filtración x condición de operación x profundidad lecho	0,0933

3.1. Efecto de la velocidad de filtracion y las condiciones de operación de los filtros

La cantidad de sólidos retenidos por masa de medio filtrante en las distintas lonchas en las que se dividió el medio filtrante fue significativamente más elevada ($p > 0,05$) antes del contralavado para ambas velocidades de filtración que la observada una vez realizado el contralavado (Figura 2). Estos resultados, completamente esperables puesto que el contralavado tiene por objeto eliminar los sólidos acumulados en el lecho filtrante que provocan una caída de presión importante y acortan considerablemente los ciclos de filtrado, indican también que el contralavado fue eficiente. En concreto, se alcanzaron, de media, reducciones de los sólidos

retenidos del 70% y del 76% cuando la filtración se realizó a 30 y a 60 m/h, respectivamente. Mesquita et al. [11] observaron retenciones de sólidos en suspensión del 60% en filtros comerciales utilizando un medio filtrante de D_{10}=0,55 mm (parecido al de 0,48 mm utilizado en el presente trabajo), si bien las eficiencias bajaban hasta el 16% en función del procedimiento de muestreo y análisis, debido a la variabilidad que presenta el proceso de filtrado, con fases en las que se libera parte de las partículas retenidas. Por otra parte, en los resultados del presente estudio no se observaron diferencias significativas en los sólidos retenidos al finalizar los contralavados para las dos velocidades de filtración estudiadas. En cambio, los sólidos retenidos fueron estadísticamente mayores al finalizar el filtrado, cuando se trabajó con una velocidad de filtración de 30 m/h con respecto la de 60 m/h. Algunos autores [11,14] observaron que, a mayor velocidad, mayor cantidad de sólidos retenidos. Los experimentos aquí mostrados se realizaron hasta que la caída de presión superaba en 50 kPa la inicial, mientras que en otros estudios los ciclos de filtración duraban un tiempo preestablecido. En nuestro caso, puesto que el umbral de caída de presión se alcanzaba más rápidamente a mayores velocidades de filtración, los ciclos de filtrado a 60 m/h fueron más cortos, como también se había observado previamente con filtros comerciales [19], y, por tanto, la cantidad de sólidos añadidos fue menor.

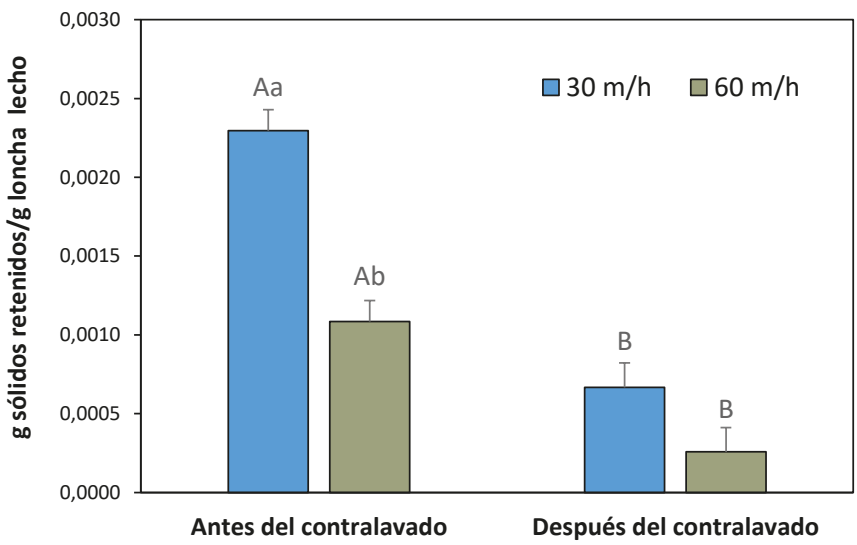


Figura 2. Medias de los mínimos cuadrados (± error estándar) de los sólidos totales en suspensión retenidos por masa de loncha de lecho filtrante antes y después del contralavado en función de la velocidad de filtración. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) dentro una misma condición de operación en función de la velocidad de filtración. Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) para una misma velocidad de filtración en función de si se realiza contralavado o no.

3.2. Efecto de la velocidad de filtración y la profundidad del lecho filtrante

Los sólidos retenidos variaron a lo largo de la profundidad del lecho en función de la velocidad de filtración (Figura 3). Para las dos velocidades de filtración estudiadas, la cantidad de sólidos retenidos fue significativamente ($p < 0,05$) superior en los primeros 5 mm que en el resto del lecho, donde no se observaron diferencias en las distintas posiciones estudiadas. De hecho, alrededor del 58% del total de sólidos retenidos se hallaron en esta primera capa del lecho filtrante para ambas velocidades. Fue únicamente en estos primeros 5 mm donde se hallaron diferencias entre velocidades de filtración, siendo la cantidad de sólidos retenidos mayor

filtrando a 30 m/h. En el resto de profundidades se retuvieron más sólidos a 30 m/h que a 60 m/h, aunque sin diferencias significativas. Las desigualdades tan considerables entre la cantidad de sólidos retenidos no se habían observado con anterioridad. Duran-Ros et al. [15], utilizando un dispositivo experimental similar pero trabajando con aguas regeneradas, hallaron con lonchas de 20 mm de grosor para un lecho de 80 mm de profundidad, porcentajes de masa retenida del 35% en la primera capa. De Deus et al. [14], añadiendo partículas de arena y con un lecho filtrante parecido (D_{10} = 0,55 mm) al del presente estudio (D_{10} = 0,48 mm), observaron porcentajes de retención de sólidos más uniformes, con un 32% y 25% de sólidos retenidos en las primeras capas a velocidades de 20 y 60 m/h, respectivamente. La cantidad de sólidos retenidas en las capas más profundas se incrementaba con el número de ciclos de filtrado [14]. En nuestro caso, puesto que se analizó todo el medio, que debía ser reemplazado en cada ensayo, no se disponen de datos a lo largo de distintos ciclos. Los resultados obtenidos indican una prevalencia del mecanismo filtración de tamizado, puesto que mayor cantidad de sólidos se retuvieron en superficie [6]. Este fenómeno se observó también con medios con arenas más finas, mientras que con partículas más gruesas predominaban el resto de mecanismos de filtración (intercepción, inercia, sedimentación, difusión y acción hidrodinámica), los cuales actúan en todo el lecho filtrante y no únicamente en su superficie.

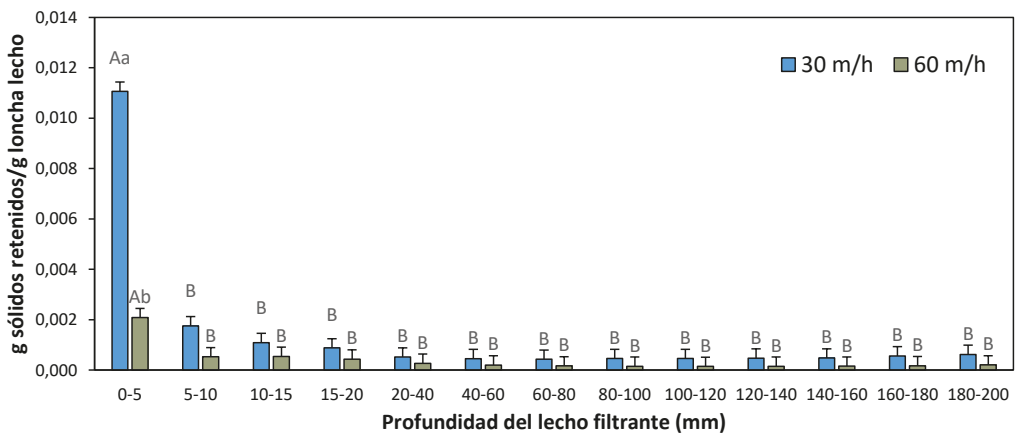


Figura 3. Medias de los mínimos cuadrados (± error estándar) de los sólidos totales en suspensión retenidos por masa de loncha de lecho filtrante en función de la velocidad de filtración y la profundidad del lecho filtrante. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) dentro de una misma profundidad del lecho, mientras que letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) para una misma velocidad de filtración a lo largo del lecho filtrante.

3.2. Efecto del contralavado y la profundidad del lecho filtrante

La variación de los sólidos retenidos a lo largo de la profundidad del lecho antes y después de realizar el contralavado se muestra en la Figura 4. En los primeros 5 mm del lecho filtrante se observaron diferencias estadísticamente significativas en los sólidos retenidos en función de si se realizaba o no el contralavado. Para el resto de profundidades, si bien los valores al finalizar los ciclos de filtración fueron más elevados, no se observaron diferencias significativas con el contralavado. Después del contralavado no se observaron diferencias en los sólidos retenidos en ninguna de las lonchas obtenidas entre los 5 y los 200 mm. En cambio, antes del contralavado, la capa entre 5 y 10 mm presentó valores de sólidos estadísticamente superiores a los observados entre los 80 y 180 mm. Como era previsible, la cantidad de sólidos en cada capa del lecho una vez contralavado el filtro depende en gran medida de los sólidos retenidos durante el filtrado. El contralavado consigue eliminar buena parte de los sólidos acumulados en el lecho filtrante, pero

no modifica apreciablemente su distribución a lo largo del lecho. De hecho, los valores medios de eliminación de partículas fueron superiores al 70% en los primeros 60 mm del lecho filtrante y el valor más bajo (36%) se halló entre los 160 y 180 mm. Estos resultados, sin embargo, deben ser verificados en condiciones de campo, puesto que en el presente trabajo se ha utilizado un filtro a escala de laboratorio y, en principio, bajo condiciones que impiden vías de paso preferente que pueden afectar los resultados obtenidos. Se debería también analizar el posible efecto de utilizar distintas alturas de lecho filtrante.

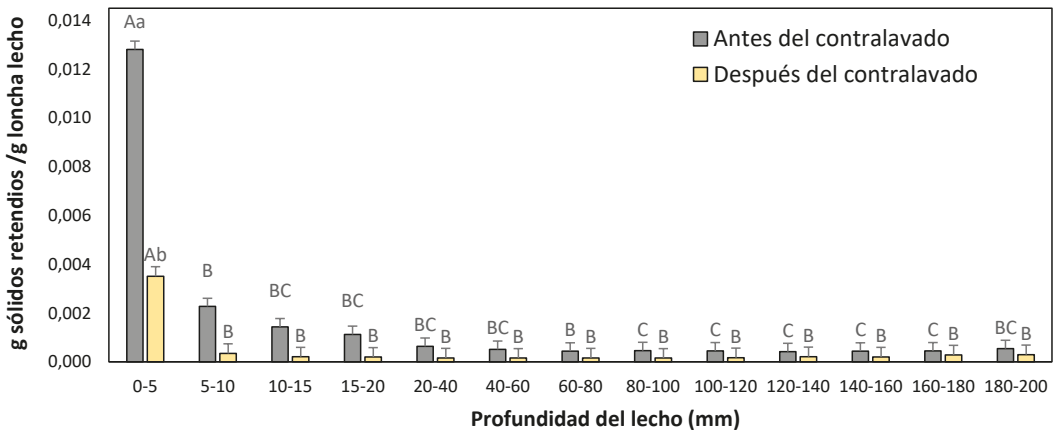


Figura 4. Medias de los mínimos cuadrados (± error estándar) de los sólidos totales en suspensión retenidos por masa de loncha de lecho filtrante en función de si realizaba o no el contralavado y la profundidad del lecho filtrante. Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) dentro de una misma profundidad del lecho, mientras que letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) para una misma condición de operación a lo largo del lecho filtrante.

4. Conclusiones

La cantidad de sólidos retenidos a lo largo del lecho filtrante de un filtro de arena depende de las interacciones entre la velocidad de filtración y de si realiza o no contralavado, entre la velocidad de filtración y la profundidad del lecho, y entre si se efectúa el contralavado o no y la profundidad del medio filtrante. En el filtro a escala de laboratorio utilizado en el presente trabajo se ha observado que alrededor del 58% de los sólidos fueron retenidos en los primeros 5 mm del lecho, tanto antes como después del contralavado. El contralavado consigue eliminar, en promedio, un 73% de los sólidos retenidos en el lecho filtrante. Todas las lonchas entre los 0 y 60 mm consiguen eliminar más del 70% de los sólidos acumulados con el contralavado, mientras que las menores eficiencias se producen entre los 160 y 180 mm, con un 36% de sólidos eliminados durante el contralavado.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del proyecto RTI2018-094798-B-100, en el que se enmarca el presente trabajo, por parte de la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

Referencias

36. Tarjuelo J.M., Rodríguez-Díaz J.A., Abadía R., Camacho E., Rocamora C., Moreno M.A. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies. Agricultural Water Management. 2015, 162, 67-77.
37. ICID, 2022. *Annual report 2021-22*. https://icid-ciid.org/icid_data_web/ar_2021.pdf (fecha de consulta: 24 de marzo de 2023).
38. Trooien T.P., Hills D.J. Application of biological effluent. En: Microirrigation for crop production. Design, operation and management, Lamm F.R., Ayars J.E., Nakayama F.S., Eds.; Elsevier: Amsterdam, Países Bajos, 2007; pp. 329-356.
39. Solé-Torres C., Lamm F. R., Duran-Ros M., Arbat G., Ramírez de Cartagena F., Puig-Bargués J. Assessment of microirrigation field distribution uniformity procedures for pressure-compensating emitters under potential clogging conditions. Transactions of the. ASABE. 2021, 64 (3), 1063-1071.
40. Nakayama F.S., Boman B.J., Pitts D.J. Maintenance. En Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management; Lamm F.R., Ayars J.E., Nakayama F.S., Eds.; Elsevier: Amsterdam, Países Bajos; 2007; pp. 389-430.
41. Cescon A., Jiang J.-Q. Filtration process and alternative filter media material in water treatment. Water. 2020, 12, 3377.
42. Bové J., Puig-Bargués J., Arbat G., Duran-Ros M., Pujol T., Pujol J., Ramírez de Cartagena F. Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters. Agricultural Water Management. 2017, 179, 296-305.
43. Mesquita M., de Deus F.P., Testezlaf R., Da Rosa L.M., Diotto A.V. Design and hydrodynamic performance testing of a new pressure sand filter diffuser plate using numerical simulation. Biosystems Engineering. 2019, 183, 58-69.
44. Pujol T., Puig-Bargués J., Arbat G., Chaves M., Duran-Ros M., Pujol J., Ramírez de Cartagena F. Numerical study of the hydraulic effect of modifying the outlet pipe and diffuser plate in pressurized sand filters with wand type underdrains. Journal of the ASABE. 2022, 65 (3), 609-619.
45. de Deus F.P., Testezlaf R., Mesquita M. Eficiência de filtros de areia pressurizados na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 2015, 50 (10), 939-948.
46. Mesquita M., de Deus F.P., Testezlaf R., Diotto A.V. Removal efficiency of pressurized sand filters during the filtration process. Desalination and Water Treatment. 2019, 161, 132–143.
47. Duran-Ros M., Pujol J., Pujol T., Cufí S., Arbat G., Ramírez de Cartagena F., Puig-Bargués J. Solid removal across the bed depth in media filters for drip irrigation systems. Agriculture. 2023, 13, 458.
48. Burt C.M. Hydraulics of commercial sand media filter tanks used for agricultural drip irrigation. ITRC Report No. R 10001. Irrigation Training and Research Center; California Polytechnic State University: San Luis Obispo, CA, USA, 2010.
49. de Deus F.P., Testezlaf R., Mesquita M. Assessment methodology of backwashing in pressurised sand filters. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2016, 20(7), 600-605.
50. Duran-Ros M., Solé-Torres C., Ait-Mouheb N., Molle B., Arbat G., Puig-Bargués J. Media filter fouling assessment using optical coherence tomography: New methodology. Biosystems Engineering. 2021, 204, 26–35.
51. EN 16713-1:2016. Domestic swimming pools - Water systems - Part 1: Filtration systems - Requirements and test methods. CEN: Bruselas, 2016.
52. van Staden S.J., Haarhoff J. The use of filter media to determine filter cleanliness. Physics and Chemistry of the Earth. 2011, 36 (14-15), 1135-1140.
53. Baird R.B., Eaton A.D., Rice, E.W (ed.). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed.; American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation: Washington, DC, USA, 2017.
54. Solé-Torres C., Puig-Bargués J., Duran-Ros M., Arbat G., Pujol J., Ramírez de Cartagena F. Effect of underdrain design, media height and filtration velocity on the performance of microirrigation sand filters using reclaimed effluents. Biosystems Engineering. 2019, 187, 292–304.

Caracterización de filtros granulares en retrolavado con arena de sílice y microesferas de vidrio

J. Graciano-Uribe[1], T. Pujol[1], M. Duran-Ros[2], D. Hincapie-Zuluaga[3], G. Arbat[2], S. Cufí[2], F. Ramírez de Cartagena[2], J. Puig-Bargués[2].

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial; Escuela Politécnica Superior; Universidad de Girona; jonathan.graciano@udg.edu, toni.pujol@udg.edu
[2] Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria; Escuela Politécnica Superior; Universidad de Girona; miquel.duranros@udg.edu, silvia.cufi@udg.du, gerard.arbat@udg.edu, francisco.ramirez@udg.edu, jaume.puig@udg.edu
[3] Departamento de Mecatrónica y Electromecánica; Facultad de Ingenierías; Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín; diegohincapie@itm.edu.co

Abstract: The backwashing in pressurized granular media filters is a fluidized bed process that allows restoring filtration capacity but is energy demanding. Redesigns to improve the energy efficiency of these filters require of models that correctly predict the backwashing regime. Although fluidization has been largely studied in chemical engineering, very few studies have focused on media filters used in drip irrigation. The present work aims to evaluate the capabilities of previously developed analytical equations for estimating the expanded bed height in the backwashing regime. Laboratory experiments with a scaled filter for two types of porous media (silica sand and microspheres) have been carried out at different superficial velocities. Bed expansion equations for both types of porous media as a function of the superficial velocity have been obtained by fitting experimental data. These results have been also compared with the expanded bed heights predicted from previously published equations. The simple analytical model that better reproduces both the bed expansion and the fluidized bed porosity corresponds to that recently developed by our group. This conclusion is confirmed when estimating bed expansion values of commercial pressurized filters recently reported by an independent study.

Palabras clave: contralavado, fluidización, lecho granular, expansión, riego por goteo.

1. Introducción

Los escenarios futuros a corto plazo predicen cambios en la distribución de las lluvias que pueden comprometer la disponibilidad de agua dulce perjudicando gravemente la producción alimentaria en muchas regiones [1], siendo la cuenca mediterránea una de las áreas más vulnerables puesto que es especialmente sensible al cambio climático [2]. Sin embargo, estudios recientes indican que la adopción de acciones de mitigación puede compensar los impactos actualmente esperados [3]. En este sentido, los avances tecnológicos pueden garantizar la sostenibilidad agrícola mediante la mejora de la eficiencia energética y la reducción del consumo de agua [4]

El riego por goteo es una técnica ampliamente utilizada que permite, aumentar la productividad de los cultivos reduciendo el uso del agua [5]. Esta técnica de riego requiere de filtros, en los cuales se separan las partículas sólidas que se encuentran en suspensión en el fluido, disminuyendo así la posibilidad de obturación de los goteros [6]. La presencia de goteros obturados reduce la uniformidad de distribución del agua de riego, causando menores rendimientos de los cultivos [7].

La caída de presión en el filtro aumenta a medida que se retienen partículas en el medio poroso y, en consecuencia, los requerimientos energéticos se incrementan [8]. Para evitar un

consumo de energía excesivo y una posible obturación del filtro, se realiza el proceso de retrolavado, el cual elimina las partículas acumuladas en el lecho filtrante. En esta etapa, se revierte el sentido de flujo respecto al del régimen de filtración con una velocidad que provoca la fluidización del lecho y la expansión medio filtrante, lo cual permite arrastrar las partículas retenidas en el lecho de filtración [9]. Este proceso de expansión controlada requiere consumos de energía y agua más elevados que los necesarios durante la fase de filtrado. Por ello, es necesario disponer de herramientas que puedan predecir el comportamiento del retrolavado y así decidir cuáles son las condiciones de operación más eficientes. El objetivo del presente trabajo ha sido evaluar distintas ecuaciones que permitan estimar la expansión del lecho durante el retralavado de los filtros de arena.

2. Materiales y métodos

2.1. Dispositivo experimental

El montaje experimental en retrolavado consistió en un sistema de circuito cerrado como se puede observar en la Figura 1A, el cual disponía de un depósito con capacidad de 100 L que se rellenaba con agua de red. El agua del depósito se conducía hasta el filtro por una tubería de acople rápido de 20 mm de diámetro interior mediante una bomba centrífuga (Prisma 20/4 M, ESPA), conectada a un contador volumétrico (420PC, Sensus) para caracterizar su caudal. El flujo se regulaba mediante válvulas de bola. El filtro estaba fabricado en polimetilmetacrilato (PMMA) para permitir la visualización del proceso de fluidización en condiciones de retrolavado. El filtro, construido a escala de laboratorio, tenía 110 mm de diámetro interno y 200 mm de altura total. En la parte inferior del filtro se encontraba un soporte con un tamiz de acero inoxidable con abertura de 0,85 mm, el cual permitía el paso del agua en dirección de retrolavado, pero que retenía el medio granular (para mayor detalle véase la Figura 1B). Los experimentos se grabaron mediante una videocámara (HDR-CX105E, SONY).

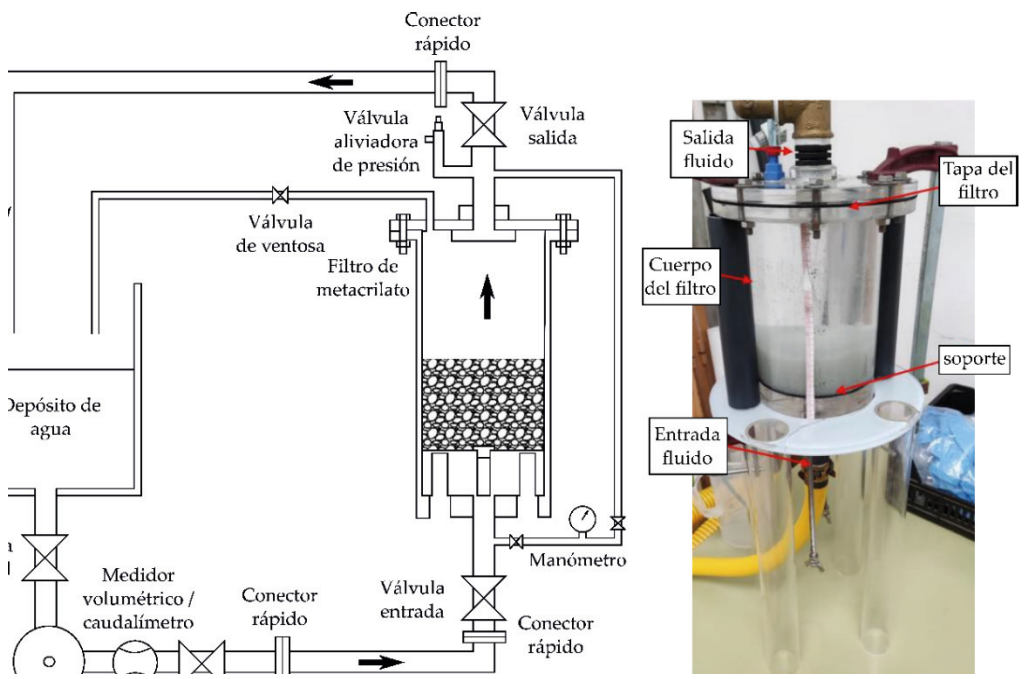


Figura 1. Montaje experimental. A) Diseño esquemático, B) filtro de polimetilmetacrilato.

2.2. Procedimiento experimental

Los ensayos de retrolavado se realizaron con dos materiales de lecho filtrante: microesferas de vidrio y arena de sílice. Ambos materiales se tamizaron previamente a su uso para disponer de un determinado rango de tamaños (véase la Tabla 1). Antes de realizar los ensayos, se lavaron los lechos hasta que el agua del producto del lavado presentara una turbidez inferior a 1,5 unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

Las características de los materiales utilizados como medio poroso se pueden observar en la Tabla 1, donde la determinación del diámetro equivalente (D_{eq}), la esfericidad (ψ) y la porosidad (ε) se obtuvo del estudio previo de Bové et al. [10].

Tabla 1. Propiedades de los materiales utilizados como medios porosos [10].

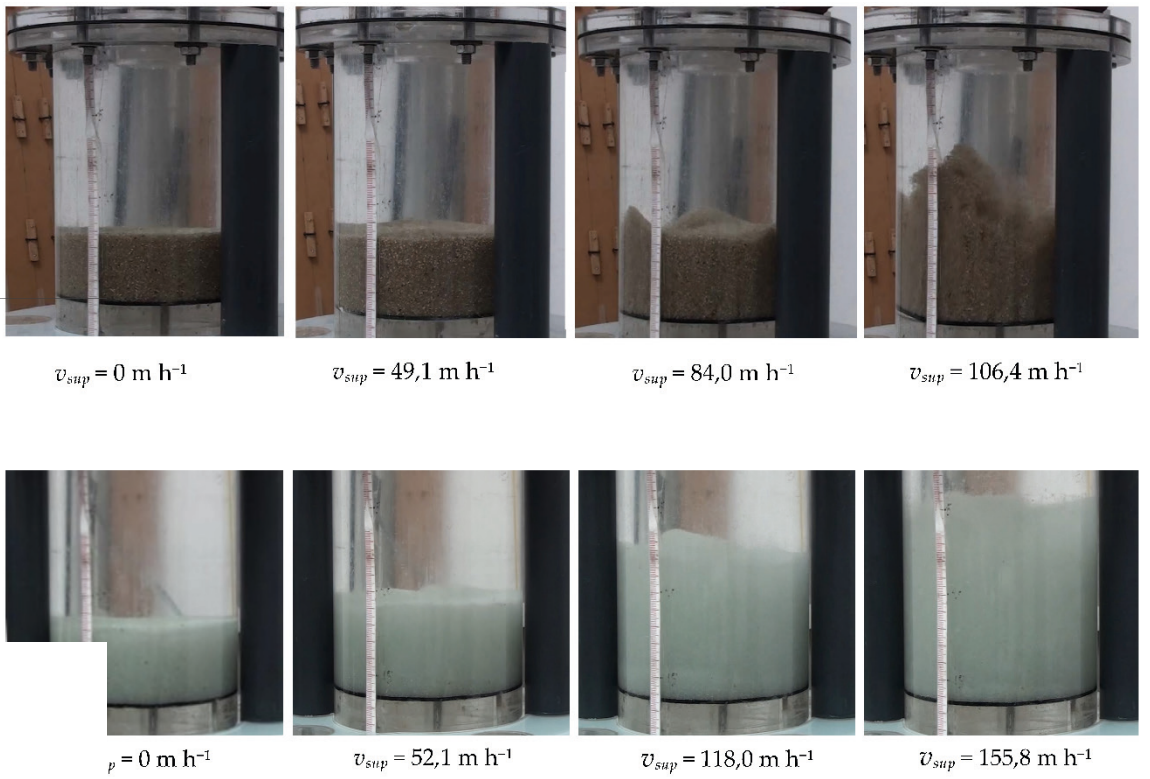
Propiedad	Unidades	Arena de sílice	Microesferas de vidrio
Tamaño de grano	(mm)	0,75 – 0,85	0,63 – 0,75
Diámetro equivalente D_{eq}	(mm)	0,92	0,65
Esfericidad ψ	(-)	0,89	1,00
Porosidad ε	(-)	0,40	0,38
Densidad ρ	(kg m^{-3})	2.510	2.436

En los experimentos, se abría gradualmente la válvula de entrada del filtro desde su posición completamente cerrada. En cada posición de apertura de la válvula de entrada, el caudal volumétrico se calculó midiendo el tiempo necesario para hacer circular 5 litros. Este cálculo se repitió 3 veces para cada grado de apertura. Los errores relativos del caudal y de la velocidad superficial fueron inferiores al 4%. La altura del lecho granular fue medida utilizando una regla unida al cuerpo del filtro analizando las grabaciones (datos extraídos a intervalos de 2 s para un mínimo de 60 s). Todo el proceso fue repetido dos veces para cada medio poroso. La altura medida en el lecho a velocidad nula confirmó la suposición de pérdidas del medio no relevantes en los ensayos anteriores.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados de laboratorio

La Figura 2 muestra la expansión de los lechos a diferentes velocidades superficiales (v_{sup}). La apertura máxima de la válvula en la entrada se determinó mediante observación para evitar pérdidas de medio poroso debido a un exceso de expansión del lecho. Los valores de la v_{sup} máxima fueron de 156 m h^{-1} para microesferas de vidrio y 127 m h^{-1} para arena de sílice. En la Figura 2A se puede observar el lecho de arena de sílice con una altura inicial (l_0) de 40 mm, además de su comportamiento fluidodinámico a medida que se aumenta el caudal. En la Figura 2B se contempla el comportamiento en expansión de las microesferas de vidrio donde l_0 = 32 mm. De los comportamientos de expansión se puede determinar que las microesferas de vidrio tuvieron un comportamiento más estable que la arena de sílice.



Los datos experimentales obtenidos se muestran en la Figura 3, donde se observa que el porcentaje de expansión máxima de las microesferas de vidrio fue del 137,5 % a una v_{sup} de 155,8 m h^{-1}, mientras que para la arena de sílice se observó una expansión máxima del 157,5 % a una v_{sup} de 192,6 m h^{-1}. El comportamiento fluidodinámico obtenido es coherente puesto que, a mayor densidad, la expansión de la arena de sílice debe ser menor a v_{sup} similares. Por ello, la velocidad mínima de fluidización es mayor para la arena de sílice que para las microesferas de vidrio, puesto que la arena tenía una mayor densidad (Tabla 1).

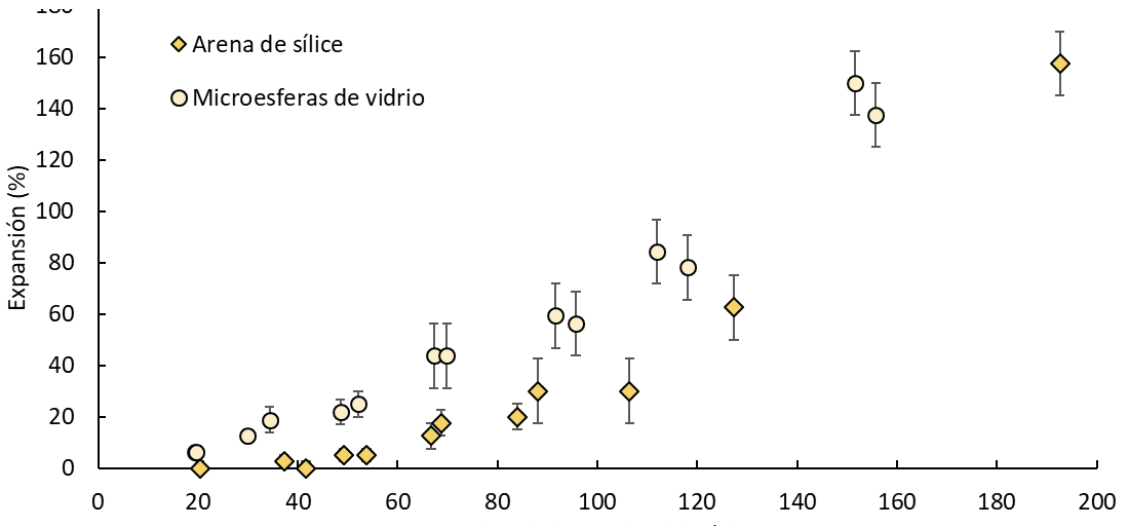


Figura 3. Porcentaje de expansión del medio poroso en función de la velocidad superficial para ambos materiales.

3.2. Estimaciones matemáticas

Diferentes autores han propuesto estimaciones para determinar la expansión del lecho poroso con base a diferentes criterios, desde ecuaciones de Ergun [11], hasta desarrollos propios para retrolavado como Dharmarajah y Cleasby [12], Soyer y Akgiray [13] y, más recientemente, Kramer *et al* [14] y Graciano *et al* [15]. El presente estudio incluye las dos ecuaciones siguientes, una para cada medio, obtenidas a partir de ajustes polinómicos de orden 3 por mínimos cuadrados de los datos de la Figura 3.

La Ecuación (1) representa como variable dependiente el porcentaje de expansión E(%) de la arena de sílice respecto a la variación de v_{sup} con un R^2 = 0,993, mientras que la Ecuación (2) representa el E(%) de las microesferas de vidrio con un R^2 = 0,985. La comparación de los datos experimentales con las predicciones obtenidas mediante el desarrollo de les ecuaciones publicadas en [11-15], así como con las ecuaciones calculadas (1-2) se puede observar en la Figura 4. Los datos en forma de triángulo son los determinados por Ec.(1) para arena silícea y la Ec. (2) para

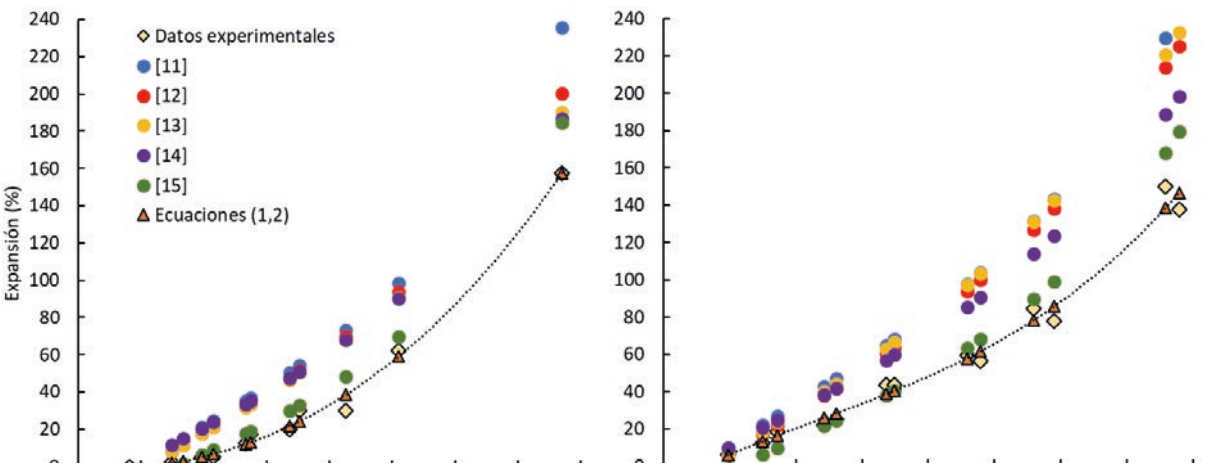


Figura 4. Comparación de ecuaciones con datos experimentales: A) Arena de sílice, B) microesferas de vidrio.

A medida que el medio poroso se expande, se incrementa el espacio entre los granos, es decir, la porosidad del lecho (ε). En la Figura 5 se compara la porosidad medida en los ensayos experimentales con la porosidad que determinada con las estimaciones matemáticas de las ecuaciones anteriormente nombradas. Debido a que las Ecs. (1-2) son ajustes a los datos, ambas ecuaciones presentan un mejor comportamiento que las ecuaciones de las referencias [11-15], como era de esperar. La estimación de Graciano *et al.* [15] tiene un buen comportamiento en la predicción de ε para sílice de arena a lo largo de las v_{sup} del ensayo experimental, mientras que en microesferas de vidrio en el rango de v_{sup} de 90 m h^{-1} a 155 m h^{-1} tiene una buena predicción de ε. La estimación de Kramer *et al* [14] es la tercera ecuación que más se acerca a los datos experimentales, especialmente a los datos del medio poroso de las microesferas de vidrio, mientras que en arena de sílice Dharmarajah y Cleasby [12] se aproximaron más a v_{sup} inferiores a 125 m h^{-1}.

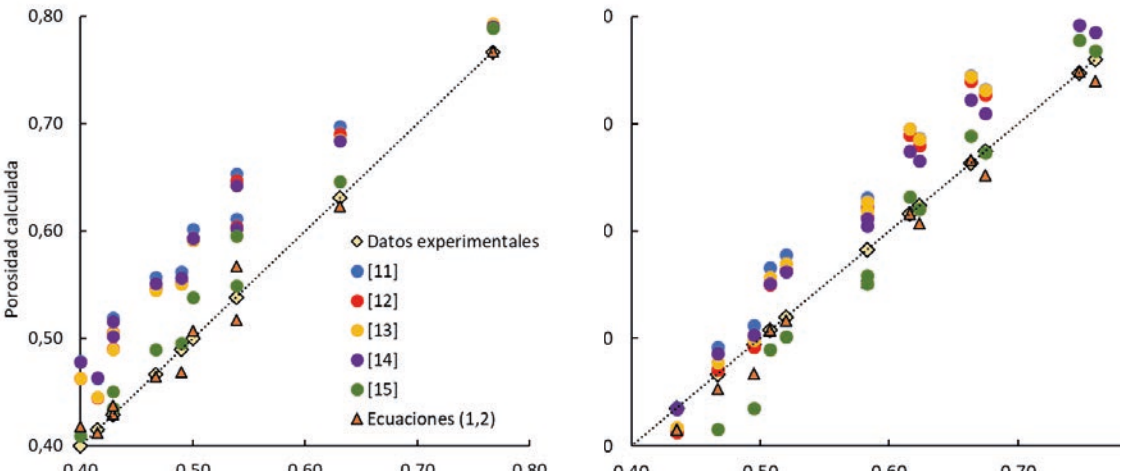


Figura 5. Comparación de porosidad experimental entre la calculada: A) Sílice de arena, B) microesferas de vidrio.

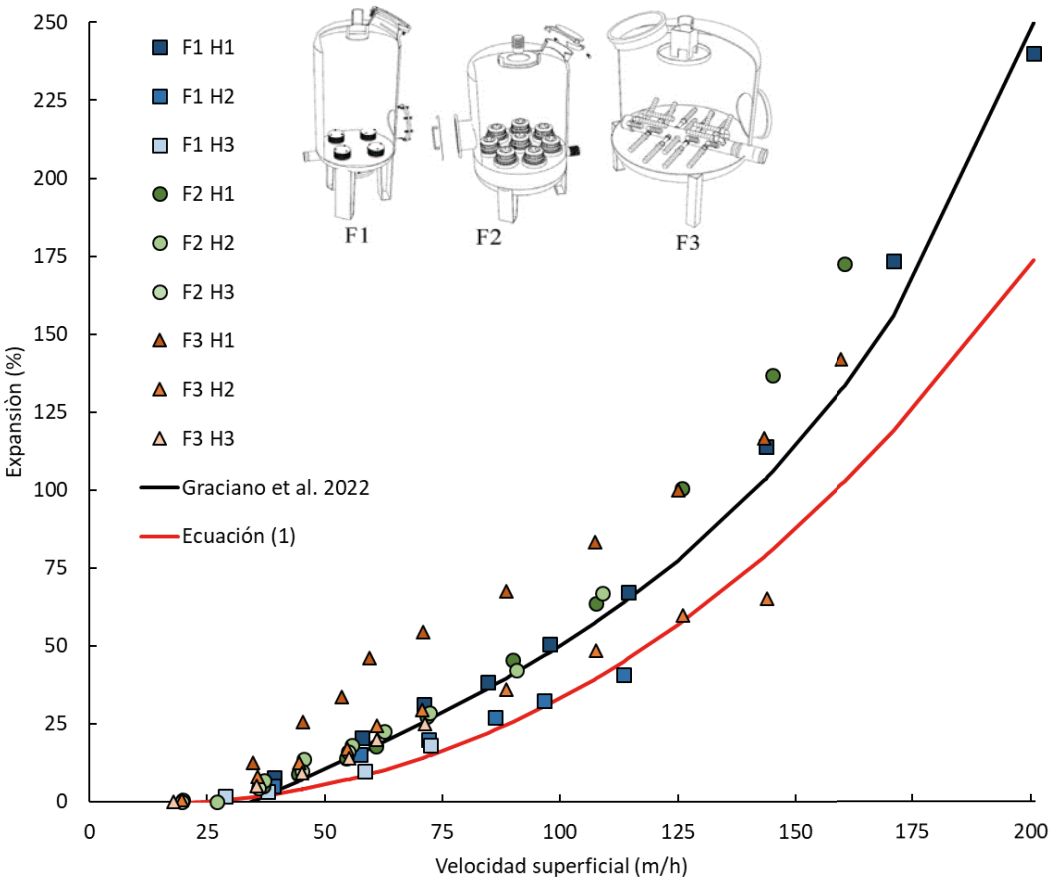
3.3. Aplicación a filtros de arena comerciales

Para intentar extrapolar los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio a filtros comerciales para instalaciones de riego, se utilizaron los datos experimentales publicados por de Deus *et al*. [16]. Estos autores realizaron un estudio muy amplio utilizando 3 tipos de drenaje de filtros comerciales con 3 alturas iniciales de lecho de arena para cada filtro (Tabla 2) y 3 rangos de tamaño de grano.

Tabla 2. Casos estudiados por de Deus et al. [16].

Filtro comercial	Diámetro del filtro (mm)		
		H1	H3

La Figura 6 muestra la comparación de los casos descritos en la Tabla 2 con la predicción obtenida con la Ec. (1) y la de Graciano *et al* [15]. Únicamente se utilizaron los resultados de Deus *et al.* [16] que se obtuvieron con el rango de tamaño de grano de 0,5 mm a 1,0 mm, debido que es el más similar al utilizado en el presente estudio para determinar la Ecuación (1). Puesto que de Deus *et al*. [16] sólo trabajaron con arena, la Ecuación (2) no se compara puesto que fue obtenida para las microesferas de vidrio. Se observa como la ecuación para predecir la expansión en Graciano *et al* [15] reproduce con éxito el comportamiento en retrolavado del filtro con crepinas. Sin embargo, claramente subestima la expansión del lecho para el filtro con brazos colectores, especialmente para alturas de lecho pequeñas (H1). Este último, muestra una expansión más elevada que empleando otras tecnologías de drenaje a velocidades de hasta 110 m h^{-1}. El ajuste realizado con los datos experimentales (Ec. (1)) sólo reproduce correctamente el comportamiento del filtro con crepinas en el escenario de mayor altura de lecho (H3).



experimentales de Deus *et al.* [165] en filtros de laboratorio.

4. Conclusiones

La ecuación analítica recientemente publicada por Graciano *et al*. [15] representó correctamente el comportamiento de la expansión observada en un filtro a escala laboratorio utilizando dos medios porosos (arena de sílice y microesferas de vidrio). Esta ecuación también se aproximó más a las predicciones de la expansión del lecho para la mayoría de los casos publicados en filtros comerciales por de Deus *et al.* [16], a excepción de los resultados de los brazos colectores para poca altura de lecho. Por ello, se considera que el modelo de Graciano *et al*. [15] es adecuado como una herramienta de diseño para predecir el grado de expansión de filtros de arena comerciales con crepinas como drenaje.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del proyecto RTI2018-094798-B-100, en el que se enmarca el presente trabajo, por parte de la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

Referencias

55. Schewe J., Heinke J., Gerten D., Haddeland I., Arnell N. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014, 111, 3245-3250.
56. Pörtner H., Roberts D., Poloczanska E., Mintenbeck K., Tignor M., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V. IPCC, 2022: Summary for policymakers. 2022.
57. Jorda-Capdevila D., Gampe D., García V., Ludwig R., Sabater S., Vergoñós L., Acuña V. Impact and mitigation of global change on freshwater-related ecosystem services in Southern Europe. Science of The Total Environment. 2019, 651, 895-908.
58. Martos V., Ahmad A., Cartujo P., Ordoñez J. Ensuring Agricultural Sustainability through Remote Sensing in the Era of Agriculture 5.0. Applied Sciences. 2021, 11, 5911.
59. Zou H., Fan J., Zhang F., Xiang Y., Wu Lu., Yan S. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes for high grain yield, crop water productivity and economic benefits of spring maize in Northwest China. Agricultural Water Management. 2020, 230, 105986.
60. Duran-Ros M., Solé-Torres C., Ait-Mouheb N., Molle B., Arbat G., Puig-Bargués J. Media filter fouling assessment using optical coherence tomography: New methodology. Biosystems Engineering. 2021, 204, 26-35.
61. Solé-Torres C., Lamm F. R., Duran-Ros M., Arbat G., Ramírez de Cartagena F., Puig-Bargués J. Assessment of microirrigation field distribution uniformity procedures for pressure-compensating emitters under potential clogging conditions. Transactions of the. ASABE. 2021, 64 (3), 1063-1071.
62. Garb Y., Friedlander L. From transfer to translation: Using systemic understandings of technology to understand drip irrigation uptake. Agricultural Systems. 2014, 128, 13–24.
63. Pujol T., Puig-Bargués J., Arbat G., Duran-Ros M., Solé-Torres C., Pujol J., Ramírez de Cartagena F. Effect of wand-type underdrains on the hydraulic performance of pressurised sand media filters. 2020, 192, 176- 187.
64. Bové J., Arbat, G., Duran-Ros M., Pujol T., Velayos J., Ramírez de Cartagena F., Puig-Bargués J. Pressure drop across sand and recycled glass media used in micro irrigation filters. Biosystems Engineering. 2015, 137, 56-63.
65. Ergun S. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress. 1952. 48. 89-94.
66. Dharmarajah A., Cleasby J. Predicting the expansion behavior of filter media. Journal American Water Works Association. 1986, 78, 66-76.
67. Soyer E., Akgiray O. A new simple equation for the prediction of filter expansion during backwashing. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA. 2009, 58, 336.
68. Kramer O., Padding J., van Vugt W., de Moel P., Baars E., Boek E., van der Hoek J. Improvement of voidage prediction in liquid-solid fluidized beds by inclusion of the Froude number in effective drag relations. International Journal of Multiphase Flow. 2020, 127, 103261.
69. Graciano-Uribe J., Pujol T., Hincapie-Zuluaga D., Puig-Bargués J., Duran-Ros M., Arbat G., Ramírez de Cartagena F. Bed expansion at backwashing in pressurised porous media filters for drip irrigation: Numerical simulations and analytical equations. Biosystems Engineering. 2022, 223, 277-294.
70. de Deus F., Mesquita M., Salcedo J., Testezlaf R., de Almeida R. Hydraulic characterisation of the backwash process in sand filters used in micro irrigation. Biosystems Engineering. 2020, 192, 188-198.

Monitoring technologies in paddy rice fields. Case study in Lower Mondego Valley

J. M. Gonçalves[1], V. Carantino[2], L. Pascal[2], M. Nunes[1], S. Oliveira[1], S. Ferreira[1], J. Hastwell[2], H. Phan[2]

[1] Instituto Politécnico de Coimbra, Escola Superior Agrária de Coimbra, 3045-601 Coimbra, Portugal; jmmg@esac.pt; mnunes@esac.pt; sergio_luis_92@hotmail.com; susanacatarinaferreira@gmail.com.

[2] CarbonFarm Technology, www.carbonfarm.tech/; vassily@carbonfarm.tech; laurene@carbonfarm.tech; james@carbonfarm.tech; hoa@carbonfarm.tech.

Abstract: Rice is a strategic crop for food security. Due to factors such as climate change, population growth and increased civil society attention on environmental impacts of human activities, there is pressure on the rice production sector to reduce water consumption, methane emissions and soil and water pollution. New solutions are envisaged that provide real-time access to a wide range of soil, water and crop data, with the potential to optimise crop management and irrigation automation. As a contribution to solving this problem, an experimental field work is being developed in the Lower Mondego Valley, in Portugal. Monitoring technologies are being applied in paddy rice systems, using sensors and telemetry, in order to evaluate their performance. The aim is to develop an effective solution for the improvement and sustainability of rice farming. The preliminary results already obtained are very positive. They indicate that the simplification of field operations and the use of a digital platform will allow a high degree of automation of monitoring in obtaining data and its application in decision support. The use of sensors with telemetry and data processing in real time will be tested to support the management of water on farms, aiming at the automation of irrigation, and the reduction of salinization risks, especially in areas where this water is reused for irrigation.

Keywords: Rice irrigation; environmental sustainability; water saving; best management practices; water management automation.

1. Introduction

Rice is a strategic production for food security, a cereal nutritionally alternative to wheat, and an important economic exchange-earning agriculture product [1,2]. Due to factors such as climate change, growing population, higher attention of civil society to the environmental impacts of human activities, there is pressure on the rice production sector to reduce water consumption, methane emissions, and soil and water pollution [3-5]. Changes are urgently needed in the productive paradigm, through the best management practices (BMP) that include effective improvements on irrigation, fertilization, and sanitary control. Therefore, it is crucial to develop innovative monitoring procedures to reduce environmental risks and increase the effectiveness of the productive process [6]. New solutions are envisaged that allow real time access to a wide range of soil, water and crop data, with the potential to optimize the crop management and the irrigation automation [7-9].

As a contribution to solving this problem, an experimental field work is under development, within the scope of the PROMEDRICE project, carried out in the Lower Mondego Valley, located in the Central Coast of Portugal. This project aims to collect the relevant information regarding the status of water resources in the study area and implement monitoring networks to bridge the knowledge gaps on the main pressures exerted on water resources in rice-growing areas. It uses participatory action research to co-develop and test on-farm BMP tailored to local conditions to

improve both water availability and quality while ensuring rice farmers economic sustainability. Stake-Holder Panels participates to develop tailored solutions to protect water and soil while considering local specificities. To bring innovation in rice systems, the project will make use of advanced monitoring and management devices and procedures using spatially distributed information acquired by remote sensing, ground sensors and weather data, as well as irrigation scheduling models and irrigation automation solutions to increase irrigation efficiency and improve water protection. Irrigation practices whose effect on nutrients, salts and targeted pesticides are tested at farm scale, including alternating wetting and drying, and water recirculation and blending. It is expected to develop practical guidelines for farmers support to handle the new proposed water saving techniques and effective rice management practices, including fertilization ones, aiming the sustainability of the rice-based agroecosystems.

This paper presents the work in progress started in 2022, explaining the monitoring procedure, its performance, and preliminary results, aiming to obtain a consistent and effective technological solution for the improvement and sustainability of rice cultivation.

2. Material and Methods

2.1. Lower Mondego Valley study site

The study site was the Lower Mondego Valley (LMV), located in Central Coast of Portugal, with a total irrigated area of about 12000 ha, and a rice area of about 6000 ha (Figure 1). This region has a Mediterranean climate, Csb and Csa of Köppen classification, with an annual average precipitation of about 800 mm to 900 mm. It has temperate and mild summers, with virtually no rainfall, and rainy winters with mild temperatures (Figure 2). Soils are mainly alluvial with high agricultural quality, some of which are poorly drained, with waterlogging and salinization risks, particularly on the downstream areas where rice is cultivated in paddies, with brackish or saline groundwater. The river water used for irrigation is diverted and conveyed mainly by gravity, from weirs, through a collective system. The critical issues to be addresses are the environmental risks related with soil salinization and water pollution and economic sustainability of rice cropping.

Rice is cultivated in traditional paddies, on lower soils with heavy texture and poor drainage, with a shallow and relatively saline groundwater table. Paddies are irrigated by continuous flooding, with ca. 10 cm of ponding depth, and a frequency varying from daily to a few days. They are highly water demanding due to a significant deep percolation, and surface drainage. The flooding of paddies plays several determinant roles [10]: (i) temperature regulation during the first weeks of crop development, due to microclimatic imperatives, particularly during night-time in the initial phase of the cycle and during flowering; (ii) after sowing, to avoid seed collecting by wild birds; (iii) control of weeds development; (iv) control of the crop damage due to the strong wind; and (v) soil salt leaching in susceptible areas. In its turn, the initial drainage periods enable, for example: (i) the application of phytopharmaceuticals, especially herbicides and fungicides; and (ii) a good rooting of the seedlings, while avoiding soil hardening, and a reduction of algal proliferation on surface water.

Several plots where rice is cultivated have been selected to carry out field experiments, in order to monitor paddy rice agricultural practices (Figure 1). There plots allowed to obtain a sampling of different areas of the LMV, in relation to the characteristics of irrigation water, soil and proximity to the Atlantic coast and the corresponding effect of salinity.



Figure 1. Geographic location of the Lower-Mondego Valley and experimental sites (red numbers, 1 to 6, locates the trial fields); Google Maps, https://maps.google.pt (accessed on 06 April 2023).

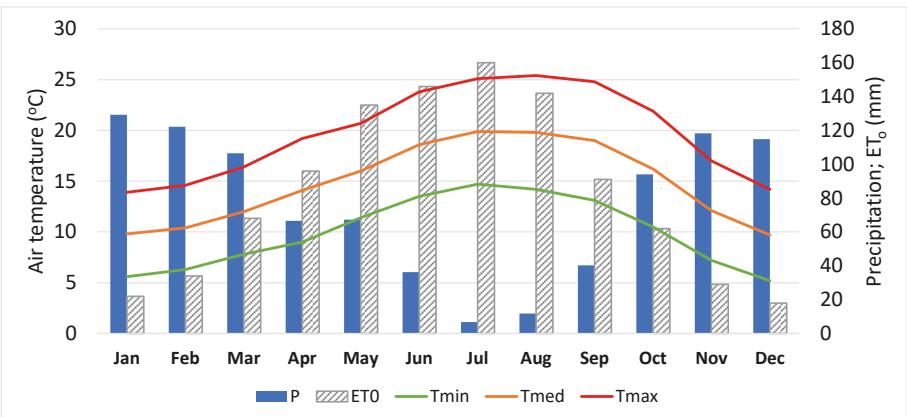


Figure 2. Average monthly air temperature, precipitation, and reference evapotranspiration of the Lower Mondego study area, relative to the 1981–2021 period (P—precipitation; ET_0—reference evapotranspiration; T_{min}—minimum air temperature; T_{med}—medium air temperature; T_{max}—maximum air temperature) (source: [11]).

2.2. Monitoring methodology

Paddy field water level (FWL) is the depth of ponded water above soil surface, or the subsurface water level below the soil surface. It was considered the following methods to FWL measurement and record:

i) Pani-pipes (water tubes) equipped with automatic water level sensors based on absolute pressure measurement (In-Situ Inc., model Rugged TROLL 100, Fort Collins, USA). They consisted of PVC pipes 40 cm long and 10 cm in diameter, placed on soil at 25 cm depth, having holes with 1 cm in diameter through which the soil water flows into its lumen,

allowing the observation of FWL and the measurement with a piezometric head. Pressure data were complemented with the measurement of the atmospheric pressure through a barometer located nearby. Regularly, at least once a month, the data from loggers were downloaded to a PC for further data analysis.

ii) Pani-pipes equipped with automatic water level sensors based on ultrasonic measurement, linked with gateways using LoRa technology, a solution designed and managed by CarbonFarm Technology [12]. The sensors communicate with the gateway through the LoRa network, and the gateway communicates the field water levels to the cloud in real time. The field water levels are then registered in a database and automatically calibrated. An online access enables farm users to visualize field data in real time (Figure 3).

During the crop season, manual FWL measurements were carried out in the water tubes with a ruler, and the data were used for testing and calibrating the sensors. The irrigation inflow water accounting carried out with flume devices [10].





Figure 3. Left photo: Field placement of a pani-pipe with a FWL sensor with a telemetry device; Right photo: Antenna and gateway on the top of a pumping station building.

The meteorological observations were carried out with automatic weather stations installed near the experimental sites, with a set of sensors for air temperature and humidity, solar radiation, and wind speed, and remote communication tool via GSM to the several data users [10]. Daily reference evapotranspiration was calculated by Penman–Monteith method, based on Allen et al. procedure [13]. The daily crop evapotranspiration (ET_c) was calculated through the crop coefficients of 1.25 for flooding condition, and 1.10 for dry periods [13].

These measurements allowed obtaining daily data from the system, necessary for the daily water balance method that enabled to calculate the deep percolation (DP), by applying the Equation (1),

$$DP = P + I - ETc - SD - \Delta SW, \quad (1)$$

which requires the values of precipitation (P), irrigation (I), surface drainage (SD), and storage difference of surface or subsurface soil water (ΔSW) [10].

The crop yield parameters were determined at harvest, collecting the aerial part of the total rice plants in diverse unit areas of 0.5 m^2, with about 5-unit areas per hectare. The biomass harvest was latter processed in the laboratory, determining the dry matter of grain with 14% of humidity and straw and the weight of 1000 grains.

Based on the irrigation water applied (I, $m^3\ ha^{-1}$), precipitation (P, $m^3\ ha^{-1}$) and yield (Y, kg ha^{-1}), the water productivity (WP, kg m^{-3}) was calculated through the Equation (2),

$$WP = Y/(P + I). \quad (2)$$

3. Results and Discussion

FWL data shown the pattern of paddy rice water management, as exemplified by Figure 4. It evidences the several soil drying periods. The water depth above soil surface usually varies between 5 and 10 cm, and the level below soil surface reached a depth higher than 15 cm. This example shows that for 41 days (30%) of a total crop period of 135 days, the soil was not flooded, due to three drying periods on vegetative phase, and the drying period on final of maturation phase.

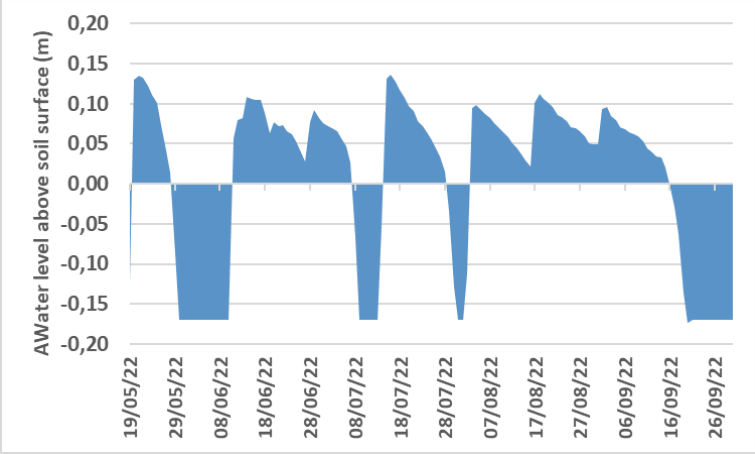


Figure 4. Water level above and below the soil surface (m) on a rice field during 2022 rice crop season.

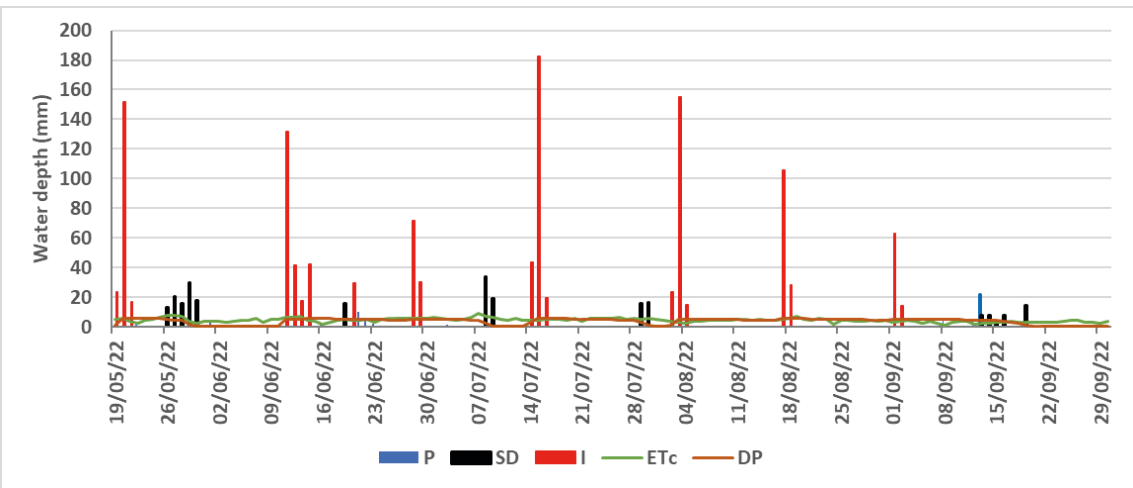


Figure 5. Daily values of water use components on a trial plot during 2022 rice crop season (ET_c—Crop Evapotranspiration (mm); DP—Deep percolation (mm); P—Precipitation (mm); I—Irrigation (mm); SD—Surface Drainage (mm)).

Daily values of water use components - ET_c, P, DP, and SD - on a control plot are presented in Figure 5. This quantitative information allows a very detailed characterization of water and crop management practices, being crucial information for evaluating the production process and planning its improvement. The seasonal water use parameters of one experimental plot are presented on Table 1. The observed gross irrigation depth of 1205 mm is within the normal values in LMV, usually between 1200 mm and 1500 mm. The value of WP of 0.625 kg/m^3 is also within the normal values, between 6.0 and 6.7 kg/m^3.

Table 1. Seasonal water use parameters in an experimental rice field, during the 2022 crop season.

I (mm)	P (mm)	ET_c (mm)	DP (mm)	SD (mm)	Y (t/ha)	WP (kg/m³)
1205	73.2	614.4	502.8	241.0	8.0	0.625
+94%	+6%	-48%	-39%	-13%		

ET_c—Crop Evapotranspiration (mm); DP—Deep percolation (mm); P—Precipitation (mm); I—Irrigation (mm); SD—Surface Drainage (mm); Y—Yield (t whole rice grain, 14% of humidity/ha); WP—Water Productivity (Y(kg/ha)/(I + P, m³/ha) (kg/m³)).

4. Final considerations

Monitoring preliminary results allowed to test the methodology and the feasibility of the equipment. Data analysis of all experimental plots will allow a better characterization of water management practices in rice paddies and their relationship with crop growing operations. This information will be complemented with drainage water quality data to assess the potential for pollution of water resources, namely with nitrates.

Controlling the salinity of drainage water is an aspect to be analysed in the 2023 campaign, especially in areas where this water is reused for irrigation. The use of sensors with telemetry and real-time data processing will simplify management and reduce salinization risks.

A next step in the study will be the integration of the information obtained through monitoring into a support model for crop management with a view to optimizing it and automating irrigation management.

5. Funding and Acknowledgments:

Project PROMEDRICE-PRIMA-0007-2022: "Effective farming practices to protect water resources in Mediterranean rice-based agroecosystems", funded by Portuguese Foundation for Science and Technology, and the Lower Mondego Valley Farmers which form part of the Stake-Holder Panel.

References

71. Datta, A.; Ullah, H.; Ferdous, Z. Water Management in Rice. In Rice Production Worldwide; Chauhan, B.S., Ed.; Springer Int. Pub. AG., Cham, Switzerland: 2017; pp. 255-277; https://doi.org/10.1007/978-3-319-47516-5_11
72. Tuong, T.P.; Bouman, B.A.M. Rice Production in Water-Scarce Environments. In Water Productivity: Limits and Opportunities for Improvement; Kijne, J.W.; Barker, R.; Molden, D. Eds.; CABI Pub.: Oxon, UK, 2003; pp. 53–67.
73. Balaine, N.; Carrijo, D.R.; Adviento-Borbe, M.A.; Linquist, B. Greenhouse Gases from Irrigated Rice Systems under Varying Severity of Alternate-Wetting and Drying Irrigation. Soil Sci. Soc. Am. J. 2019, 83, 1533–1541. https://doi.org/10.2136/sssaj2019.04.0113.
74. Linquist, B.; Anders, M.M.; Adviento-Borbe, M.A.A.; Chaney, R..; Da Roda, E.F.F.; Van Kessel, C. Reducing greenhouse gas emissions, water use, and grain arsenic levels in rice systems. Glob. Change Biol. 2014, 21, 407–417.
75. Samoy-Pascual, K.; Yadav, S.; Evangelista, G.; Burac, M.A.; Rafael, M.; Cabangon, R.; Tokida, T.; Mizoguchi, M.; Regalado, M.J. Determinants in the Adoption of Alternate Wetting and Drying Technique for Rice Production in a Gravity Surface Irrigation System in the Philippines. Water 2022, 14, 5. https://doi.org/10.3390/w14010005.

76. Jalindar, M.K.; Rao, V.P.; Ramulu, V.; Kumar, K.A.; Devi, M.U. Effectiveness of field water tube for standardization of alternate wetting and drying (AWD) method of water management in lowland rice (Oryza Sativa L.). Irrig. Drain. 2019, 68, 679–689.
77. Pham, V.B.; Diep, T.T.; Fock, K.; Nguyen, T.S. Using the Internet of Things to promote alternate wetting and drying irrigation for rice in Vietnam's Mekong Delta. Agron. Sustain. Dev. 2021, 41, 43. https://doi.org/10.1007/s13593-021-.00705-z.
78. Masseroni, D.; Moller, P.; Tyrell, R.; Romani, M.; Lasagna, A.; Sali, G.; Facchi, A.; Gandolfi, C. Evaluating performances of the first automatic system for paddy irrigation in Europe. Agric. Water Manag. 2018, 201, 58–69. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.0190378-3774.
79. Siddiqui, M.; Akther, F.; Rahman, G.M.E.; Elahi, M.M.; Mostafa, R.; Wahid, K.A. Dimensioning of Wide-Area Alternate Wetting and Drying (AWD) System for IoT-Based Automation. Sensors 2021, 21, 6040. https://doi.org/10.3390/s21186040.
80. Gonçalves, J.M.; Nunes, M.; Ferreira, S.; Jordão, A.; Paixão, J.; Eugénio, R.; Russo, A.; Damásio, H.; Duarte, I.M.; Bahcevandziev, K. 2022. Alternate Wetting and Drying in the Center of Portugal: Effects on Water and Rice Productivity and Contribution to Development. Sensors 2022, 22, 3632. https://doi.org/10.3390/s22103632.
81. IPMA. Home Page. Available online: www.ipma.pt (accessed on 10 February 2023).
82. CARBONFARM TECH Home Page. Available online www.carbonfarm.tech/ (accessed on 13 April 2023).
83. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration. In Guidelines for Computing Crop Water Requirements; FAO Irrigation and drainage paper 56; FAO: Rome, Italy, 1998; 300p.



Análisis multidisciplinar de la sustitución de recursos hídricos convencionales por no convencionales en los cultivos de la cuenca del Segura

Victoriano Martínez-Alvarez[1], Saker Ben Abdallah[1], Alberto Imbernón-Mulero[1], Belén Gallego-Elvira[1], José F. Maestre-Valero[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII 48, 30203 Cartagena, España; victoriano.martinez@upct.es saker.benabdallah@upct.es

Abstract: Seawater desalination has provided an increasing supply of agricultural water for the last decade in south-eastern Spain, overcoming climatological and hydrological constraints. This article analyses the impacts of the progressive replacement of traditional irrigation water with non-conventional resources on the main crops of the Segura River Basin, from agronomic, environmental, and economic perspectives. To that end, five impact indicators were identified and calculated for three water supply scenarios using increasing proportions of desalinated seawater.

The results reflect the high variability of the impact indicators for the different crops. The agronomic impact is generally favourable but the benefits of reducing water salinity become saturated when desalinated seawater exceeds 50%. The detrimental environmental impact is due to the higher specific energy consumption associated with increased desalinated seawater supply, although this is not an intrinsic problem of seawater desalination since it could be mitigated using renewable energies. The economic impact is very sensitive to the cost of desalinated seawater and offers heterogeneous results for the different crops. The results show that the combined use of non-conventional with traditional resources is the most efficient option from the different perspectives of the study.

Palabras clave: Regadío, Desalación, Resiliencia, Evaluación agronómica, Análisis de ciclo de vida, Evaluación económica.

1. Introducción

La persistente escasez de recursos hídricos en el sureste español ha impulsado la utilización de fuentes no convencionales, como las aguas regeneradas y la desalinización de agua de mar, especialmente en la agricultura de regadío. Como consecuencia, en la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS) ya se está reutilizando cerca del 100% del volumen de agua regenerada para riego (aproximadamente 100 hm^3/año) y, además, se están incorporando en torno a 150 hm^3/año de Agua Marina Desalinizada (AMD) al regadío. Como resultado, se está produciendo una progresiva sustitución de los recursos hídricos convencionales, cuya disponibilidad se reduce conforme se intensifican los impactos del cambio climático, por recursos hídricos no convencionales, cuya disponibilidad se ha incrementado notablemente en el último lustro, y que continuará haciéndolo en el caso del AMD. Como consecuencia, las características fisicoquímicas del agua de riego están sufriendo cambios continuos en muchas zonas regables del sureste español.

El estudio y análisis del riego con AMD es una cuestión reciente, ya que se ha desarrollado principalmente durante la última década. En los trabajos más relevantes sobre esta cuestión [1,2,3,4] se identifica como principal ventaja la condición del AMD como recurso hídrico

inagotable y no sujeto a variaciones climáticas, por lo que estratégicamente resulta idónea para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos para riego agrícola en zonas deficitarias. Como principales inconvenientes se destacan el elevado consumo energético asociado a su producción y transporte hasta las zonas regables, así como el elevado precio resultante para los usuarios finales, los agricultores. Estos precios son muy superiores a los que presentan otras fuentes de agua de riego y pueden generar un importante impacto en los costes de producción de los cultivos, comprometiendo su viabilidad económica. El elevado consumo energético asociado a la producción de AMD también conlleva unas importantes emisiones de gases de efecto invernadero.

La progresiva sustitución de recursos hídricos convencionales (aguas subterráneas, aguas superficiales, agua del TTS) por recursos no convencionales (aguas regeneradas y AMD), puede generar distintos impactos agronómicos, ambientales y económicos, cuya valoración para los principales cultivos de la DHS se aborda en este trabajo. Para ello, se han identificado diversos indicadores de impacto para la caracterización agronómica, económica y ambiental de la producción agrícola, cuyos valores se han estimado bajo tres escenarios de suministro de agua de riego, que son representativos de la situación inicial y de posibles situaciones futuras en los regadíos en el sureste español.

2. Materiales y métodos

2.1. Aguas de referencia consideradas en el estudio

El origen del suministro hídrico es un factor especialmente relevante a la hora de definir distintos escenarios. En este sentido, se ha seguido la misma clasificación recogida en el Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2022-27 (PHDS 2022-27) [5], trabajándose con los valores característicos de sus propiedades fisicoquímicas, la energía específica asociada a su suministro y el coste final para el regante (Tabla 1).

Tabla 1. Principales características fisicoquímicas, consumo específico (C_P) y precio final para el agricultor (P) de las distintas fuentes de suministro de agua consideradas en el estudio.

Parámetro	Superficial	Subterránea	Regenerada	Desalada	Trasvase T-S
pH	7,5	7,4	7,7	8,3	8,4
CE (dS/m)	2,41	4,51	1,80	0,46	0,86
Ca^{2+} (mg/L)		229	97	29	97
Mg^{2+} (mg/L)	158	99	39	4,3	40
Na^{+} (mg/L)		573	235	86	41
K^{+} (mg/L)	98	16,6	28,3	3,9	2,2
NH_4^{-} (mg/L)		1,7	3,16	0,05	0,16
B^{3+} (mg/L)	257	1,36	0,40	0,56	0,1
Cl^{-} (mg/L)		972	272	147	59
SO_4^{2-} (mg/L)	18,8	980	205	6,6	233
CO_3H^{-} (mg/L)	7,2	475	295	71	180
NO_3^{-} (mg/L)		60,6	14,7	1	1,7
PO_4^{3-} (mg/L)	0,45	0,3	1,23	0,2	0,1
SAR		8,0	5,4	3,0	1,1
	344				
	514				

	318				
	10,6				
	2,65				
	4,0				
C_p (kWh/m³)	0,06	0,95	0,78	3,49	1,21
P (€/m³)	0,06	0,18	0,10	0,60	0,18

Datos elaborados a partir de distintas fuentes, según se recoge en [6]

2.2. Escenarios considerados

Se ha considerado un primer escenario de referencia sin suministro de AMD, mientras que los dos escenarios restantes representan la sustitución progresiva (50% y 100%) de otros recursos por AMD. Estos escenarios se describen a continuación.

- Escenario de riego sin AMD o de referencia (0%AMD). Se corresponde con un suministro de distintas fuentes de agua proporcional a los derechos de riego reconocidos en la PHDS 2022-27 [5]. Por tanto, consiste en una mezcla de agua superficial, subterránea, regenerada y del trasvase Tajo-Segura (T-S), según las proporciones recogidas en la Figura 1.
- Escenario de uso conjunto de AMD con otras fuentes (50%AMD). Se corresponde con un suministro del 50% de AMD, mientras el 50% restante procede de otras fuentes (superficiales, subterráneas, regeneradas y trasvase T-S) según su proporción en los derechos de riego reconocidos en el PHDS 2022-27 [5]. Por tanto, consiste en una mezcla de aguas según las proporciones recogidas en la Figura 1.
- Escenario de riego con AMD (100%AMD). Se sustituye el suministro de agua de riego de las distintas fuentes consideradas en el PHDS 2022-27 por AMD. Por tanto, el 100% del agua de riego es AMD (Fig. 1), e implica la supresión del suministro del trasvase T-S.

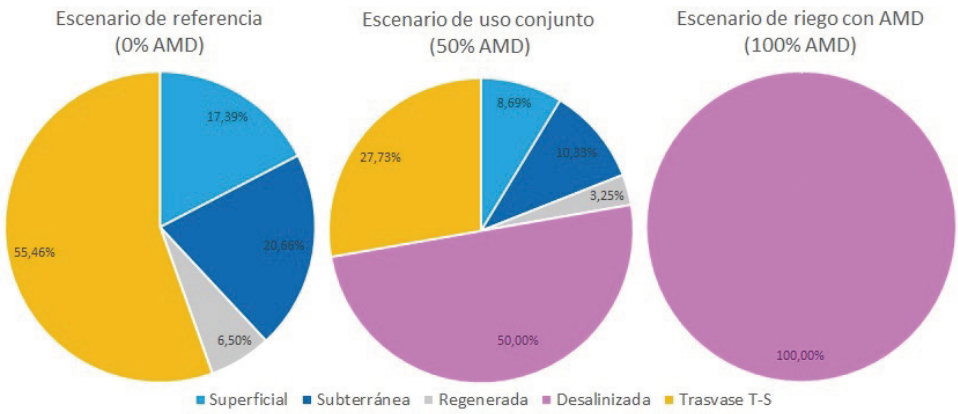


Figura 1. Porcentaje de las distintas fuentes de agua en los escenarios considerados.

2.3. Cultivos considerados

Se han seleccionado los 10 cultivos que más superficie ocupan en la Región de Murcia en 2020, como marco geográfico más próximo a la DHS, de la que no se dispone de información específica por cultivos. Los cultivos seleccionados se han organizados en cuatro grupos: hortícolas al aire libre (alcachofa, brócoli, lechuga y melón), cítricos (limonero, mandarino y naranjo), frutales no cítricos o de fruto carnoso (albaricoquero y melocotonero) y almendro.

2.4. Análisis agronómico

Como se observa en la Tabla 1, la composición del AMD es bastante diferente al resto fuentes de suministros en la DHS, circunstancia de la que se pueden derivar efectos en la respuesta agronómica tras la sustitución de aguas convencionales por AMD, especialmente porque estos impactos agronómicos pueden derivar en impactos económicos, como se evaluará posteriormente. Se han considerado los tres efectos agronómicos más relevantes:

- Efecto de la salinidad en la producción. La productividad de los cultivos se ve limitada por la salinidad del agua de riego, cuestión que ha sido ampliamente estudiada y tratada en las distintas versiones del Manual Técnico de la FAO Water Quality for Agriculture [7]. El rendimiento relativo de los cultivos se mantiene constante a medida que aumenta la salinidad del suelo hasta llegar a un determinado valor (umbral de CE_{es}), a partir de la cual el rendimiento relativo desciende. La conductividad eléctrica del agua de riego (CE_a) pasa de 1,95 dS/m en el escenario de referencia (0%AMD) hasta 0,46 dS/m en el escenario 100%AMD. El indicador seleccionado para analizar el impacto ha sido el valor económico de la producción (VEP, €/ha), calculado tras asignar los valores de producción publicados por el MAPA en los Estudios de Costes y Rentas de las Explotaciones Agrícolas (ECREA)[8] al escenario de referencia (0% AMD), y calculando el valor para el resto de los escenarios mediante la aplicación de las variaciones esperables en la productividad de los cultivos como consecuencia del efecto de la salinidad del agua de riego.
- Efecto de la salinidad en las necesidades totales de riego. Las necesidades totales de riego de los cultivos (N_t) son superiores a sus necesidades consuntivas o netas (N_n), ya que hay otras cantidades adicionales de agua que son necesarias para compensar las pérdidas producidas por las condiciones en que se desarrolla el cultivo [9]. Estas pérdidas se pueden producir por percolación en profundidad fuera de zona radicular, por la falta de uniformidad de reparto del agua en la parcela de riego y por los requerimientos de lavado de sales cuando se emplea agua de riego con media o alta salinidad. El indicador seleccionado para evaluar este efecto son las propias necesidades totales de riego (N_t, m^3/ha).
- Efectos de la escasez de nutrientes en las necesidades de fertilizantes. El AMD se caracteriza por una muy baja concentración de nutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos, como calcio y magnesio [2], que puede dar lugar a una mayor necesidad de fertilizantes, con el consecuente encarecimiento de los programas de fertilización. Para evaluar este efecto se han calculado los requerimientos de fertilizantes y el coste asociado para cada uno de los cultivos seleccionados, considerando las características fisicoquímicas del suministro de agua para cada uno de los escenarios. Esta evaluación se ha realizado mediante un modelo que calcula la combinación optima de fertilizantes para satisfacer los requerimientos totales de nutrientes de cada cultivo al menor coste económico, considerando los nutrientes que ya están presentes en el agua de riego para cada uno de los escenarios [4,10]. El indicador seleccionado para evaluar el efecto de la escasez de nutrientes en las necesidades de fertilizantes es el coste de los fertilizantes (CF, €/ha) obtenido del modelo.

2.5. Análisis Ambiental

Para realizar el análisis ambiental se ha utilizado la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con la que se ha cuantificado el impacto ambiental producido por los siguientes cultivos seleccionados en las condiciones propias de producción de la zona de estudio bajo los tres escenarios de suministro de agua considerados. Para la evaluación de las categorías de impacto se ha utilizado la metodología CML-IA [11] con el software SimaPro 9.2.0.2 [12]. Las emisiones relacionadas con procesos agrícolas, las infraestructuras y los fertilizantes son los principales contribuidores al cambio climático, pñor lo que en este trabajo solo se presentan los resultados del

indicador calentamiento global (GW, kg CO_2 eq), los procedimientos de cálculo y el resto de los resultados puede consultarse en [6].

2.6. Análisis Económico

Para realizar el análisis económico se ha partido de los datos de caracterización de los distintos sistemas productivos agrarios publicados en ECREA [8], que proceden de la información suministrada por las explotaciones. El indicador económico definido ha sido el indicador de efecto económico relativo (IEER, €/ha). Este indicador se ha obtenido a partir de la combinación de varias variables primarias (ingreso de la cosecha, costo de fertilización y costo del agua) y permite valorar la variación de los ingresos de la cosecha, el costo de la fertilización y agua de riego en los escenarios de uso conjunto (50%AMD) y de riego con AMD (100%AMD) respeto al escenario de referencia (0%AMD); de modo que para el escenario de referencia toma el valor "0", y para los otros dos escenarios se calcula como IEERi (€/ha) = [(Ingresos de la cosecha)i – (Ingresos de la cosecha)0] – [(costo fertilización)i-(costo fertilización)0]- [(costo agua)i-(costo agua)0]; indicando "0" el escenario de referencia y "i" el escenario analizado.

3. Resultados y discusión

3.1. Efecto de la salinidad en la producción

Considerando las producciones publicadas por el MAPA en los Estudios de Costes y Rentas de las Explotaciones Agrícolas (ECREA) [8], los valores de producción (kg/ha) y su valor económico (€/ha) para cada cultivo y escenario se recogen en la Tabla 2. Este valor económico de la producción (VEP, €/ha) es el indicador de impacto seleccionado para cuantificar el efecto de la salinidad del agua de riego en la producción, dado que refleja los efectos los escenarios expuestos anteriormente y facilita el cálculo posterior del indicador económico.

Tabla 2. Impacto de la salinidad del agua de riego en la producción (kg/ha) y el valor económico de la producción (VEP, €/ha) para cada cultivo y escenario considerado.

Cultivo	Referencia (0%AMD)	Uso Conjunto (50%AMD)	Riego con AMD (100%AMD)
Alcachofa	17.748 / **8.253**	17.748 / **8.253**	17.748 / **8.253**
Brócoli	13.700 / **5.127**	13.840 / **5.180**	13.840 / **5.180**
Lechuga		57.794 / **8.238**	61.812 / **8.811**
Melón	48.874 / **6.967**	50.313 / **9.970**	53.937 / **10.688**
Limonero		35.514 / **14.051**	36.932 / **14.612**
Mandarino	45.284 / **8.973**	17.844 / **6.460**	18.080 / **6.554**
Naranjo		46.602 / **8.885**	47.220 / **9.002**
Albaricoquero	30.267 / **11.975**	28.405 / **23.120**	29.838 / **24.286**
Melocotonero	15.214 / **5.515**	25.684 / **16.554**	26.235 / **16.909**
Almendro		4.098 / **5.992**	4.346 / **6.329**
	39.735 / **7.575**		
	20.457 / **16.650**		
	19.569 / **12.613**		
	3.182 / **4.634**		

3.2. Efecto de la salinidad en las necesidades totales de riego

La Tabla 3 presenta el valor de las necesidades netas de riego de los cultivos (N_n) para el escenario de referencia, donde los valores de N_t son los publicados por el MAPA en el ECREA [8]. La tabla también recoge los valores de N_t (m^3/ha) por cultivo y escenario, que constituyen el indicador seleccionado para evaluar el impacto de la salinidad en las necesidades de riego.

Tabla 3. Impacto de la salinidad del agua de riego en las necesidades netas (N_n, m^3/ha) y totales (N_t, m^3/ha) de riego, teniendo en cuenta los requerimientos de lavado, para cada cultivo y escenario considerado.

Cultivo	N_n (m^3/ha)	N_t Referencia (0%AMD)	N_t Uso Conjunto (50%AMD)	N_t Riego con AMD (100%AMD)
Alcachofa	9877,2	10570,0	10294,6	10033,2
Brócoli	6484,3		6774,6	6592,6
Lechuga	4395,1	6967,0	4709,0	4510,4
Melón	4161,6		4364,6	4237,2
Limonero	5311,5	4926,0	5677,8	5446,2
Mandarino	5806,8		6277,6	5978,7
Naranjo	4387,6	4500,0	4743,4	4517,5
Albaricoquero	4699,3		5241,5	4893,3
Melocotonero	4914,0	5930,0	5413,8	5094,3
Almendro	3263,1		3578,9	3377,3
		6608,0		
		4993,0		
		5643,0		
		5776,0		
		3806,0		

3.3. Efecto de la escasez de nutrientes en las necesidades de fertilizantes

La Tabla 4 recoge el coste de los fertilizantes (CF, €/ha) calculados para satisfacer las necesidades de los cultivos mediante la metodología descrita anteriormente, para cada uno de los cultivos y escenarios considerados, que es el indicador de impacto para evaluar los efectos de la escasez de nutrientes en las necesidades de fertilizantes.

Tabla 4. Coste de los fertilizantes (CF, €/ha) calculados para satisfacer las necesidades para cada uno de los cultivos y escenarios considerados.

Cultivo	Referencia (0% AMD)	Uso Conjunto (50% AMD)	Riego con AMD (100% AMD)
Alcachofa	1.411,9	1.531,7	1.834,6
Brócoli		1.462,7	1.695,2
Lechuga	1.383,7	1.533,6	1.657,0
Melón		1.375,0	1.729,7
Limonero	1.477,7	1.085,3	1.152,7
Mandarino		1.106,4	1.181,5
Naranjo	1.324,1	1.259,0	1.315,7
Albaricoquero		973,4	1.037,5
Melocotonero	1.018,1	1.328,5	1.394,0

Almendro	1.031,5	427,6	506,8
	1.202,4		
	909,5		
	1.263,0		
	384,5		

3.4. Efecto sobre el calentamiento global

La Tabla 5 muestra el valor del indicador de impacto ambiental calentamiento global por unidad de superficie (kg $CO_{2\ eq}$ /ha) para cada cultivo y escenario considerado. Los resultados evidencian que, cuando se analizan los impactos por unidad de superficie, la incorporación de AMD supone un incremento en el indicador GW proporcional al porcentaje de AMD en el agua de riego. El GW por unidad de superficie (kg $CO_{2\ eq}$ /ha) aumenta al pasar del escenario de referencia (0%AMD) al escenario de uso conjunto (50%AMD) un 41%; mientas que cuando se pasa del escenario de referencia (0%AMD) al escenario de riego con AMD (100%AMD) este aumento prácticamente se duplica, alcanzando el 78%.

Tabla 5. Valor del indicador calentamiento global (GW, kg $CO_{2\ eq}$ /ha) para cada cultivo y escenario considerado.

Cultivo	Unidades	Referencia (0%AMD)	Uso conjunto (50%AMD)	Riego con AMD (100%AMD)
Alcachofa	kg $CO_{2\ eq}$/ha	11355	16877	22119
Brócoli	kg $CO_{2\ eq}$/ha	7134	10602	13882
Lechuga	kg $CO_{2\ eq}$/ha	6609	8989	11085
Melón	kg $CO_{2\ eq}$/ha	6054	8145	10103
Limonero	kg $CO_{2\ eq}$/ha	8830	12146	15149
Mandarino	kg $CO_{2\ eq}$/ha	9612	13396	16792
Naranjo	kg $CO_{2\ eq}$/ha	8675	11460	13909
Albaricoquero	kg $CO_{2\ eq}$/ha	7158	10086	12557
Melocotonero	kg $CO_{2\ eq}$/ha	7688	10681	13263
Almendro	kg $CO_{2\ eq}$/ha	4271	5963	7459

3.5. Efectos sobre el indicador de efecto económico relativo

La Figura 2 muestra el valor del indicador de efecto económico relativo (IEER, €/ha) para cada cultivo y escenario considerados.

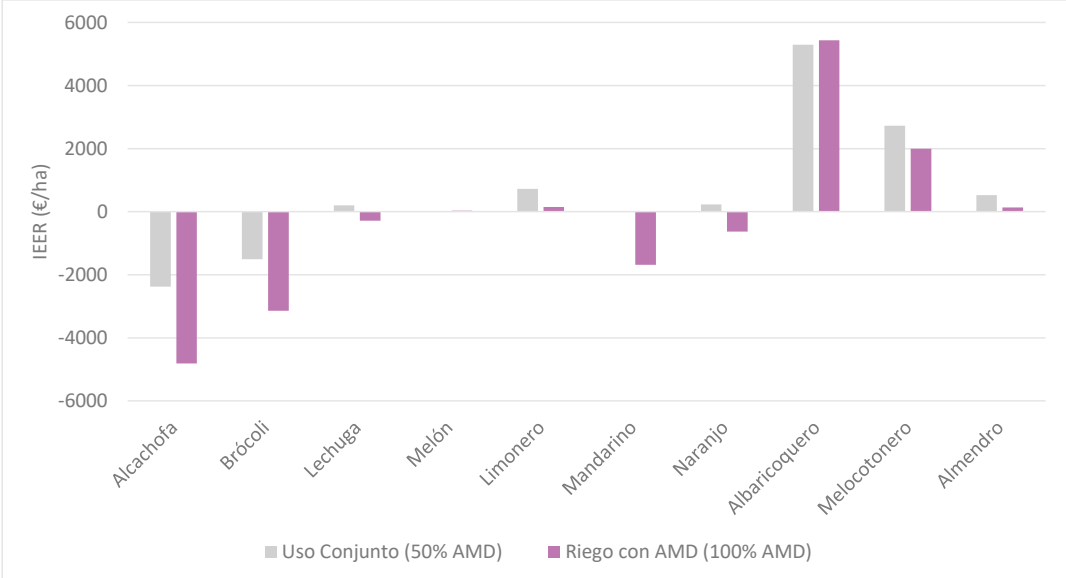


Figura 2. Indicador de efecto económico relativo (IEER, €/ha) para cada cultivo y escenario.

4. Conclusiones

Los resultados reflejan una variabilidad importante en la magnitud de los impactos para los cultivos considerados, aunque la variación de los indicadores entre escenarios con suministro creciente de AMD sigue las mismas tendencias para todos los grupos de cultivo, excepto en el caso de los indicadores de tipo económico (IEER), donde se observan comportamientos diferentes por grupos de cultivo.

El impacto agronómico es favorable, y más relevante cuanto mayor es la sensibilidad del cultivo a la salinidad del agua de riego. La progresiva sustitución de los recursos hídricos disponibles por AMD conlleva mejoras en la productividad de los cultivos y reducciones en las necesidades de riego, cuya valorización económica supera holgadamente a los sobrecostes en la fertilización por la baja mineralización del AMD. La mejora en la productividad de los cultivos se reduce notablemente conforme disminuye la salinidad del agua, por lo que el sentido favorable del impacto agronómico presenta cierta saturación cuando se supera el 50% de AMD.

El impacto ambiental es desfavorable e importante. La progresiva sustitución de los recursos hídricos disponibles por AMD implica un incremento creciente de la carga ambiental asociada a la producción agrícola, lo que cuestiona la sostenibilidad de la agricultura de regadío en la zona de estudio bajo escenarios con un elevado porcentaje de suministro de AMD.

El impacto económico ofrece resultados heterogéneos entre los grupos de cultivos, ya que integra la valoración económica de los efectos agronómicos junto al efecto de la incorporación de AMD en el coste del agua. Sin embargo, en todos los casos resulta más beneficioso para el agricultor el escenario de uso conjunto (50% AMD) que el de riego con AMD (100% AMD).

Se puede afirmar que el escenario de uso conjunto (50%AMD) resulta más interesante que el de riego con AMD (100%AMD) desde las distintas perspectivas consideradas en este estudio.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia y el programa europeo NextGenerationEU. El trabajo también ha sido financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, proyecto SEA4CROP (PID2020-118492RA-C22). Finalmente, se agradece el apoyo de la Cátedra Trasvase y Sostenibilidad – José Manuel Claver Valderas de la universidad Politécnica de Cartagena.

Referencias

84. Yermiyahu, U., Tal, A., Ben-Gal, A., Bar-Tal, A., Tarchitzky, J., Lahav, O. 2007. Rethinking desalinated water quality and agriculture, Science 318, 920–921.
85. Martínez-Álvarez, V., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M. 2016. Seawater desalination for crop irrigation — A review of current experiences and revealed key issues. Desalination 381, 58–70.
86. Arahuetes, A., Hernández, M., Rico, A.M., 2018. Adaptation strategies of the hydrosocial cycles in the Mediterranean Region. Water 10 (790). https://doi.org/10.3390/w10060790.
87. Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B., Maestre-Valero, J.F., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M. 2020. Assessing concerns about fertigation costs with desalinated seawater in south-eastern Spain. Agric. Water Manag. 239, 106257.
88. CHS, 2022. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura (tercer ciclo: 2022-2027). Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). https://www.chsegura.es/es/cuenca/planificacion/planificacion-2022-2027/plan-hidrologico-2022-2027/
89. Martínez-Alvarez, V., Martin-Gorriz, B. 2021. Análisis agronómico, económico y ambiental de distintos escenarios de sustitución de aguas del trasvase Tajo-Segura por agua marina desalinizada. Universidad Politécnica de Cartagena.
90. Ayers, R.S., Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture. Estudio de Riego y Drenaje No. 29. Organización de las Naciones Unidades para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 174 p.
91. ECREA, 2016. Estudios de Costes y Rentas de las Explotaciones Agrarias. Resultados técnico-económicos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/ECREA_Informes-Agricolas.aspx
92. Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, Estudio de Riego y Drenaje No. 24. Organización de las Naciones Unidades para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 179 p.
93. Gallego-Elvira, B. Reca, J., Martin-Gorriz, B., Maestre-Valero, J.F. Martínez-Alvarez, V. 2021. Irriblend-DSW: A decision support tool for the optimal blending of desalinated and conventional irrigation waters in dry regions. Agric. Water Manag. 255, 107012.
94. Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 692 p.
95. PRe Consultants, 2021 [www.pre-sustainability.com].



Sistema de tratamiento de purín de cerdo mediante humedad artificial de flujo horizontal en serie

S. Martínez-Martínez[1*], A. García-Valero[1], A. Faz[1], M.D. Gómez-López[1], M.A. Terrero[1], O. El Bied[1], J.A. Acosta[1]

[1] Universidad Politécnica de Cartagena. Área de Ingeniería Agroforestal (Departamento de Ingeniería Agronómica). Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia). E-Mail: Silvia.martinez@upct.es

Abstract:
The intensification of pig production is considered a risky activity for the environment when the generated pig slurry is not adequately treated. In addition, intensive agriculture practices where pig slurry is applied to the cropland could cause nitrate leaching, salinization, and soil pollution, thus the development of an eco-friendly system for pig slurry treatment is essential to avoid undesirable environmental impacts. The main objective of this study was to assess the efficiency of a purification system for treating pig slurry. The system included a pretreatment module (raw pig slurry tank, phase separator, and settlement tank), and three constructed wetlands serial connected that included planted cell with *Phragmites australis* and *Suaeda Vera*. Pig slurry samples after each treatment module were collected in triplicate and physic-chemical analyses were performed. Results showed that the phase separator decreased suspended solid, turbidity and the chemical oxygen demand in the treated pig slurry. The system allowed considerable reductions in nitrogen, where the highest removal was reported in the wetlands. However, the cations and anions showed different efficiencies, in some cases the final concentrations were higher than the initial ones, which could be explained by their release from the substrate. Cu, Zn and Fe decreased mainly as they passed through the wetland. Therefore, the integral slurry treatment system with constructed wetland increases the quality of the treated pig slurry and, can be used for its sustainable agronomic valorization and in turn allow saving of inorganic fertilizers and irrigation water.

Palabras clave: aguas residuales agropecuarias, depuración, contaminación, nitratos

1. Introducción

A nivel mundial, los 28 países miembros de la UE son el segundo mayor productor mundial de carne porcina, después de China. España es el cuarto productor (después de China, EE.UU. y Alemania), mientras que, a nivel europeo, España ocupa el segundo lugar en producción con el 19 % de las toneladas producidas [1]. La producción de purines de cerdo de la EU-28 asciende a 171,2 Mt año^{-1}. Alemania, España y Francia son los mayores productores de purines de cerdo y representan más del 19 %, 18 % y 9 %, respectivamente [2].

Las granjas porcinas intensivas a gran escala generan una elevada cantidad de purines difícil de gestionar. En consecuencia, el tratamiento de purín de cerdo de estas granjas ha sido un problema que debe de ser abordado debido a los altos niveles de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el purín y la disponibilidad limitada de tierras de cultivo cercanas [3]. Como consecuencia, existe un excedente de estiércol en las áreas agrícolas que ha llevado a la degradación de la calidad de los recursos hídricos.

El uso del purín de cerdo como biofertilizante es interesante tanto desde el punto de vista ecológico como económico por su rica composición en nitrógeno, fósforo y potasio, entre otros

nutrientes. Sin embargo, la intensificación de la producción porcina se considera una actividad de riesgo para el medio ambiente cuando los purines generados no son tratados adecuadamente [4]. La cría de cerdos se ha centrado cada vez más en temas sostenibles y ha mostrado avances significativos en la gestión ambiental a través del desarrollo tecnológico y una mayor concienciación, especialmente en lo que respecta a la gestión de residuos [5]. Esta situación ha propiciado el desarrollo de nuevas tecnologías para tratar este purín de cerdo con el fin tanto de estabilizar la materia orgánica como de concentrar y/o eliminar nutrientes [6]. La selección de la tecnología más apropiada en cada caso específico depende de la escala del tratamiento, el tamaño de la explotación, la necesidad de eliminación de materia orgánica y nutrientes, la disponibilidad de tierras de cultivo, la generación de energía en la instalación y los costes de mantenimiento de la planta de tratamiento, entre otros.

La tecnología de humedales artificiales (HA) es considerada un tratamiento secundario o incluso terciario [7] que se utiliza en todo el mundo para el tratamiento de aguas residuales de diferentes fuentes, como las domésticas, agrícolas, industriales, mineras y acuíferas, siendo capaz de reducir los contaminantes de las aguas residuales y purificarlas [8]. La estructura de los HA está diseñada para simular los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales, siendo capaces de tratar las aguas residuales de manera eficiente [9]. Las plantas y el sustrato son los elementos que más influyen en la eficiencia del sistema [10]. Los sustratos utilizados para construir humedales incluyen tierra, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el compost. Se ha de destacar que la selección de las especies vegetales es un factor clave, ya que la vegetación tiene que sobrevivir a los posibles efectos tóxicos de las aguas residuales y su variabilidad química y, por supuesto, debe adaptarse a las condiciones climáticas locales. El objetivo de este estudio fue analizar el potencial de la tecnología basada en humedales artificiales que trabajan en serie para el manejo del residuo líquido procedente del purín bruto con el fin de la reducción de la carga contaminante para su valorización agronómica.

2. Materiales y métodos

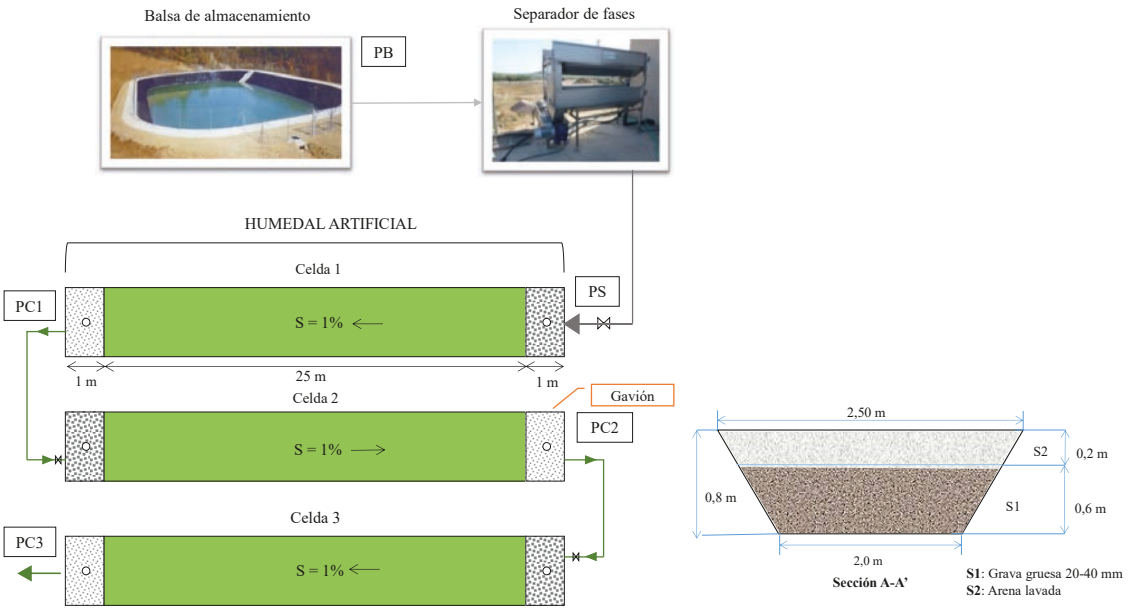
2.1. Zona de estudio

La zona de estudio para el tratamiento del purín se ubicó en una explotación porcina intensiva en el municipio de Torres de Cotillas (Región de Murcia, SE España) bajo el clima mediterráneo. La temperatura y la precipitación media durante el periodo del experimento fueron 18,5 °C y 368,7 mm, respectivamente. La evapotranspiración media fue de 1315 mm. La granja de donde procedía el purín contaba con 300 cabezas de madres con lechones de la raza Duroc-Jersey con un peso medio de 300 kg. El experimento se realizó de enero a marzo.

2.2. Sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento se llevó a cabo en un sistema piloto compuesto por una unidad de pretratamiento y una unidad de depuración formada por un humedal artificial. La unidad de pretratamiento estaba provista de un separador de fases que consistía en un dispositivo mecánico equipado con un sistema de bioaireación y un espesador de fangos. Con este equipo fue posible separar las fracciones sólida y líquida y consecuentemente tratar la fracción líquida en el humedal artificial. La unidad de depuración estaba constituida por un humedal artificial diseñado y construido por 3 celdas de flujo subterráneo horizontal, rellenas con una capa de grava y una capa superficial de arena. Cada celda del humedal tenía 27 m de largo y 2,5 m de ancho, con una profundidad de 80 cm (60 cm de grava gruesa y 20 cm de arena lavada) (Figura 1). El gavión para desbaste estaba colocado en el primer metro y en el último de los 27 m de longitud, en el extremo del inicio y final de la zanja, y estaba relleno de grava de 4 y 8 mm de diámetro. Además, se utilizó el sistema de policultivo, utilizando las especies vegetales *Phragmites australis y Suaeda Vera* en las

mismas proporciones en cada celda y con una densidad de siembra de 10 plantas m^{-2}. El sistema trabajó en serie, es decir, el purín pasó por la celda 1, posteriormente por la celda 2 y finalmente por la celda 3, las cuales constituían el humedal artificial, permaneciendo en cada una de ellas un total de 7 días. A lo largo del proceso de tratamiento de purines con este sistema, se pudieron tratar aproximadamente 12 m^3 en cada ciclo, por lo que se depuraron 36 m^3 durante la ejecución de esta acción. Durante los ensayos se realizaron tres ciclos de tratamiento con un tiempo de retención hidráulica total en el humedal de 21 días. Los puntos de muestreo se muestran en la Figura 1.



PB: punto de muestreo en la balsa de almacenamiento de purín bruto; PS: punto de muestreo después del separador de fases; PC1: punto de muestro en la salida de la celda 1; PC2: punto de muestreo a la salida de la celda 2; PC3: punto de muestreo a la salida del celda 3; S: inclinación

Figura 2. Sistema de tratamiento de purines, dimensiones de las celdas que constituyen el humedal

El número de muestras recolectadas fue 45, teniendo en cuenta los 5 puntos de muestreo seleccionados, las 3 réplicas tomadas por punto y los 3 ciclos de tratamiento. En este ensayo se analizaron parámetros analíticos físicos y químicos como temperatura (T), pH, CE, DQO, sólidos sedimentables (SS), sólidos totales en suspensión (STS), nitrógeno Kjeldahl (NK), nitrógeno amoniacal ($N\text{-}NH_4^+$), fósforo total (PT), cationes, (Na^+, K^+, Mg^{+2} y Ca^{+2}), aniones (Cl^-, SO_4^{-2}, NO_3^-, NO_2^-, PO_4^{-3}) y metales solubles (Cu, Fe, Mn y Zn).

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del purín durante el ensayo

La Tabla 1 muestra la caracterización del purín en cada etapa del sistema de tratamiento. Como se puede observar, tras el separador de fases, la temperatura no mostró diferencias significativas con respecto al purín bruto, con un valor de 12,9 ± 1,6 ºC en la balsa de almacenamiento. En el humedal se observó una temperatura superior a las etapas anteriores (PB y PS), las cuales se acercan más a la temperatura ambiental.

En cuanto al pH, tuvo un ligero aumento no significativo después del separador de fases. Los valores medios de pH fueron levemente alcalinos, mostrando valores casi idénticos, alrededor de 8 en la salida del humedal. Generalmente, la CE tiende a ser alta en el purín de cerdo debido a la dieta basada en sales y alta proteína para satisfacer las necesidades de los cerdos [11]. Para el caso de la CE en el PS, hubo una disminución significativa respecto al purín bruto. Algunos estudios han indicado que la separación física de la fracción sólida y líquida del purín

de cerdo podría reducir la CE debido a la precipitación química de sales en la fase sólida [12]. Además, la conductividad eléctrica mostró un comportamiento favorable en el tratamiento del humedal, disminuyendo sucesivamente en el PC1, PC2 y PC3.

Tabla 1. Caracterización del purín en cada etapa del sistema de tratamiento

Parámetro	PB			PS			PC1			PC2			PC3		
T (ºC)	12,9 ± 1,6	a		13,5 ± 2,5	a		14,3 ± 2,7	a		14,7 ± 1,5	a		17,6 ± 2,9	a	
pH	7,8 ± 0,1	a		8,2 ± 0,2	a		8,1 ± 0,4	a		8,1 ± 0,3	a		7,9 ± 0,2	a	
CE (dS m^{-1})	13,5 ± 0,4	b		9,1 ± 1,7	ab		10,8 ± 1,3	ab		9,6 ± 2,6	ab		7,6 ± 1,3	a	
SS (g L^{-1})	158 ± 25,0			0,0 ± 0,0			0,0 ± 0,0			0,0 ± 0,0			0,0 ± 0,0		
STS (g L^{-1})	13,2 ± 2,4	a		10,1 ± 1,3	a		8,7 ± 2,0	a		9,0 ± 0,5	a		10,6 ± 2,9	a	
Turbidez (NTU)	213 ± 39,7	b		52,3 ± 8,6	b		86,6 ± 29,8	b		69,1 ± 16,3	b		76,7 ± 13,0	ab	
DQO (g L^{-1})	4,3 ± 1,8	b		0,8 ± 0,6	a		0,9 ± 0,5	a		1,0 ± 0,4	a		0,8 ± 0,3	a	
NK (g L^{-1})	1,5 ± 0,1	b		0,7 ± 0,1	a		0,9 ± 0,3	a		0,8 ± 0,2	a		0,2 ± 0,1	a	
NH_4^+ (g L^{-1})	1,2 ± 0,1	a		0,5 ± 0,1	b		0,7 ± 0,2	ab		0,7 ± 0,2	ab		0,1 ± 0,0	a	
NO (g L^{-1})	0,4 ± 0,2	b		0,2 ± 0,0	a		0,2 ± 0,0	a		0,2 ± 0,1	a		0,1 ± 0,1	a	
NT (g L^{-1})	1,6 ± 0,1	b		0,9 ± 0,2	a		1,1 ± 0,4	ab		1,0 ± 0,2	a		0,6 ± 0,0	a	
Cl^- (mg L^{-1})	762 ± 55,3	a		915 ± 213	a		733 ± 102	a		769 ± 16,0	a		1511 ± 801	a	
NO_2^- (mg L^{-1})	0,1 ± 0,0	a		229 ± 146	a		206 ± 22,7	a		22,6 ± 6,3	a		5,3 ± 2,5	a	
NO_3^- (mg L^{-1})	33,2 ± 5,4	a		42,4 ± 16,9	a		23,7 ± 7,8	a		22,6 ± 6,3	a		444 ± 125	b	
PO_4^{3-} (mg L^{-1})	147 ± 39,7	b		50,8 ± 13,4	ab		41,9 ± 15,6	ab		37,6 ± 16,2	a		135 ± 40,3	ab	
SO_4^{2-} (mg L^{-1})	152 ± 51,4	a		1515 ± 591	ab		838 ± 161	ab		544 ± 53,1	ab		1514 ± 496	b	
Na^+ (mg L^{-1})	425 ± 2,4	a		604 ± 172	a		462 ± 65	a		484 ± 17,6	a		1107 ± 366	a	
K^+ (mg L^{-1})	787 ± 0,9	b		376 ± 184	ab		513 ± 235	ab		492 ± 210	ab		312 ± 82,3	a	
Ca^{+2} (mg L^{-1})	322 ± 131	a		298 ± 169	a		171 ± 70,6	a		207 ± 67,2	a		416 ± 137	a	
Mg^{+2} (mg L^{-1})	97,6 ± 9,3	a		219 ± 95,5	a		150 ± 25,1	a		148 ± 6,4	a		252 ± 114	a	
Cu (mg L^{-1})	0,0 ± 0,0	a		0,0 ± 0,0	a		0,1 ± 0,1	a		0,0 ± 0,0	a		0,0 ± 0,0	a	
Zn (mg L^{-1})	0,1 ± 0,1	a		0,1 ± 0,1	a		0,2 ± 0,1	a		0,1 ± 0,0	a		0,1 ± 0,0	a	
Fe (mg L^{-1})	0,8 ± 0,2	a		1,0 ± 1,3	a		1,1 ± 0,5	a		1,0 ± 0,4	a		0,4 ± 0,3	a	
Mn (mg L^{-1})	0,0 ± 0,0	a		0,1 ± 0,1	a		0,0 ± 0,0	a		0,0 ± 0,0	a		0,1 ± 0,1	a	

PB: purín bruto; PS: purín tras separador de fases; PC1: purín tras celda 1 del humedal; PC2; purín tras celda 2 del humedal; PC3: purín tras celda 3 del humedal; T: temperatura; CE: conductividad eléctrica; SS: sólidos sedimentables; STS: sólidos totales en suspensión; DQO: Demanda Química de Oxígeno; NK: nitrógeno Kjeldahl; NH4+: nitrógeno amoniacal; NO: nitrógeno orgánico; NT: nitrógeno total; F-:fluoruro; Cl-: cloruro; NO2-; nitritos; Br-: bromuro; PO43-: fosfato; SO42-: sulfato; Na+: sodio; K+: potasio; Ca2+: calcio; Mg2+: magnesio; Cu: cobre; Zn: zinc; Fe: hierro; Mn: manganeso.

Los STS no mostraron diferencias significativas entre PB y PS. Los valores medios de STS en el PC1, PC2 y PC3 fueron menores en comparación con los resultados obtenidos de PB en el sistema. En este estudio, los SS fueron totalmente eliminados después del separador de fases. El principal proceso involucrado en esta remoción podría explicarse por la separación y precipitación de partículas durante el tratamiento [13].

La DQO mostró diferencias estadísticamente significativas entre PB y PS. Sin embargo, no se mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las celdas del humedal, destacando la influencia de la vegetación en la remoción de compuestos orgánicos [4].

Para el nitrógeno, en todas sus formas, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el purín tras el separador de fases y tras el humedal artificial. Los principales mecanismos mencionados en la literatura para la eliminación del nitrógeno son la nitrificación, la desnitrificación, la adsorción y la absorción [7]. Por el contrario, los metales (Cu, Zn, Fe y Mn) no mostraron diferencias estadísticamente significativas en las distintas etapas del tratamiento.

3.2. Eficiencia del sistema de tratamiento

La eficiencia se calculó en tres puntos distintos del sistema de tratamiento: en el separador de fases, en el humedal y combinando los dos anteriores, lo que permitió determinar la eficiencia total del sistema de tratamiento. Es importante considerar que el signo negativo significa que el parámetro aumentó con respecto al valor inicial, es decir, con respecto al purín bruto para el caso

del separador de fases y la eficiencia total y, con respecto al purín después el separador de fases para el caso de la eficiencia del humedal. La Tabla 2 muestra las eficiencias de cada uno de los parámetros analizados a medida que pasan por el sistema.

Tabla 2. Eficiencias de depuración del sistema de tratamiento

	Eficiencia del separador de fases	Eficiencia del humedal artificial	Eficiencia total
pH	-4	4	0
CE	33	16	43
SS	100	-20	100
STS	23	-4	20
Turbidez	91	-113	81
DQO	82	-3	82
NK	55	71	87
NH_4^+	56	75	89
NO	51	59	80
NT	43	27	58
F^-	31	-34	8
Cl^-	-20	-65	-98
NO_2^-	-231712	97	-7518
Br^-	14	-3	11
NO_3^-	-38	-873	-1239
PO_4^{3-}	65	-100	31
SO_4^{2-}	-770	-14	-894
Na^+	-42	-61	-129
K^+	52	17	60
Ca^{2+}	7	-40	-29
Mg^{2+}	-125	-15	-159
Cu	-51	51	27
Zn	5	25	29
Fe	-13	57	52
Mn	-158	-52	-292

T: temperatura; CE: conductividad eléctrica; SS: sólidos sedimentables; STS: sólidos totales en suspensión; DQO: Demanda Química de Oxígeno; NK: nitrógeno Kjeldahl; NH4+: nitrógeno amoniacal; NO: nitrógeno orgánico; NT: nitrógeno total; F-:fluoruro; Cl-: cloruro; NO2-; nitritos; Br-: bromuro; PO43-: fosfato; SO42-: sulfato; Na+: sodio; K+: potasio; Ca2+: calcio; Mg2+: magnesio; Cu: cobre; Zn: zinc; Fe: hierro; Mn: manganeso.

El pH no varió en todo el sistema, por lo que su eficiencia total fue cero. En el caso de la CE, el separador redujo su valor hasta 9,1±1,7 dS m^{-1}, por lo que se obtuvo una eficiencia positiva, además, el humedal también permitió reducir la CE, aunque más levemente, hasta 7,6±1,3 dS m^{-1}. En otros estudios en los que se ha tratado el purín en un humedal artificial se han obtenido eficiencias inferiores, entorno al 7,8 y 5,6 % para TRH de 7 y 3 días, respectivamente [4, 7]. En este estudio, la eficiencia del separador permitió reducir la CE, posiblemente debido a la precipitación de sales en la fracción sólida resultante del purín bruto, lo que permitiría reducir la concentración de sales y, por tanto, la CE de la fracción sólida. La eficiencia total para los SS, los STS y la turbidez fue alta, especialmente para los SS y la turbidez cuya eficiencia fue del 100 y 81 %, respectivamente. Sin embargo, el humedal hizo que aumentaran los valores para estos parámetros, teniendo eficiencias negativas. Los resultados mostraron que los STS se redujeron en un 23 % con la separación mecánica, indicando en estudios previos que un pretratamiento mecánico anterior al uso del HA evita la obstrucción de este y alarga la vida útil del sistema [14]. La DQO tuvo una eficiencia total del 82 % que se obtuvo a su paso por el separador de fases.

El nitrógeno en sus tres formas diferentes (NK, NH_4 y NO) tuvo una eficiencia total entre 80-90 %, siendo el humedal el que proporcionó la eficiencia más alta del sistema. Zhang *et al*. [15] registraron entre el 40-50 % la eliminación de NK. El comportamiento de los aniones fue muy heterogéneo, obteniendo valores extremadamente altos en algunos casos, especialmente en el

caso de NO_2^-, NO_3^- y SO_4^{2-}. Los cationes aumentaron a medida que pasaron por el sistema, mostrando eficiencias totales negativas, a excepción del K+ que tuvo una eficiencia total del 60 %.

Finalmente, los metales Cu, Zn y Fe tuvieron una eficiencia positiva, aportada mayoritariamente a su paso por el humedal. Investigaciones similares indicaron que más del 50 % de los metales pesados pueden ser adsorbidos en las partículas del humedal y podrían ser removidos por sedimentación [7], encontrando eficiencias inferiores al 5 % para el Cu [16] o del 8 y 27 % para el Zn y el Mn, respectivamente [4].

3.3. Relación de los parámetros en el sistema de tratamiento

La Tabla 3 presenta la matriz de correlación entre los diferentes parámetros determinados en el sistema de tratamiento. Como se puede observar los Sólidos Sedimentables (SSed) tuvieron una alta correlación con la CE, al igual que los STS y la turbidez. Esto podría ser debido a la precipitación de sales que permitirían la disminución de SSed y STS y a la vez, la disminución de la turbidez, lo que permitiría reducir la CE [17]. De igual modo, se observa una alta correlación entre los SSed, los STS y la turbidez al paso del purín por el sistema de tratamiento, que se reducen (como se observa en la Tabla 3), lo que estaría justificado por el proceso de filtración que ocurre tanto en el separador de fases principalmente, como en el humedal artificial [18]. La DQO también se correlaciona positivamente con los parámetros anteriores, esto se debe al efecto tanto del separador de fases como del sustrato del humedal, donde el separador de fases permite la separación de la fase sólida del purín, reduciendo de esta forma gran parte de la materia orgánica presente en la fracción líquida del mismo [7], al igual que el HA podría interceptar contaminantes orgánicos insolubles mediante retención mecánica en el relleno tal como filtración, precipitación y adsorción, y absorber los contaminantes orgánicos disueltos directamente a través de las paredes celulares o membranas de las bacterias y plantas [17].

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson de los parámetros en el sistema de tratamiento

	T	pH	CE	SSed	STS	Turb	DQO	NK	NH_4^+	NO	N_{total}	F^-	Cl^-	NO_2^-	Br^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cu	Zn	Fe
T	1																								
pH	-0,72	1																							
CE	-0,33	-0,14	1																						
SSed	-0,08	-0,37	0,96	1																					
STS	0,18	-0,41	0,77	0,89	1																				
Turbidez	0,12	-0,56	0,85	0,96	0,94	1																			
DQO	-0,10	-0,38	0,96	0,99	0,87	0,95	1																		
NK	-0,35	-0,20	0,98	0,93	0,68	0,81	0,94	1																	
NH_4	-0,44	-0,12	0,97	0,89	0,62	0,76	0,91	0,99	1																
NO	-0,08	-0,42	0,95	0,97	0,80	0,91	0,98	0,96	0,92	1															
N total	-0,14	-0,31	0,97	0,96	0,77	0,86	0,97	0,96	0,94	0,98	1														
F^-	0,89	-0,32	-0,57	-0,37	0,01	-0,18	-0,39	-0,65	-0,72	-0,42	-0,45	1													
Cl^-	0,90	-0,45	-0,53	-0,29	0,10	-0,06	-0,32	-0,59	-0,67	-0,36	-0,41	0,97	1												
NO_2^-	-0,58	0,90	-0,28	-0,52	-0,65	-0,73	-0,51	-0,28	-0,20	-0,48	-0,36	-0,26	-0,44	1											
Br^-	0,25	-0,27	0,71	0,80	0,92	0,80	0,78	0,59	0,54	0,72	0,74	0,14	0,16	-0,43	1										
NO_3^-	0,96	-0,55	-0,49	-0,24	0,10	-0,02	-0,27	-0,54	-0,62	-0,28	-0,34	0,96	0,98	-0,48	0,16	1									
PO_4^{3-}	0,48	-0,54	0,59	0,76	0,94	0,85	0,74	0,49	0,42	0,68	0,65	0,30	0,36	-0,70	0,94	0,38	1								
SO_4^{2-}	0,43	0,19	-0,88	-0,79	0,44	-0,65	-0,81	-0,95	-0,96	-0,87	-0,88	0,77	0,73	0,16	-0,35	0,64	-0,25	1							
Na^+	0,86	-0,36	-0,60	-0,38	0,01	-0,16	-0,41	-0,67	-0,74	-0,45	-0,50	0,98	0,99	-0,35	0,08	0,96	0,28	0,80	1						
K^+	-0,31	-0,19	0,98	0,92	0,66	0,79	0,93	0,99	0,98	0,96	0,98	-0,61	-0,58	-0,24	0,62	-0,52	0,50	-0,95	-0,66	1					
Ca^{2+}	0,76	-0,43	-0,21	0,03	0,45	0,26	-0,01	-0,32	-0,40	-0,09	-0,16	0,83	0,90	-0,59	0,45	0,85	0,63	0,55	0,88	-0,33	1				
Mg^{2+}	0,54	0,09	-0,79	-0,66	-0,26	-0,50	-0,69	-0,88	-0,90	-0,76	-0,77	0,85	0,82	0,04	-0,16	0,74	-0,06	0,98	0,88	-0,87	0,69	1			
Cu	-0,46	0,62	-0,02	-0,26	-0,51	-0,50	-0,24	0,01	0,06	-0,14	-0,02	-0,34	-0,53	0,87	-0,25	-0,50	-0,52	-0,16	-0,49	0,08	-0,73	-0,26	1		
Zn	-0,65	0,71	0,19	-0,07	-0,34	-0,34	-0,05	0,20	0,26	0,01	0,14	-0,52	-0,69	0,85	-0,13	-0,68	-0,44	-0,32	-0,65	0,26	-0,77	-0,40	0,95	1	
Fe	-0,90	0,72	0,16	-0,12	-0,45	-0,36	-0,09	0,21	0,30	-0,04	0,04	-0,79	-0,89	0,78	-0,41	-0,90	-0,66	-0,38	-0,84	0,22	-0,93	-0,52	0,77	0,86	1
Mn	0,72	-0,13	-0,63	-0,44	-0,01	-0,25	-0,48	-0,73	-0,78	-0,55	-0,57	0,95	0,94	-0,19	0,07	0,88	0,22	0,88	0,97	-0,72	0,86	0,95	-0,41	-0,55	-0,74

En cuanto al nitrógeno, sigue la misma tendencia que los parámetros anteriores, y en todas sus formas se observa una alta correlación positiva. El NK, en la mayor parte de las aguas residuales agropecuarias, se encuentra en forma inorgánica, principalmente como amonio y, por lo tanto, podría ser adsorbido por los coloides de materia orgánica en suspensión [19]. A la vez,

la reducción del NT podría deberse al proceso de nitrificación-desnitrificación que ocurre en el HA [4].

En cuanto a los aniones y cationes presentan una correlación muy heterogénea, siendo en muchos casos positiva debido a la acción de absorción y adsorción de los componentes del humedal, y en otros negativa debido a la liberación de los mismos por parte del sustrato que compone el humedal [20].

Los resultados del análisis PCA indican que las variables evaluadas se agruparon en 4 componentes, representando el 87,3% de la variabilidad de los resultados obtenidos (Tabla 4). En la primera componente (PC1) se agruparon la CE, SS, STS, DQO, turbidez, NK, NO, NT, amonio, sulfatos, fosfatos y potasio, lo que muestra que una reducción en la concentración de sólidos tras el paso del purín por el sistema de tratamiento provocaría una reducción significativa tanto de la turbidez y DQO como de la salinidad y aniones asociados a esta, así como de la concentración de las distintas formas de nitrógeno a excepción de nitratos y nitritos. Por su parte, en la PC2 se agruparon la temperatura, cromo, sodio, magnesio y manganeso, indicando que las variaciones que sufren estos elementos durante el tratamiento de los purines tienen un origen común, ya sea procesos de adsorción, absorción o precipitación. Por su parte, en la PC3 se agruparon el pH, cobre, zinc, hierro y calcio, lo que indica que el pH del agua tratada es el factor principal que controla las concentraciones de estos elementos en la misma. Finalmente, se agruparon en el PC4 los nitratos y nitritos, cuyas concentraciones no se ven afectadas de forma relevante por ningún otro parámetro analizado, donde un aumento de uno de ellos provocaría una reducción en el otro, posiblemente la acción bacteriana en los humedales podría transformar por oxidación el nitrito a nitrato.

Tabla 4. Resultados del análisis de principales componentes

Componente	PC1	PC2	PC3	PC4	Extracción
Temperatura	,025	**,792**	,356	-,223	**,805**
pH	,009	,300	**,653**	,506	**,773**
Conductividad eléctrica	**,865**	,094	,404	,033	**,922**
Sólidos sedimentables	**,867**	-,141	-,081	-,097	**,788**
Sólidos totales en suspensión	**,743**	,478	-,366	,129	**,932**
Turbidez	**,812**	-,016	-,214	-,173	**,736**
Demanda Química de Oxígeno	**,952**	-,046	-,130	-,075	**,932**
Nitrógeno Kjeldahl	**,928**	-,158	,317	-,008	**,987**
Amonio	**,843**	-,188	,477	-,027	**,974**
Nitrógeno orgánico	**,909**	-,035	-,227	,038	**,881**
Nitrógeno total	**,908**	-,028	,320	,054	**,931**
Cromo	-,126	**,937**	-,276	-,075	**,975**
Nitritos	-,306	,002	,041	**,880**	**,870**
Nitratos	-,343	,412	-,205	**-,541**	**,622**
Fosfatos	**,652**	,577	-,330	-,022	**,868**
Sulfatos	**,654**	,565	-,392	,269	**,974**

Sodio	-,194	,937	-,248	-,045	**,979**
Potasio	,872	-,008	,454	-,026	**,967**
Calcio	,008	,534	-,819	-,051	**,958**
Magnesio	-,432	,817	-,262	,219	**,970**
Cobre	,020	,061	,696	,536	**,776**
Zinc	,013	-,178	,863	,109	**,789**
Hierro	,123	-,213	,899	-,087	**,876**
Manganeso	-,264	,775	-,506	,068	**,930**
% varianza	**39,4**	**26,9**	**15,0**	**6,1**	
% varianza acumulada	**39,4**	**66,3**	**81,3**	**87,3**	

4. Conclusiones

El sistema de tratamiento en el que se integra un humedal artificial pone de manifiesto la importancia de cada una de las etapas que lo constituyen. Así, el separador de fases permitió una reducción considerable de los SS, que se redujeron en su totalidad en esta etapa, obteniendo una eficiencia del 100 %. Además, los SS, la turbidez y la DQO también fueron reducidas a su paso por el separador. El sistema en su conjunto permitió reducciones considerables del nitrógeno (NK, NH_4^+ y NO), que se obtuvieron principalmente a su paso por cada una de las celdas del humedal. Sin embargo, los cationes y aniones mostraron eficiencias diferentes a su paso por el sistema de tratamiento, siendo en algunos casos las concentraciones finales superiores a las iniciales, lo que podría explicarse por la liberación de estos por el sustrato. En cuanto a los metales, el Cu, Zn y Fe disminuyeron principalmente a su paso por el humedal.

Por tanto, puede establecerse que el sistema de tratamiento integral de purín con biofiltros (humedal artificial) es muy eficaz por la capacidad de remoción de la mayoría de parámetros analizados, contribuyendo así a un purín tratado con mayor calidad y por tanto, pudiendo ser utilizado para su valorización agronómica sostenible y a su vez incidir en el ahorro de fertilizantes inorgánicos y de agua de riego.

Referencias

1. Eurostat (2019) Eurostat. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/data/database.
2. Makara A. Comparative analyses of pig farming management systems using the Life Cycle Assessment method', Journal of Cleaner Production. 2019, 241.
3. Lee Y.S., Han G.B. Pig slurry treatment by a hybrid multi-stage unit system consisting of an ATAD and an EGSB followed by a SBR reactor. Biosystems Engineering. 2012, 111(3), (243–250).
4. Terrero M.A. Efficiency of an integrated purification system for pig slurry treatment under mediterranean climate. Agronomy. 2020, 10(2).
5. Secco C. Circular economy in the pig farming chain: Proposing a model for measurement', Journal of Cleaner Production. 2020, 260, 121003.
6. Marti E. Pharmaceuticals removal in an on-farm pig slurry treatment plant based on solid-liquid separation and nitrification-denitrification systems. Waste Management. 2020, 102, (412–419).
7. Caballero-Lajarín A. Combination of Low-Cost Technologies for Pig Slurry Purification under Semiarid Mediterranean Conditions. Water, Air, and Soil Pollution. 2015, 226(10).

8. Gill L.W. Long term heavy metal removal by a constructed wetland treating rainfall runoff from a motorway', Science of the Total Environment. 2017, 601–602, (32–44).
9. Bakhshoodeh R., Alavi N., Paydary P. Composting plant leachate treatment by a pilot-scale, three-stage, horizontal flow constructed wetland in central Iran', Environmental Science and Pollution Research. 2017, 24(30), (23803–23814).
10. Lu S. Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment', Journal of Cleaner Production. 2016, 127, (325–330).
11. Hjorth M. Solid-liquid separation of animal slurry in theory and practice. Sustainable Agriculture. 2009, 2, (953–986).
12. Andreo-Martínez P. Domestic wastewaters reuse reclaimed by an improved horizontal subsurface-flow constructed wetland. Bioresource Technology. 2017, 233, (236–246).
13. El Bied O. Purification performance of filtration process for pig slurry using marine sands, silty loam soils, fly ash and zeolite. Agronomy. 2021, 11(8), (1–15).
14. Burton C.H. The potential contribution of separation technologies to the management of livestock manure, Livestock Science. 2007, 112(3), (208–216).
15. Zhang D.Q. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000-2013), Journal of Environmental Sciences (China). 2015, 30 (30–46).
16. Muñoz M.A. Effects of the Hydraulic Retention Time on Pig Slurry Purification by Constructed Wetlands and Stabilization Ponds. Water, Air, and Soil Pollution. 2016, 227(9).
17. Guo X., Cui X., Li H. Effects of fillers combined with biosorbents on nutrient and heavy metal removal from biogas slurry in constructed wetlands. Science of the Total Environment. 2020, 703, 134788.
18. Popovic O. 'Improved pig slurry mechanical separation using chitosan and biochar', Biosystems Engineering. 2014, 127, (115–124).
19. Borin M., Politeo M., De Stefani G. Performance of a hybrid constructed wetland treating piggery wastewater. Ecological Engineering. 2013, 51, (229–236).
20. García-Valero A. Treatment of Wastewater from the Tannery Industry in a Constructed Wetland Planted with Phragmites australis. 2020, (1–14).



Optimización del riego en la producción de tomate de industria en la Vega Media del Guadalquivir: análisis de la huella hídrica.

G. Egea[1], Castro, P.[1], Munuera, T.[2], Masdemont, B.[2], Domínguez, J.[2], Nortes, P.A.[3]

[1] Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad de Sevilla. Ctra. Utrera km. 1, 41013, Sevilla; gegea@us.es, pcvalecantos@us.es
[2] Sistema Azud S.A., Av. De las Américas, P.6/6, 30820 Alcantarilla. jmdominguez@azud.com, tmunuera@azud.com
[3] CEBAS-CSIC. Campus Universitario de Espinardo, 30100 Murcia. panortes@cebas.csic.es

Abstract: The water footprint of a product or service refers to the total amount of water used throughout its supply chain. In the case of agricultural products, most water use occurs during the farming stage, highlighting the importance of quantification to raise awareness and implement sustainable irrigation management strategies. Processing tomato is a highly profitable but also water-intensive crop. Technical and scientific efforts are being made to optimize water consumption without compromising profitability. Techniques such as sub-surface drip irrigation and deficit irrigation can increase irrigation water productivity without penalizing farmers' economic returns. In this study, the water footprint of processing tomatoes grown in the *Vega Media del Guadalquivir* region (Andalusia, Spain) has been determined during one growing cycle under different irrigation systems and management strategies. The green, blue, and grey components of the crop's water footprint were determined for five irrigation treatments combining surface and sub-surface drip irrigation and deficit irrigation. The treatment with the lowest total water footprint was sub-surface drip irrigation with pipes buried at 15 cm depth and no deficit irrigation. This treatment had a total water footprint of 60.3 liters per kilogram of tomato produced, with 7.0 L/kg of green, 31.3 L/kg of blue, and 22.0 L/kg of grey water footprint components.

Palabras clave: riego por goteo, riego subterráneo, *Solanum lycopersicum*, evapotranspiración, balance hídrico del suelo.

1. Introducción

La agricultura es la actividad humana que más agua dulce utiliza a nivel global. Con el objetivo de crear conciencia social y de poder analizar la relación existente entre los hábitos de consumo humano y su impacto sobre los recursos naturales, Hoekstra [1] definió el concepto de 'huella hídrica (HH)', un indicador que mide la utilización de recursos hídricos para las actividades humanas evaluando tanto el consumo de agua como el impacto sobre la calidad del agua. Aunque la HH de un producto refleja el volumen de agua dulce utilizado para producir un determinado producto a lo largo de toda la cadena de suministro [2], para muchos productos alimenticios la mayor parte del uso de agua tiene lugar durante la etapa de producción agrícola [3].

La HH total es la suma de tres componentes denominadas HH azul, HH verde y HH gris. La HH azul hace referencia a la cantidad de agua aportada en el riego que ha sido usada en el proceso de evapotranspiración. Por otra parte, la HH verde hace referencia al agua de lluvia que ha sido utilizada en el proceso productivo, de nuevo como agua usada en el proceso de evapotranspiración principalmente. La HH gris hace referencia a la contaminación de las masas de agua que genera el proceso productivo. El agua gris sería, por tanto, el volumen de agua dulce que sería necesario utilizar para asimilar la carga de contaminantes teniendo en cuenta la

concentración ambiental inicial de dichos contaminantes y la concentración máxima admisible de acuerdo con los estándares de calidad del agua actuales.

El tomate de industria es un cultivo de alto valor económico en España. España es el cuarto productor mundial de tomate elaborado, con algo menos del 30% de la producción nacional procedente de Andalucía. Es un cultivo muy demandante en agua de riego, con consumos que suelen exceder los 600 mm por ciclo de cultivo en las principales zonas productoras de España. No obstante, factores como el clima de la región, el sistema productivo o el tipo de suelo pueden afectar a la HH de este cultivo. Mientras en Marruecos la HH de un kilogramo de tomates para consumo en fresco producidos en invernaderos sin calefacción no supera los 30 litros [4], en Italia la producción de un kilogramo de tomate de industria usa, de media, 114 litros de agua [5].

A pesar de disponer de trabajos en la bibliografía que documentan la HH del tomate de industria en distintas regiones mediterráneas, existe aún mucha incertidumbre sobre los datos de HH publicados debido a la falta de fiabilidad o ausencia de datos robustos sobre los que calcular la HH de la producción agrícola [6]. Un claro ejemplo es el hecho de que menos de la mitad de los estudios sobre HH incluyen la determinación de la HH gris, y aquellos que lo hacen se basan en simplificaciones o estimas (p.e. asumir que un 10% del abono nitrogenado se pierde por drenaje o escorrentía) más que en datos medidos o estimados en parcelas experimentales. Otro ejemplo es el hecho de que la mayoría de estudios sobre HH estiman la ET del cultivo bajo condiciones óptimas de riego, sin contemplar otros escenarios de riego reales como por ejemplo el impacto que tiene el riego deficitario sobre la tasa de evapotranspiración y, por tanto, la HH.

Por este motivo, en este trabajo se ha planteado un estudio experimental en el que se ha evaluado el comportamiento agronómico del tomate de industria frente a distintos sistemas (riego por goteo superficial vs riego por goteo sub-superficial) y manejos (ausencia de estrés hídrico vs déficit hídrico) del riego. Los datos de desarrollo del cultivo así como la aplicación real del riego se han utilizado para estimar las componentes del balance hídrico diario del suelo, necesarias para la estima de la HH del cultivo de tomate bajo los escenarios de manejo indicados y bajo las condiciones edafoclimáticas de la Vega Media del Guadalquivir.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción de la parcela experimental

El estudio se realizó en una explotación comercial ubicada en el término municipal de Carmona (Sevilla). En el año 2022, la explotación dedicó una superficie de 11.7 ha al cultivo de tomate, de las que 2.5 ha se destinaron al ensayo experimental.

El cultivo se estableció en lomos de 1.10 m de anchura y 0.2-0.3 m de altura con un espaciado entre centros de 1.5 m. La variedad de tomate utilizada fue Heinz 1015 y el cultivo se trasplantó el 18 de abril de 2022. Se estableció una única línea de plantación por lomo, con una densidad de plantación próxima a 30000 plantas por hectárea. El suelo de la parcela presenta una textura franco-arcillo-arenosa (Arena=60%, Limo=17%, Arcilla=23%), con un pH de 7.8, conductividad eléctrica de 158 µS/cm y un contenido en materia orgánica de 0.6 %. El clima de la zona es de tipo Mediterráneo, con lluvias principalmente concentradas entre los meses de octubre y mayo y una pluviometría media anual de 540 mm. La evapotranspiración de referencia (ETo) es de unos 1500 mm anuales. Durante los 104 días que duró el ciclo de cultivo, los registros medios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar fueron de 24.2 ºC, 45.1 %, 1.8 m/s y 27.3 MJ/(m^{2}d), respectivamente. El ciclo de cultivo se caracterizó por la ocurrencia de tres episodios de lluvia en los primeros 20 días del ciclo de cultivo, que aportaron un total de 57.4 mm de agua al cultivo, y un régimen térmico caracterizado por dos olas de calor ocurridas en los meses de junio (DDT 51-60) y julio (DDT 81-102) en los que se registraron temperaturas máximas diarias medias de 38.5 ºC y 39.9 ºC, respectivamente. La evapotranspiración de referencia (ETo) acumulada a lo largo del ciclo de cultivo fue de 678 mm.

2.2. Descripción del sistema y tratamientos de riego.

El sistema de riego utilizado fue riego por goteo superficial y subsuperficial a distintas profundidades. En todos los casos se utilizaron como laterales, tubería emisora fabricada en polietileno y diámetro nominal 16 mm con presión nominal 4 bar integrando goteros autocompensantes y antisucción (Azud Genium HD PC ASP) de 1.6 L/h y espaciados 0.5 m. En cada tratamiento de riego se instaló una sonda de perfil modelo Drill & Drop (Sentek Sensor Technologies, Stepney, Australia) para la monitorización del contenido de humedad del suelo. La sonda utilizada tiene una longitud de 90 cm y permite medir el contenido volumétrico de humedad del suelo a nueve profundidades (5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 cm).

Se establecieron 5 tratamientos de riego, 2 de riego por goteo superficial (T1, T2), dos de riego por goteo sub-superficial en el que los laterales de riego se enterraron a una profundidad de 15 cm (T3, T4), y un tratamiento de riego por goteo sub-superficial en el que los laterales se enterraron a una profundidad de 35 cm (T5). Cada uno de los tratamientos de riego se estableció en una sub-parcela de 5000 m² (Figura 1).

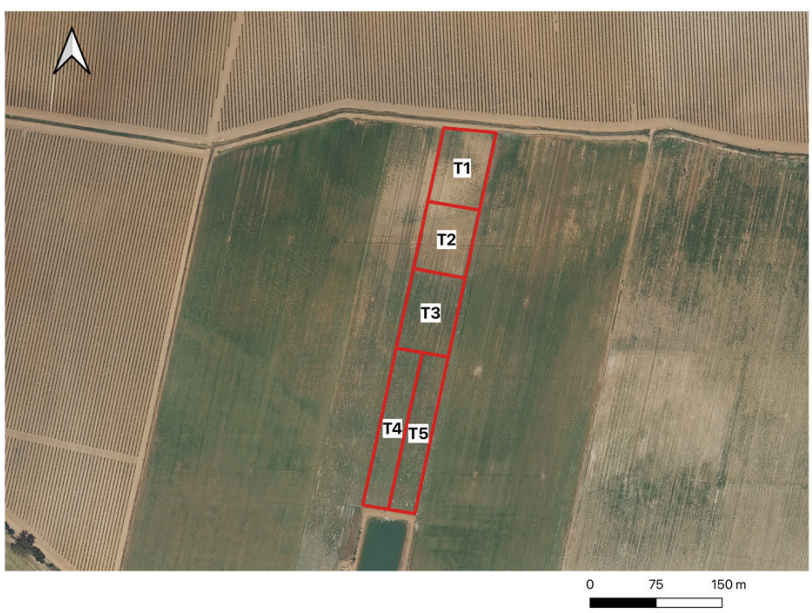


Figura 1. Distribución de los tratamientos de riego en la parcela experimental.

El tratamiento T1 se regó al 100% de las necesidades hídricas del cultivo (ETc). Los tratamientos T2 y T3 también recibieron el 100% ETc, si bien sus dosis diarias de riego fueron ajustadas en base a las lecturas de humedad del suelo. El tratamiento T4 recibió el 100% ETc (ajustado en base a las lecturas de humedad del suelo) durante todo el ciclo de cultivo, excepto durante la fase de maduración del fruto (aproximadamente últimos 30 días del ciclo de cultivo) donde recibió un 80% de la dosis aplicada a T1. El tratamiento T5 recibió el 100% ETc ajustando las dosis de riego en base a las lecturas de humedad del suelo.

La ETc se calculó utilizando la metodología basada en el coeficiente de cultivo (Kc) y la evapotranspiración del cultivo de referencia [7]. Los coeficientes de cultivo se determinaron utilizando la expresión propuesta por Campillo-Torres et al. [8], basada en el porcentaje de suelo sombreado por el cultivo.

2.3. Concentración de nitratos en la solución del suelo.

Se instalaron sondas de succión en dos repeticiones por tratamiento. En dos fechas del ciclo de cultivo se extrajo solución del suelo para la determinación de la concentración de nitratos con un reflectómetro RQFlex (Merck KGaA, Darmstadt, Alemania). La medida de la concentración de nitratos en la solución del suelo se ha utilizado para estimar la HH gris de la producción de tomate de industria.

2.4. Producción.

La cosecha se evaluó en cuatro repeticiones por tratamiento. Cada repetición consistió en un tramo de lomo de 2 m de longitud en el que se recolectaron manualmente todos los tomates que presentaron calidad comercial equivalente a los seleccionados por la cosechadora automática de tomate. Los frutos cosechados en cada repetición se pesaron en una balanza portátil.

2.5. Determinación de la huella hídrica del cultivo.

De acuerdo con la metodología propuesta por Hoekstra et al. [2], la huella hídrica de un cultivo (HH) es la suma de tres componentes:

$$HH = HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris}$$

y se suele expresar en m^3/t o L/kg.

La componente verde se calculó con la siguiente expresión:

$$HH_{verde}\left(\frac{m^3}{t}\right) = \frac{ET_{verde}\left(\frac{m^3}{ha}\right)}{Producción\left(\frac{t}{ha}\right)}$$

donde ET_{verde} representa la fracción de lluvia destinada al proceso de evapotranspiración del cultivo a lo largo del ciclo de cultivo.

La componente azul se calculó según la siguiente expresión:

$$HH_{azul}\left(\frac{m^3}{t}\right) = \frac{ET_{azul}\left(\frac{m^3}{ha}\right)}{Producción\left(\frac{t}{ha}\right)}$$

donde ET_{azul} representa la fracción del agua de riego aplicada que se pierde por evapotranspiración a lo largo de todo el ciclo de cultivo.

La componente gris se calculó según la siguiente expresión:

$$HH_{gris}\left(\frac{m^3}{t}\right) = \frac{\frac{N_{exceso}}{(C_{max}-C_{nat})}\left(\frac{m^3}{ha}\right)}{Producción\left(\frac{t}{ha}\right)}$$

donde N_{exceso} (kg/ha) representa la cantidad de nitrógeno que escapa de la rizosfera del cultivo, C_{max} representa la concentración de N máxima permitida en la masa de agua receptora y C_{nat} es la concentración de N existente en la masa de agua receptora antes de realizarse la actividad contaminante (considerada despreciable en este trabajo). El valor de C_{max} considerado en este trabajo ha sido de 11,29 mg N/L correspondiente a 50 mg NO_3/L (EU Nitrates Directive, 91/676/EEC).

Los valores acumulados de ET_{verde} y ET_{azul} han sido obtenidos utilizando el programa Hydrus 2D/3D [9], que permite simular el flujo de agua en el suelo así como las componentes del balance hídrico del suelo, entre las que se encuentran los flujos de evaporación, transpiración y drenaje. Para separar la ET_{verde} de la ET_{azul} se realizaron simulaciones considerando o no los aportes de agua de riego, tal y como describen Hoekstra et al. [2]. El flujo de drenaje acumulado simulado para todo el ciclo de cultivo se utilizó, junto con las concentraciones de nitratos medidas en la solución del suelo, para determinar las cantidades de nitrógeno que se pierden por percolación profunda (N_{exceso}).

2.6. Determinación de las componentes del balance hídrico del suelo con Hydrus 2D/3D.

Las componentes del balance hídrico del suelo fueron determinadas a escala diaria con el software Hydrus 2D/3D. Las propiedades hidráulicas del suelo se han descrito utilizando las relaciones constitutivas de van Genuchten-Mualem [10] utilizando el modelo Rosetta, basado en el modelo de van Genuchten e integrado en el programa Hydrus 2D/3D. La Tabla 1 muestra los parámetros hidráulicos utilizados en el estudio de modelización considerando que el suelo es homogéneo en el dominio de flujo definido (1 m de profundidad).

Tabla 1. Parámetros hidráulicos del suelo utilizados en el estudio de modelización. θ_r: contenido de agua residual; θ_s: contenido de agua saturada; α, n y l: parámetros de forma de van Genuchten; K_s: conductividad hidráulica saturada.

Textura	θ_r ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3\ cm^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	K_s ($cm\ d^{-1}$)	l
Franco-arcillo-arenosa	0.0637	0.3865	0.0264	1.3321	15.55	0.5

La distribución radicular del cultivo fue definida utilizando el modelo de Vrugt et al. [11]. La reducción de la absorción de agua por las raíces con el estrés hídrico se ha simulado con la ecuación de Feddes et al. [12], cuyos parámetros para el cultivo del tomate se encuentran disponibles en la base de datos incluida en el programa Hydrus. Respecto a las condiciones de contorno, se estableció una condición de ausencia de flujo en los bordes izquierdo y derecho del perfil del suelo, una condición de contorno de drenaje libre en la parte inferior del perfil del suelo, y una condición de contorno atmosférica en el borde superior del dominio de flujo. En los tratamientos T1 y T2 (riego por goteo superficial) se definió una condición de contorno de flujo variable en los nodos pertenecientes a un segmento de 6,75 cm de la parte superior izquierda del dominio de flujo, representando la zona de infiltración de agua de los goteros. En los tratamientos T3 y T4 se definió una condición de contorno de flujo variable en los nodos de una semiesfera de 2 cm de diámetro ubicada a 15 cm de profundidad en el borde lateral izquierdo del dominio de flujo, representando la zona de emisión de agua en estos tratamientos. De igual forma, en el tratamiento T5 se definió una condición de contorno de flujo variable en los nodos de una semiesfera de 2 cm de diámetro ubicada a 35 cm de profundidad en el borde lateral izquierdo del dominio de flujo, representando la zona de emisión de agua en este tratamiento.

Durante los eventos de riego, el flujo de agua de los goteros (q) se estimó dividiendo la tasa de descarga del emisor (1600 cm^3 h-1) por la superficie de flujo. Además de la tasa de precipitación, en la condición de contorno atmosférica también se definen las tasas potenciales de transpiración y evaporación. Las estimaciones diarias de los flujos de transpiración potencial (TP) y evaporación potencial del suelo (EP) se obtuvieron a partir de los valores diarios de evapotranspiración del cultivo (ETc) calculados con el método del coeficiente de cultivo [7]. La partición de ETc en TP y EP se realizó asumiendo que EP disminuye gradualmente con el

porcentaje de suelo sombreado por el cultivo hasta unos valores mínimos de 5% ETc para coberturas mayores o iguales a 80%.

3. Resultados y discusión

La Tabla 2 muestra los valores acumulados de las componentes del balance hídrico del suelo para los cinco tratamientos de riego estudiados. La lámina de agua perdida por evaporación del suelo en los tratamientos de riego por goteo superficial (T1, T2) representó 82-83% de la evaporación potencial. Los tratamientos de riego por goteo sub-superficial con tuberías enterradas a 15 cm (T3 y T4) presentaron unas pérdidas por evaporación del suelo ligeramente inferiores a las de T1 y T2, representando un 79% de la lámina potencialmente evaporable. El tratamiento T5, con la tubería enterrada a 35 cm de profundidad, presentó una lámina de agua evaporada notablemente inferior a la del resto de tratamientos, representando un 61% de la lámina potencialmente evaporable. De igual forma, las láminas de agua transpirada representaron 99%, 99%, 93%, 90% y 79% de la lámina potencialmente transpirable en los tratamientos T1-T5, respectivamente. A pesar de que la lámina de riego aplicada en T5 fue muy similar a la aplicada en T1 y T2 (Tabla 2), la lámina de agua transpirada en T5 fue un 20% inferior a la de estos tratamientos. El motivo de estas diferencias se debió a la mayor lámina de agua drenada observada en T5 en comparación al resto de tratamientos de riego.

Tabla 2. Valores acumulados a lo largo del ciclo de cultivo de las componentes del balance hídrico del suelo. LL: lluvia; R: riego; EP: evaporación potencial; TP: evaporación potencial; EA: evaporación real; TA: transpiración real; DR: drenaje profundo.

Tratam.	LL (mm)	R (mm)	EP (mm)	TP (mm)	EA (mm)	TA (mm)	DR (mm)
T1	57.4	570.0	137.0	497.0	114.4	490.8	35.6
T2	57.4	561.5	137.0	497.0	111.5	490.8	33.0
T3	57.4	517.3	137.0	497.0	108.4	462.2	34.8
T4	57.4	495.3	137.0	497.0	108.7	449.1	35.2
T5	57.4	565.9	137.0	497.0	84.4	391.4	126.6

La huella hídrica (HH) verde fue muy similar en todos los tratamientos, con variaciones que oscilaron entre 7,0 (T3) y 8,7 (T4) L/kg (Tabla 3). Mayores diferencias fueron observadas en los valores de HH azul, que oscilaron entre 29,9 (T5) y 40,4 (T2) L/kg. Los valores de HH gris fueron similares entre los tratamientos T1-T4, con valores que oscilaron entre 22,0 (T3) y 27,7 (T4) L/kg. Sin embargo, el tratamiento T5 mostró una HH gris sustancialmente superior (95,6 L/kg) al resto de tratamientos debido a la mayor lámina de agua drenada observada en T5. En términos totales, el tratamiento que menor HH presentó fue el tratamiento T3, con una HH total de 60,3 L/kg lo que supone una reducción del 18% respecto a T1, T2 y T4 y del 55% respecto a T5.

Tabla 3. Huella hídrica (HH) verde, azul, gris y total para cada uno de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	P (t/ha)	HH_{verde} (L/kg)	HH_{azul} (L/kg)	HH_{gris} (L/kg)	HH_{total} (L/kg)

T1	128.3	8.1	39.1	26.1	73.3
T2	123.5	8.4	40.4	25.1	73.9
T3	148.9	7.0	31.3	22.0	60.3
T4	119.6	8.7	37.9	27.7	74.3
T5	124.5	8.4	29.9	95.6	133.8

En términos porcentuales (Figura 2), la HH verde representó aproximadamente el 11-12 % de la HH total en T1-T4, mientras que en T5 este valor fue alrededor del 6% de la HH total. La HH azul representó poco más del 50% en T1-T4, representando algo más del 20% en T5. La HH gris supuso, aproximadamente, el 35% de la HH total en T1-T4, ascendiendo al 71% en el tratamiento T5.

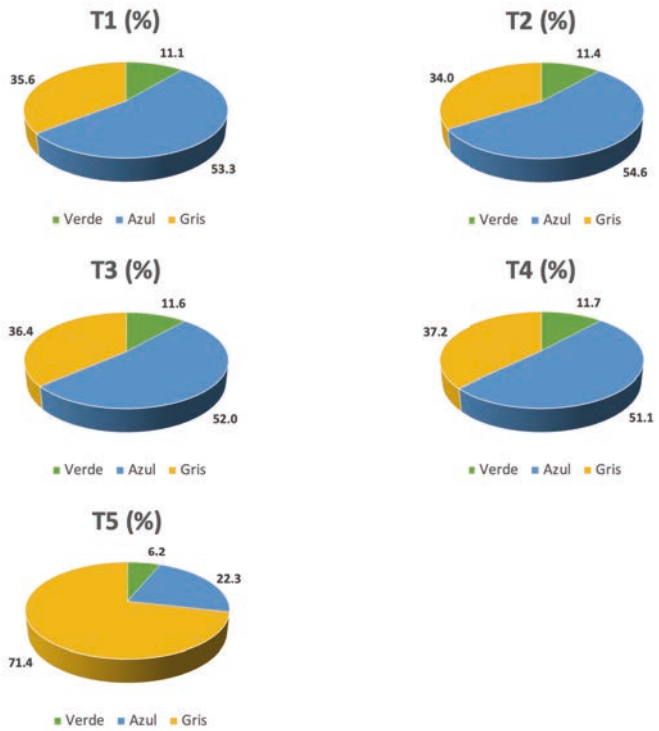


Figura 2. Distribución porcentual de las huellas verde, azul y gris en los tratamientos de riego evaluados.

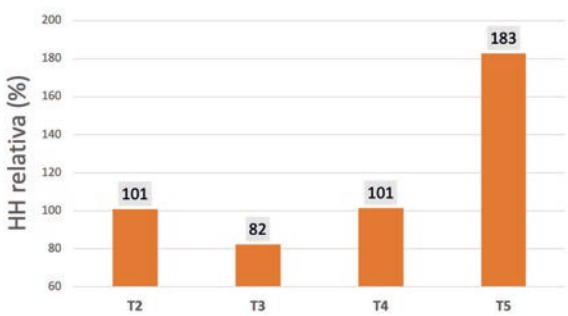


Figura 3. HH total relativa al tratamiento control (T1).

Tomando el tratamiento T1 como tratamiento control (riego por goteo superficial y programado con la metodología clásica FAO-56), los tratamientos T2 y T4 mostraron una HH total similar a la de T1, el tratamiento T3 redujo la HH en un 18% y el tratamiento T5 la incrementó en un 83% (Figura 3). En la bibliografía científica se puede comprobar la gran disparidad existente en los valores de HH publicados para esta especie, motivados por el efecto que juegan las condiciones edafoclimáticas en su valor y también por la incertidumbre existente en los valores de HH gris estimados. Chico et al. [13] determinaron la HH del tomate en todas las zonas productoras de España, obteniendo unos valores medios de 236 L/kg, de los que 5 L/kg se corresponden con HH verde, 92 L/kg con HH azul y 139 L/kg con HH gris. Excepto el valor de HH verde, el resto de valores obtenidos por Chico et al. [13] son muy superiores a los observados en este trabajo. En otro trabajo realizado en España por Chapagain y Orr [14] para el mismo cultivo, se obtuvo una HH total media para España de 81,3 L/kg y de 70,1 L/kg para la zona de Andalucía, valores mucho más próximos a los obtenidos en este trabajo. Las estimas de HH realizadas por Aldaya y Hoekstra [5] para el cultivo de tomate de industria en Italia también arrojaron valores notablemente superiores a los observados en este trabajo (114 L/kg frente a los 60,3 L/kg observados en T3), debido a los altos valores de HH azul (60 L/kg) obtenidos en Italia en comparación con los observados en el tratamiento T3 (31,3 L/kg). En cambio, la HH del tomate de industria producido en la zona central de Grecia (61 L/kg) [15] coincide con la obtenida para el tratamiento T3 (60,3 L/kg), mostrando valores de HH verde, azul y gris muy similares a los estimados en este trabajo.

4. Conclusiones

Se ha determinado la huella hídrica total (verde, azul y gris) del tomate de industria cultivado en la Vega Media del Guadalquivir bajo cinco escenarios diferentes, incluyendo riego por goteo superficial programado según la metodología FAO-56 (T1), riego por goteo superficial programado según FAO-56 y con apoyo de sonda de humedad del suelo (T2), riego por goteo sub-superficial con tubería a 15 cm de profundidad y programado según FAO-56 con apoyo de sonda de humedad del suelo (T3), riego por goteo sub-superficial con tubería a 15 cm de profundidad y programado con déficit hídrico leve durante la fase de maduración del fruto (T4), riego por goteo sub-superficial con tubería a 35 cm de profundidad y programado según FAO-56 con apoyo de sonda de humedad del suelo (T5). Los resultados obtenidos han mostrado que los tratamientos T1, T2 y T4 mostraron una huella hídrica total similar, próxima a 73-74 L/kg. El tratamiento T3 fue el tratamiento que menor huella hídrica presentó, con una reducción del 18% respecto a los tratamientos anteriores. El tratamiento T5 fue el que más huella hídrica presentó, con un incremento del 83% respecto a los tratamientos T1, T2 y T4.

5. Agradecimientos

El proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación (proyecto RTC2019-007179-2: Minimización en la huella hídrica del cultivo del tomate bajo condiciones de estrés abiótico-TOMABIOTIC). Los autores agradecen a Antonio Cazorla de Tuberías y Montajes Hidráulicos S.L. y al agricultor Francisco Marchena su inestimable colaboración en la realización de los ensayos de campo.

Referencias

[1] Hoekstra A. Y. (ed.). "Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade". Value of Water Research Report Series, 12. Netherlands, UNESCO-IHE, Delft. 2003. Disponible en: www.waterfootprint.org/Re-ports/Report12.pdf

[2] Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., Mekonnen M.M. The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan, London. 2011.

[3] Ridoutt B.G., Pfister S. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. Glob. Environ. Chang. 2010, 20, 113–120.
[4] Payen S., Basset-Mens C., Perret S. LCA of local and imported tomato: An energy and water trade-off. J. Clean. Prod. 2014, 87, 139–148.
[5] Aldaya M.M., Hoekstra A.Y. The water needed for Italians to eat pasta and pizza. Agric. Syst. 2010, 103, 351–360.
[6] Hoekstra A.Y., Chapagain A.K. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources; Blackwell Publishing: Oxford, UK. 2008.
[7] Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56: Crop Evapotranspiration. 1998.
[8] Campillo Torres C., González García J.A., Fortes Gallego R., Millán Arias S., González García V., Chávez Ceferino A., Daza Delgado C., Prieto Losada M.H. Manuel Práctico de Riego. Tomate de Industria. Guadajira (Badajoz). 2015.
[9] Šimůnek J., Sejna M., van Genuchten M.Th. The HYDRUS software package for simulating the two- and three- dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. In: Technical Manual, version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, 2006, pp. 213.
[10] van Genuchten M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44, 892–898.
[11] Vrugt J.A., Hopmans J.W., Šimůnek J. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. Soil Sci. Soc. Am. J. 2001, 65, 1027-1037.
[12] Feddes R.A., Kowalik P.J. Zaradny H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, John Wiley & Sons, New York, NY. 1978.
[13] Chico D.G., Salmoral M.R., Llamas A., Garridoand M., Aldaya M. The Water Footprint and Virtual Exports of Spanish Tomatos. Papeles de Agua Virtual, No. 8; Botin Foundation: Santander, Spain. 2010.
[14] Chapagain A.K., Orr S. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes. Journal of Environmental Management. 2009, 90, 1219–1228.
[15] Evangelou E., Tsadilas C., Tserlikakis N., Tsitouras A., Kyritsis A. Water Footprint of Industrial Tomato Cultivations in the Pinios River Basin: Soil Properties Interactions. Water. 2016, 8, 515.



Manejo del riego en el cultivo del almendro afectado por heladas.

J.A. Martínez-López[1*], F. Montoya[2], J.J. Pardo[1], A. Martínez-Romero[1], H. Martínez-López[1], R. López-Urrea[2], A. Domínguez[1].

[1] Universidad de Castilla-La Mancha, Centro Regional de Estudios del Agua, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete, España. (josea.martinez@uclm.es)

[2] Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, Parque Empresarial Campollano, 2ª Avda. Nº61, 02007 Albacete. (fms.itap@dipualba.es)

Abstract: The increase of planting almond (*Prunnus dulcis* (Mill.) D.A.Webb) in Spain implies its extension towards areas where it faces spring frost problems. It has been partially solved by late and extra-late flowering varieties. However, the climate change effects (such as late or extra-late spring frost and its intensity) cause problems on the fruit set and so on the total almond production per tree. In these sense, there is a huge uncertainty among almond growers about how scheduling irrigation of the almond orchard should be managed in growing seasons where nut production is limited by frost flowering and, in addition, the irrigation water resources available for growers are low. An experimental trial carried out in an almond orchard (cv. Lauranne) affected by spring frost, aims to study the effect of irrigation in 3 different water levels (80%, T1; 60%, T2; and 40%, T3; over a total available water amount of 2500 m ^{3} ha^{-1}) applied during that year in order to evaluate the physiological and productive response of the crop. No significant differences were found between treatments in terms of nut production or tree growth, whereas T3 showed significant differences with respect to T1 and T2 with the physiological variables of net assimilation and stomatic conductance from fruit set to harvest. Further research is necessary in a subsequent growing season to determine the effects of the irrigation levels applied on the productive parameters of almond orchard.

Palabras clave: Riego deficitario controlado, eficiencia en el uso del agua, estrés hídrico, heladas tardías de primavera, producción de almendra.

1. Introducción

Actualmente, el grado de intensificación agrícola que están sufriendo determinadas regiones de clima semiárido, como es el sur y sureste de Castilla-La Mancha (CLM), provoca una presión cada vez mayor sobre los recursos hídricos. En este contexto, no sólo la mejora en la eficiencia en el uso del agua por parte de los usuarios es un requisito indispensable para la sostenibilidad del recurso, sino que los recortes en la disponibilidad de agua para riego en las explotaciones agrarias comerciales es ya una realidad [1,2]. Ante esta situación, muchas explotaciones de regadío de CLM están cambiado, total o parcialmente, su orientación productiva hacia frutales de fruto seco (principalmente almendro), debido a que es un sector que se encuentra en una situación de: elevada tecnificación, nuevas variedades mejor adaptadas al período libre de heladas, y precios de venta del producto atractivos [3], lo que genera un gran interés entre los agricultores.

El área cultivada de almendro en CLM se ha incrementado en un 137% desde 2010, contando actualmente con cerca de 146.000 ha, con un aumento significativo de la superficie de regadío alcanzando casi 23.400 ha [4]. Estos datos de superficie suponen alrededor del 20% sobre el total nacional [4]. Según las estadísticas, las plantaciones que están en producción bajo riego en CLM suelen tener rendimientos de almendra en pepita que oscilan entre 1100 a 2200 kg ha^{-1} [4]. Estas

diferencias son mucho menos acentuadas en otras regiones productoras, como Andalucía, Murcia o la Comunidad Valenciana, siendo el período libre de heladas disponible en cada zona productora una de las principales razones que podría explicar tal variabilidad. La rápida transformación de un cultivo que tradicionalmente se ha localizado en zonas marginales y en secano (<150 plantas ha^{-1}), hacia modelos de producción intensivos (300-500 plantas ha^{-1}) o superintensivos (1000-1200 plantas ha^{-1}) en regadío, trae consigo cuestiones como la sostenibilidad económica y ambiental de los diferentes sistemas de producción bajo los actuales y futuros escenarios de disponibilidad hídrica y de cambio climático.

En términos de rendimiento y de calidad de la almendra, el riego puede ser considerado como el principal factor limitante de este cultivo [5]. Desde diferentes funciones de producción para el almendro en California [6] obtuvieron rendimientos máximos de 3900 kg ha^{-1} de almendra (pepita) con láminas de riego de 1250 mm en el ciclo anual, viéndose reducido dicho rendimiento en un 14% cuando la lámina de riego se reduce a 1000 mm. En un estudio reciente en España [7] , los rendimientos se incrementaron desde 500kg ha^{-1} con 50 mm de agua de riego aplicada hasta 2700kg ha^{-1} con 1050 mm a partir de aquí los rendimientos se estabilizan. No obstante, el almendro es un cultivo que tolera el estrés hídrico, por lo que diferentes autores, con el objetivo de mejorar la eficiencia en el uso del agua y minimizar sus efectos sobre el rendimiento y la calidad de la almendra, han analizado los efectos del riego deficitario sobre este cultivo obteniendo distintos resultados [8–10]. Hasta la fecha, diferentes experimentos basados en estrategias de riego deficitario en almendro durante al menos tres campañas han obtenido que el almendro es muy sensible al estrés hídrico durante la fase de crecimiento vegetativo, es decir en los estados I y II de crecimiento del fruto y del embrión respectivamente siendo más tolerante al déficit hídrico durante la etapa III (llenado de la semilla) [11] .En cambio, un déficit hídrico en post-cosecha reduce la carga de fruta en la siguiente estación de crecimiento, por lo que si se compara la sensibilidad al déficit hídrico entre estas dos últimas etapas, ésta última es más sensible [9,10].

Este incremento de superficie plantada de almendro en los últimos años supone todo un reto que debe hacer frente a los efectos del cambio climático, como es la ocurrencia –cada vez más frecuente– de heladas tardías de primavera, y de diferente intensidad, que ocasionan pérdidas de cosecha por afectar a la etapa más sensible (el cuajado del fruto). Estos problemas han sido resueltos, en parte, por las nuevas variedades de floración tardía y extra tardía.

Junto a lo anterior, se tiene otro factor añadido que es la escasez de recursos hídricos. En concreto, las dotaciones hídricas que se suelen asignar en las plantaciones de almendro de CLM no son capaces de satisfacer sus requerimientos hídricos. En estos casos, los productores de almendro tienen la incertidumbre de cómo manejar el riego en años con escasa cosecha por las heladas, donde la aplicación de toda la dotación disponible puede provocar crecimientos vegetativos excesivos que disparen los requerimientos hídricos del almendro al año siguiente, salvo que se lleven a cabo podas más severas que permitan controlar tal desarrollo.

Experimentos realizados en otros frutales como el manzano, el olivo, el melocotón o el ciruelo se ha demostrado que para diferentes cargas de fruta son necesarios diferentes umbrales de riego [12–14]. En Olivo, Naor et al. (2013) demostró que bajas dotaciones de riego son suficientes para bajas cargas de fruta con el fin de maximizar el rendimiento comercial [15] . Parra-Quezada [16] demostró para el manzano que años de escasa carga inicial desembocan en una mayor densidad de floración al año siguiente bajo un mismo volumen de agua de riego. En este sentido, resultaría muy interesante estudiar este hecho para el cultivo del almendro afectado de forma frecuente por las heladas.

El presente trabajo trata de estudiar la respuesta del cultivo del almendro, cuya producción está afectada por las heladas tardías de primavera, a diferentes volúmenes limitantes de agua aplicada bajo estrategias de riego deficitario controlado. De este objetivo general se establecen los

siguientes objetivos parciales: 1) estudiar el desarrollo y crecimiento del cultivo, 2) estudiar la respuesta fisiológica de las plantas.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio y zona de ensayo

El ensayo se ha llevado a cabo durante la campaña del año 2022 en el Término Municipal de La Roda (Albacete, España) (39° 10′ 33″ N, 2° 6′ 40″ W, 730 m s. n. m.). El suelo presenta una textura franca con una profundidad de 0.6 m limitado por un horizonte petro-cálcico. El clima es Mediterráneo semiárido con una precipitación anual de 350 mm, concentrada en primavera y otoño. La evapotranspiración de referencia media anual (ET_o) es de 1200 mm aproximadamente.

Los datos meteorológicos de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y lluvia son recogidos por una estación climática instalada en la parcela. Por otro lado, los valores de ET_o son obtenidos de la estación de "La Gineta", perteneciente a la red de estaciones del Sistema Integral de Asesoramiento al Regante (SIAR) de España.

El ensayo se ha llevado a cabo en una plantación comercial de almendro (Prunnus dulcis (Mill.), D.A. Webb cv Lauranne) de 9 ha, plantada en 2014 sobre patrón GF-677. El marco de plantación es de 6 m (entre plantas) por 7 m (entre filas) (242 plantas ha^{-1}). Los árboles están formados siguiendo una estructura de vaso de pisos. El suelo se maneja mediante no laboreo, mientras que el control fitosanitario se realiza según las técnicas convencionales para garantizar el buen estado fitosanitario de la plantación.

El cultivo se riega mediante un sistema de riego por goteo superficial, con dos ramales porta goteros por fila de plantas separados 0.75 m de la línea de árboles. Los emisores son auto compensantes con una separación de 0.75 m y un caudal de 2.5 L h^{-1}, aplicando una cantidad de 1.0 mm h^{-1}. La plantación es fertilizada a través de un sistema de fertirrigación con un complejo N-P-K a través de varias aplicaciones a lo largo del ciclo de cultivo.

2.2. Diseño experimental tratamientos hídricos y programacion de riegos.

En 2022 debido a la existencia de un fenómeno de helada ocurrido al final de la etapa de floración e inicio de la etapa de crecimiento del fruto se plantean 3 tratamientos hídricos. Partiendo de un tratamiento control (T1) con una dotación próxima a los 2500 m^3ha^{-1} se generan 2 tratamientos más cuya dotación es ¼ (T2) y ½ (T3) inferior a la dotación de la parcela respectivamente. Cada tratamiento cuenta con 3 repeticiones, distribuidas de forma completamente aleatoria a lo largo de 3 bloques (B1, B2 y B3) en el sector de riego . Cada repetición consta de 12 plantas (3 filas de 4 plantas por fila).

La programación de riego se realiza de acuerdo con la metodología del coeficiente dual de FAO 56, la cual realiza un balance simplificado de agua en la zona radicular [17,18] para calcular el nivel de agotamiento del suelo ($D_{r,i}$). Como entradas para el cálculo del balance hídrico la metodología dual considera Precipitación efectiva (P_e) y lamina de riego (I), como salidas considera Evapotranspiración del cultivo (ET_c), percolación (D_p) y $D_{r,\,i-1}$ en la zona radicular. No se considera ascenso capilar porque el nivel freático está mucho más profundo que la zona radicular. La ET_c es calculada como suma de la evaporación del suelo (considerando la superficie del suelo una profundidad de 10 cm, Z_e= 0.1 m) y la transpiración del cultivo (la cual se lleva a cabo en toda la profundidad efectiva de la zona radícula, Z_r= 0.60m).

La fracción media de suelo mojada por el sistema de riego es de 0.12 (considerando una anchura mojada de bulbo de cada ramal porta goteros de 0.8 m) mientras que la fracción de suelo mojado para los eventos de lluvia es del 1.00. el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) considerado es de: K_{cbini}: 0.15 durante la etapa inicial, (Etapa I), K_{cbmed}: 0.85 durante la etapa intermedia (etapa II) y K_{cbfin}: 0.35 hasta la caída del 50% de las hojas (Etapa IV). El coeficiente de densidad (K_d) también se

considera en el cálculo de la ET_c, ya que afecta a la transpiración del cultivo, este coeficiente se ha obtenido usando la ecuación de Fereres et al. [19] donde el área sombreada se ha obtenido a partir de la evolución de fracción de suelo cubierto (f_c) durante toda la campaña. Finalmente, un coeficiente de estrés (K_s) es considerado de acuerdo con la metodología FAO 56 [17] para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_a).

2.3. Crecimiento de cultivo, medidas fisiologicas y rendimiento de cosecha

Las variables consideradas son: a) fenológica del cultivo [20], b) evolución de la cubierta vegetal, a través de medidas horizontales de diámetro de copa y altura de planta con una cinta métrica, c) estado hídrico de la planta, d) eficiencia en el uso del agua intrínseca (WUE_i) derivadas a partir de medidas de asimilación neta (A) y conductancia estomática (g_{sw}) en hoja. Estas medidas se realizaron cada 15-20 días desde abril hasta octubre.

La f_c fue estimada a partir de medidas de diámetro de copa (paralela y perpendicularmente a la fila de plantas). El diámetro de copa se midió un total de 12 veces. El estado hídrico de la planta se determina a partir de las medidas de potencial hídrico de tallo medido al mediodía (Ψ_{tallo}) usando una cámara de Scholander (PMS Instruments; Corvallis, OR, USA), midiendo 2 hojas de cada repetición (una por árbol) entre las 11:00 y las 14:00 durante 10 veces a lo largo del ciclo de cultivo. La A y g_{sw} son medidas a la vez usando un intercambiador de gases portátil (LI6800, LI-COR Bioscience, NE, USA). Estas medidas fueron llevadas a cabo en la parte central de dos hojas de cada repetición, considerando un área de la cámara de 6 cm^2. La $WUE_{i\ se}$ calculó para cada planta como la ratio entre A y g_{sw}.

Dos árboles centrales de cada repetición fueron cosechados con un paraguas vibrador una vez que los frutos alcanzaron la madurez comercial (8-10% de humedad). La producción total por planta (P_p) fue obtenida midiendo el peso total de almendra con cascara y dividiéndola entre las plantas cosechadas. Una muestra aleatoria de alrededor de 2kg se tomó para identificar el contenido de humedad (H_{Ff}) y el rendimiento (ratio peso de pepita/ peso de almendra con cáscara, R_k). Así, una submuestra de 1.0 kg fue secada a 65ºC hasta peso constante para determinar la humedad y poder transformar todas las muestras a humedad comercial (7%). R_k se obtiene de una submuestra de 100 frutos con cascara. Finalmente, el rendimiento total (Y_k) está afectado también por la densidad de planta (Pd), obteniéndose como:

$$Y_k = P_p \times H_{Ff} \times R_k \times P_d \quad (1)$$

2.5. Analisis estadistico

Se realiza un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de los tratamientos hídricos sobre el crecimiento del almendro (diámetro horizontal y altura de planta), estado hídrico de la planta, parámetros fisiológicos (A, g_{sw} y WUE) y rendimiento comercial. Los niveles de significancia son: $p > 0.05$ no significativo, $0.01 < p < 0.05$ significativo y $p < 0.01$ muy significativo. Se usa el Test de Duncan como test de separación de medias.

3. Resultados y discusión

3.1. Programacion de riegos.

La cantidad de agua de riego aplicada a cada tratamiento durante el primer año de ensayo varió entre 231 mm y 122 mm para T1 y T3 respectivamente (Tabla 1) lo que supone respectivamente un 34% más y un 29% menos de lo recibido por T2. Las cantidades aplicadas fueron ligeramente superiores a las previstas ya que, pese a que la precipitación recibida durante las dos primeras etapas permitió satisfacer las necesidades del cultivo (ET_a/ET_c =1) (Tabla 2), la precipitación recibida durante las etapas III y IV fue marcadamente inferior a la media, por lo que la aportación de riego tuvo que aumentarse para no someter a las plantas a un estrés hídrico

excesivo durante dichas etapas (ET_a/ET_c < 1.00) (Tabla 2).Ya que la etapa IV (postcosecha) es una de las más sensibles al estrés hídrico [9,10], se corría el riesgo de producir un retraso en la rehidratación de la planta durante la postcosecha y causar también una pérdida de rendimiento en el siguiente año de crecimiento [5] .

De acuerdo con la metodología de cálculo, la ET_a global del cultivo ha oscilado entre 476 mm para T1 (13% más que T2 con 422 mm) y 372 mm para T3 (12% menor que T2) alcanzando los mayores niveles de déficit durante la Etapa III (Tabla 2). Durante la etapa de postcosecha, las lluvias y el riego han permitido recuperar los niveles de déficit en los 3 tratamientos, pero sin alcanzar las condiciones de confort hídrico (Tabla 2).

Tabla 18. Resultados de la programación de riego. Lluvia y riego.

Etapa	Inicio	Fin	Nº	ET_o (mm)	P (mm)	P_e (mm)	I (mm)			Agua total (P_e + I) (mm)		
							T1	T2	T3	T1	T2	T3
I	07/02/2022	28/03/2022	50	84	64	64	0	0	0	64	64	64
II	29/03/2022	07/05/2022	40	115	121	121	0	0	0	121	121	121
III	08/05/2022	02/09/2022	118	797	18	18	171	128	91	189	146	109
IV	03/09/2022	02/12/2022	91	275	50	50	60	45	31	110	95	81
Total			299	1271	253	253	231	173	122	484	426	375

Etapa I: Hinchado de yemas- Cuajado de fruto, Etapa II: Crecimiento del fruto, Etapa III: Llenado de la semilla, Etapa IV: Postcosecha. ET_o: Evapotranspiración de referencia, P: Lluvia, P_e: Precipitación efectiva, I: Riego bruto

Tabla 19: Evapotranspiración del cultivo y relaciones ET_a/ET_c. ET_a: Evapotranspiración actual, ET_c: Evapotranspiración del cultivo

Etapa	Inicio	Fin	ET_c (mm)	ET_a (mm)			ET_a/ET_c		
				T1	T2	T3	T1	T2	T3
I	07/02/2022	28/03/2022	55	55	55	55	1	1	1
II	29/03/2022	07/05/2022	88	88	88	88	1	1	1
III	08/05/2022	02/09/2022	691	235	194	158	0.34	0.28	0.23
IV	03/09/2022	02/12/2022	189	98	85	71	0.52	0.45	0.38
Total			1023	476	422	372	0.5	0.41	0.36

Etapa I: Hinchado de yemas- Cuajado de fruto, Etapa II: Crecimiento del fruto, Etapa III: Llenado de la semilla, Etapa IV: Postcosecha.

3.2. Crecimiento de cultivo, y medidas fisiologicas

En general, todos los tratamientos mostraron un desarrollo vegetativo similar, alcanzando las etapas fenológicas más importantes (hinchado de yemas, fin de la floración, inicio del crecimiento del fruto, inicio del llenado del fruto, cosecha y caída de hoja) en la misma fecha (Tabla 1). El crecimiento del cultivo fue homogéneo para los 3 tratamientos, sin diferencias significativas en cuanto a diámetro de copa y altura total de planta (Figura 1a. y 1b.). Ambas variables sufrieron un ligero incremento durante al final de la etapa de crecimiento del fruto estabilizándose durante la etapa de llenado de la semilla.

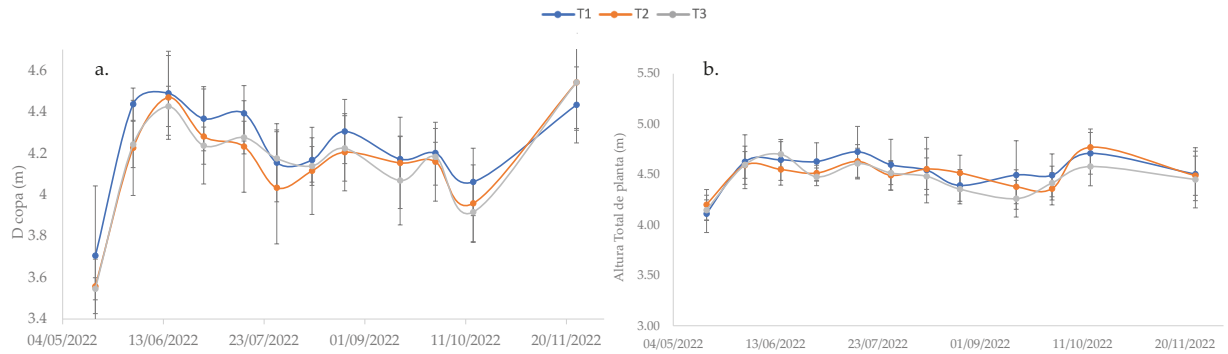


Figura 1. Evolución del diámetro de copa (a), altura total de planta (b), a lo largo de todas las medidas realizadas durante el ciclo de cultivo. Las barras de error vertical representan la desviación estándar para cada fecha y tratamiento.

Pese a las diferencias en cuanto a agua de riego aplicada entre los tratamientos (Tabla 1), las medidas de estado hídrico de la planta no mostraron diferencias significativas entre tratamientos hasta finales de junio (Fig. 2c.) motivado por las lluvias primaverales (185 mm entre febrero y abril) que llenaron las reservas del suelo y permitieron mantener los potenciales hídricos por encima de los -1.50 MPa considerado como buen estado hídrico de la planta (Fig. 2c.). Sin embargo, después de agotar las reservas del suelo se observa como el tratamiento más deficitario (T3) se separa significativamente del resto, alcanzando potenciales mucho más negativos (en torno a -2.40 MPa a finales de julio) lo que lo sitúa en un nivel de déficit severo (Ψ_{stem} < -1.80 MPa), mientras que el resto de tratamiento T1 y T2 se mantienen en un déficit moderado (-1.20 > Ψ_{stem} > -1.80 MPa; Fig.2c.). Conforme va avanzando el ciclo todos los tratamientos convergen hacia potenciales más negativos (en torno a -2.6 MPa) como consecuencia del agotamiento del agua en el suelo. Del mismo modo, durante la etapa de postcosecha (Etapa IV), debido a las lluvias y riego aplicado (Tabla 2) se observa una recuperación del estado hídrico de todas las plantas siendo este más rápido para el tratamiento menos deficitario (T1) (Fig. 2c.).

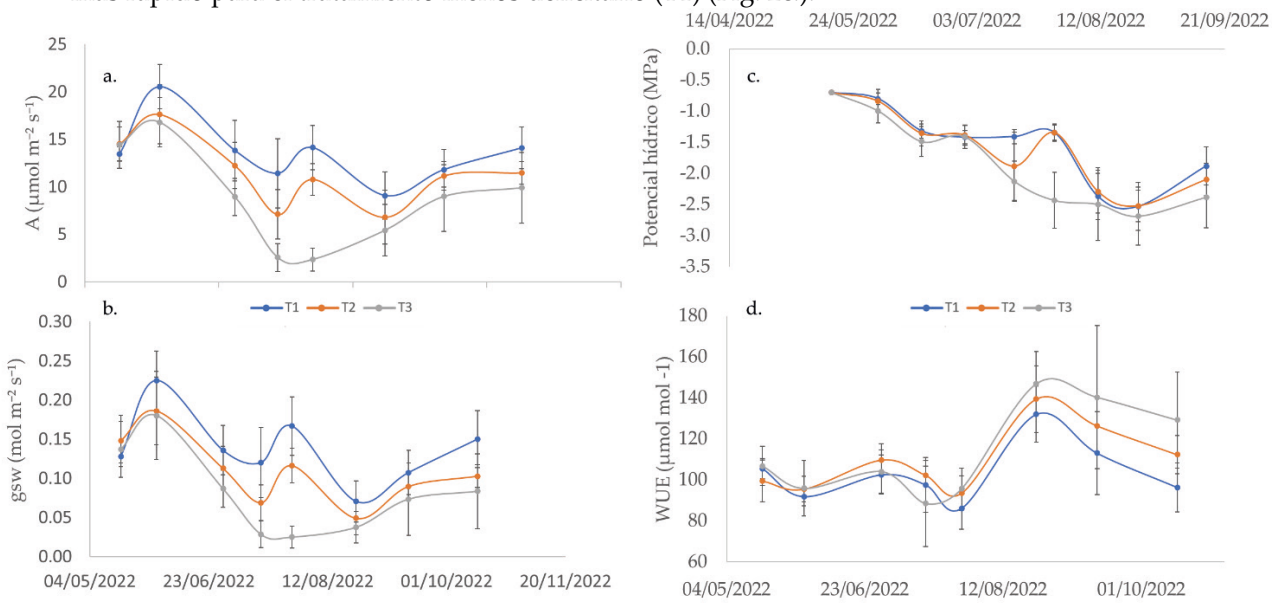


Figura 2: Evolución de los parámetros de Asimilación neta (A) (a.) y conductancia estomática (g_{sw}) (b.), potencial hídrico de tallo (c) y eficiencia en el uso del agua intrínseca (WUE) (d), a lo largo de todas las medidas realizadas durante el ciclo de cultivo. Las barras de error vertical representan la desviación estándar para cada fecha y tratamiento.

Las medidas fisiológicas de asimilación y conductancia estomática (A y g_{sw}) (Fig. 2a. y 2b.) confirman la tendencia mostrada por los potenciales hídricos donde el T3 presenta los valores más bajos como consecuencia del déficit hídrico al que se estaba sometiendo que provoco un menor intercambio gaseoso y por tanto una menor asimilación (Fig. 2a. y 2b.). Sin embargo, no se observan diferencias significativas en la eficiencia en el uso del agua intrínseca (Fig. 2d.) donde el tratamiento T3 muestra los valores más altos a finales de agosto 147 μmol mol $^{-1}$), cuando se alcanzaron los niveles más altos de déficit hídrico (Fig. 2c.). Esto quiere decir que la planta fija más carbono CO_2 (A) por molécula de agua evapotranspirada (g_{sw}) siendo más eficiente en el uso del agua.

3.3. Rendimiento

En general los rendimientos comerciales (7% de humedad) de pepita han sido de 398 kgha^{-1}, 425 kgha^{-1} y 360 kgha^{-1} para los tratamientos T1, T2 y T3 respectivamente, no mostrando diferencias significativas entre ellos. Estos rendimientos se consideran bajos respecto a los rendimientos que se obtienen en años donde la plantación no está afectada por heladas, los cuales rondan los 1500 kgha^{-1} usando toda la dotación disponible. Estos rendimientos obviamente han influido en las medidas fisiológicas realizadas al tratarse de árboles sin carga.

4. Conclusiones

Pese a las diferencias en las cantidades de riego aplicadas finalmente, respecto de las planteadas al inicio, los tratamientos T1 y T3 han mantenido los niveles hídricos establecidos en la metodología.

Estas diferencias no han ocasionado diferencias significativas en cuanto a crecimiento de la planta, sin embargo, fisiológicamente el tratamiento más deficitario (T3) ha entrado en déficit severo un mes antes que los tratamientos T1 y T2 que han mostrado un comportamiento similar, tanto en estado hídrico de la planta como en términos fisiológicos A, g_{sw}, WUE_i donde el T3 ha alcanzado los valores más altos.

Debido a la helada no se han observado diferencias en términos de producción, sin embargo, durante el siguiente año se está estudiando si estas diferencias fisiológicas observadas han afectado a la inducción floral de los árboles ya que en año de helada donde el árbol no tiene carga el T1 no ha mostrado diferencias fisiológicas con el T2 (aún más deficitario) por lo que la respuesta productiva del almendro será estudiada durante el siguiente año como continuación al presente trabajo.

5. Agradecimientos

Los autores querrían agradecer a la familia Sotoca Toboso por permitirles trabajar en su plantación de almendro. También quisieran agradecer el apoyo recibido desde la Comisión Europea y el programa PRIMA a través del proyecto “SUPROMED” (grant number: 1813) así como al gobierno de Castilla – La Mancha y la Unión Europea con el proyecto de investigación “PISATEL” (grant number: SBPLY/21/180501/000070). Agradecer también al programa “retención de talento” cofinanciado por la Union europea y el gobierno de Castilla – La Mancha con el proyecto “SIMA” (gran number: SBPLY/21/180501/000152) por el apoyo al trabajo del investigador F. Montoya. Finalmente agradecer al Ministerio de Universidades por el programa de Formación del Profesorado Universitario (FPU) que apoya el trabajo del investigador J.A. Martínez – López.

Referencias

1. CHG *Plan Hidrológico de Cuenca.Confederación Hidrográfica Del Guadiana.*; 2020;

2. CHJ *Plan Hidrológico de Cuenca. Confederación Hidrográfica Del Júcar.*; 2020;

3. Mañas, F.; López-Urrea, R.; López-Fuster, P.; Girona, J. RESPUESTA DEL ALMENDRO A DIFERENTES PROGRAMAS DE RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO. In Proceedings of the XXVI Congreso Nacional de Riegos, Asociación Española de Riegos y Drenajes; Huesca, 2008; pp. 37–38.

4. MAPA *Anuario de Estadística 2020. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.*; 2021;

5. García Tejero, I.F.; Moriana, A.; Rodríguez Pleguezuelo, C.R.; Durán Zuazo, V.H.; Egea, G. Sustainable Deficit-Irrigation Management in Almonds (Prunus Dulcis L.): Different Strategies to Assess the Crop Water Status. *Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment: Tools, Strategies, and Challenges for Woody Crops* **2018**, 271–298, doi:10.1016/B978-0-12-813164-0.00012-0.

6. Goldhamer, D.A.; Fereres, E. Establishing an Almond Water Production Function for California Using Long-Term Yield Response to Variable Irrigation. *Irrig Sci* **2017**, *35*, 169–179, doi:10.1007/s00271-016-0528-2.

7. Mirás-Avalos, J.M.; Gonzalez-Dugo, V.; García-Tejero, I.F.; López-Urrea, R.; Intrigliolo, D.S.; Egea, G. Quantitative Analysis of Almond Yield Response to Irrigation Regimes in Mediterranean Spain. *Agric Water Manag* **2023**, *279*, doi:10.1016/j.agwat.2023.108208.

8. Egea, G.; Nortes, P.A.; González-Real, M.M.; Baille, A.; Domingo, R. Agronomic Response and Water Productivity of Almond Trees under Contrasted Deficit Irrigation Regimes. *Agric Water Manag* **2010**, *97*, 171–181, doi:10.1016/j.agwat.2009.09.006.

9. Goldhamer, D.A.; Viveros, M.; Salinas, M. Regulated Deficit Irrigation in Almonds: Effects of Variations in Applied Water and Stress Timing on Yield and Yield Components. *Irrig Sci* **2006**, *24*, 101–114, doi:10.1007/s00271-005-0014-8.

10. Girona, J.; Mata, M.; Marsal, J. Regulated Deficit Irrigation during the Kernel-Filling Period and Optimal Irrigation Rates in Almond. *Agric Water Manag* **2005**, *75*, 152–167, doi:10.1016/j.agwat.2004.12.008.

11. Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Raes, D. Crop Yield Response to Water.

12. Conejero, W.; Ortuño, M.F.; Mellisho, C.D.; Torrecillas, A. Influence of Crop Load on Maximum Daily Trunk Shrinkage Reference Equations for Irrigation Scheduling of Early Maturing Peach Trees. *Agric Water Manag* **2010**, *97*, 333–338, doi:10.1016/J.AGWAT.2009.10.003.

13. Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R. Crop Load Affects Maximum Daily Trunk Shrinkage of Plum Trees. *Tree Physiol* **2006**, *27*, 89–96.

14. Naor, A.; Klein, I.; Doron, I.; Gal, Y.; Ben-David, Z.; Bravdo, B. The Effect of Irrigation and Crop Load on Stem Water Potential and Apple Fruit Size. *http://dx.doi.org/10.1080/14620316.1997.11515569* **2015**, *72*, 765–771, doi:10.1080/14620316.1997.11515569.

15. Naor, A.; Schneider, D.; Ben-Gal, A.; Zipori, I.; Dag, A.; Kerem, Z.; Birger, R.; Peres, M.; Gal, Y. The Effects of Crop Load and Irrigation Rate in the Oil Accumulation Stage on Oil Yield and Water Relations of "Koroneiki" Olives. *Irrig Sci* **2013**, *31*, 781–791, doi:10.1007/S00271-012-0363-Z.

16. Parra-Quezada, R.A.; Robinson, ¶ ; T L; Osborne, ; J; Parra-Bujanda, ; L B *EFECTO DE CARGA DE FRUTO Y DÉFICIT HÍDRICO EN LA CALIDAD Y PRODUCCIÓN DE MANZANA WATER DEFICIT AND CROP LOAD EFFECTS ON YIELD AND FRUIT QUALITY OF APPLE*; 2007;

17. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56*; 1998;

18. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J.L. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* **2005**, *131*, 2–13, doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2).

19. Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Raes, D. Crop Yield Response to Water.

20. Thomas, D. *Phenology Standard for Almonds. Shouth Australian Resarch & Development Institute PIRSA*; Adelaide, Australia, 218AD;



Adaptability of pitaya (*Hylocereus spp.*) to aquaponic production in the first stages of growth

Gina Patricia Suárez-Cáceres[1], Miguel Malia-Torrejón[2], Jackson A. Gross[3], Luis Pérez-Urrestarazu[1] and Víctor M. Fernández-Cabanás[2]

[1] Urban Greening and Biosystems Engineering research group. Area of Agro-Forestry Engineering. Universidad de Sevilla. ETSIA, Ctra. Utrera km.1, 41013. Seville. Spain; gscaceres@us.es; lperez@us.es
[2] Urban Greening and Biosystems Engineering Research Group, Departamento de Agronomía, Universidad de Sevilla, ETSIA, Ctra. Utrera km. 1, 41013 Seville, Spain; miguelmalia18@gmail.com, victorf@us.es
[3] Department of Animal Sciences, University of California, Davis, CA 95616, USA; jagross@ucdavis.edu

Abstract: Aquaponic production combines hydroponics and aquaculture in a symbiotic system. Highly profitable vegetables such as pitaya (*Hylocereus spp.*) could improve the economic viability of these farms, but little is known about its performance in aquaponic systems. Rooting and vegetative growth of cuttings of white-fleshed pitaya (*Hylocereus undatus*) and red-fleshed pitaya (*Hylocereus hybridum*) were evaluated in two types of aquaponic systems (Nutrient Film Technique-NFT and Media Bed-MB). A regular substrate culture system in pots was used as a control. The quality of water and environmental parameters were measured to evaluate their influence on plant development. The cultivation of pitaya in aquaponic systems proved to be possible. However, better performance in the first stages was obtained when the pots were used with a substrate and conventional fertigation. *Hylocereus hybridum* showed higher vegetative growth and earlier shoot and root emission in the control system, followed by the NFT and finally the MB. The water quality parameters did not have a significant effect on plant development, while the live weight of the fish increased in both systems.

Keywords: dragon fruit; aquaponics; hydroponics; circular economy

1. Introduction

Aquaponics is the combination of two production techniques: hydroponics, consisting of the production of plants in soilless culture media and aquaculture, focused on the production of aquatic animal species. It is identified as a sustainable agricultural approach that increases water efficiency (using less than 90% of water compared to conventional production) and reuses pollutants by transforming them into nutrients [1]. This is why this system is presented as an alternative production system based on circular economy.

Currently, the production of tropical crops, such as avocados (*Persea americana*), mangoes (*Mangifera indica*) and even pitaya (*Hylocereus spp.*), is being boosted in view of the high demand for this type of food in European markets. In countries in the Mediterranean region, there are opportunities for the introduction of new crops coming from warmer and less humid areas, such as dragon fruit. Pitaya production could be of great interest, not only because of its adaptation to Mediterranean conditions (temperature and rainfall), but also because of its high profitability, even in small farms [2]. Some farms have implemented soilless cultivation to promote crop health during vegetative propagation and even for pitaya production [3]. However, references in the scientific literature on vegetative multiplication and hydroponic production of pitaya are very scarce, and there are none for aquaponic production, which makes it difficult to determine its technical feasibility.

In order to assess the possibility of cultivating pitaya in aquaponic systems, the main objective of this work was to evaluate the speed of rooting and vegetative growth in the first

weeks of white-fleshed (*Hylocereus undatus*) and red-fleshed red pitaya (*Hylocereus hibridum*) cuttings in two aquaponic systems (Nutrient Film technique-NFT and Media Bed-MB), compared to a traditional substrate culture system used as control.

2. Materials and Methods

2.1. Location of the study and description of the system

This study was carried out for 6 months (May to November 2021) in one of the greenhouses (65 m² total area) at the School of Agricultural Engineering (ETSIA) of the University of Seville. Two small-scale aquaponic systems, built according to the guidelines of the FAO handbook [4], were compared with a control system consisting of pots with growth media and slow-release fertilizer. Each of the aquaponic systems (Figure 1) consisted of a fish production tank and two different hydroponic subsystems: Nutrient Film Technique (NFT) and media bed (MB).

The NFT system included a squared IBC (Intermediate Bulk Container) tank for fish with a capacity of 1000 L, and two other 200 L cylindrical tanks which acted as mechanical and biological filters, respectively. The biofilter tank was filled with 1600 bioballs (0.03 m in diameter) used as biological medium. Plants were introduced in 5 cm in diameter holes cut every 25 cm in five lines of 90 mm in diameter PVC pipes and 3 m in length.

In the MB system, in addition to the fish tank, 4 IBC sections (200 L) were used, 3 of which contained the prewashed lightweight expanded clay aggregate (LECA) for hydroponic production and biofiltration, and a fourth that operated as a sump tank. A 200 L cylindrical tank was used as a mechanical filter.

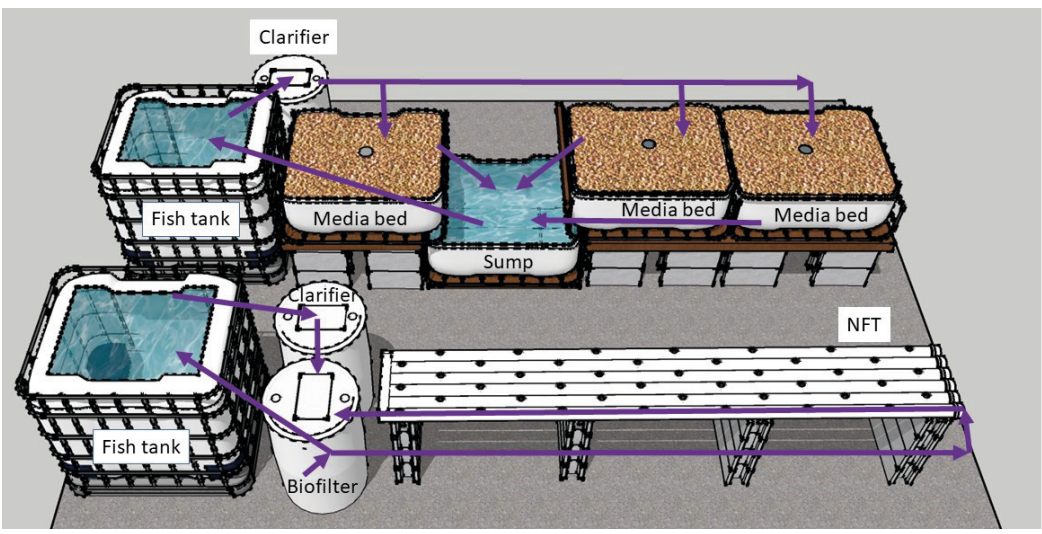


Figure 1. Schematic of the design and components of aquaponics systems. Arrows indicate water flow.

For the control system, 4 polyethylene trays were used, each containing 6 pots (0.15 x 0.12 x 0.19 m³), resulting in a total of 24 pots. The substrate used was 50% fine blond peat, 50% black peat (Projar Professional Seed Pro 5050). The pots were fertilized with slow-release osmocote (8.5 g/pot) with the following composition: 15.0 % N, 9.0 % P, 12.0 % K, 1.3 % Mg, 5.9 % S, 0.02% B, 0.05% Cu, 0.46 % Fe, 0.06 % Mn, 0.02 % Mo, and 0.05 % Zn.

2.2. Fish production in aquaponic systems

Twenty individuals of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) were introduced into the systems, resulting in an initial biomass of 18.24 kg and 18.36 kg in the NFT and MB, respectively. They were fed twice a day with 180 g of feed containing 32% protein and 6% fat. One fish died during

the study in the MB system. At the end of the trial, the fish from each system were weighed to compute total growth.

2.3. Plant production in three systems

The plants belonged to two pitaya cultivars (*Hylocereus* spp), the red cultivar with white flesh (*Hylocereus undatus*) and the red cultivar with red flesh (*Hylocereus hybridum*). 27 units of stems or cladodes, each about 60-70 cm long, were provided by the IFAPA "La Mojonera" center in Almería (Spain). 13 belonged to the red-fleshed cultivar and 14 to the white-fleshed cultivar. Three to four cuttings (15 cm long) were obtained per cladode[5]. 36 cuttings for each cultivar were placed on absorbent paper in a cool, dark place for 4 days, after which they were transplanted into the hydroponic subsystems. The cuttings of both varieties were randomly distributed in each of the three systems (NFT, MB and control), a total of 12 cuttings of each cultivar in each system, that is, 24 plants per system.

2.4. Operations carried out in the aquaponic systems

A HOBO data logger was placed in a central area of the greenhouse to record hourly temperature and relative humidity measurements. The care and recording of the growth of the shoots and roots of the pitaya cuttings was carried out by means of a weekly schedule.

At the beginning of the trial, operations with the plants were limited to checking the existence of any shoot or root emission in the NFT system, where the cuttings could be extracted without damaging the roots. In early June, a complete root measurement was taken for the three systems, taking into account the average diameter of the roots of each cutting and, if present, the length of the longest root. Regarding the growth of the shoots, a weekly record was made by measuring each of the cuttings of each system.

The water temperature and quality parameters in the fish tank were recorded weekly. pH was measured with a "Hanna" pH meter, electrical conductivity (EC) and salinity (NaCl) with a “Crimson" conductivity meter, and nitrate content with a photometrically operated electronic apparatus (Reflectoquant from Merk®) and test strips.

Depending on the results of the water analyses collected every week, potassium hydroxide and/or potassium carbonate were applied based on the pH of each system, which should not fall below 6. In addition, iron in the form of EDDHA was added to the water every 2 weeks to prevent possible iron deficiency in the plant material inherent to aquaponic systems [6].

2.5. Statistical analysis

The collected data were analysed with Statgraphics Centurion XVIII (Statistical Graphics Corp., Rockville, MD, USA, 2002). A variance check was performed using the Shapiro-Wilk (normality) and Levene (homoscedasticity) test. Where necessary, the data were transformed, and in cases where the ANOVA hypotheses of equality of variance were not met, non-parametric methods (Kruskall-Wallis) were used. Additionally, an LSD test was performed.

A General Linear Model (GLM) has been carried out in which the effect of the factors "Hydroponic System", "Cultivars" and the interaction of both factors on the vegetative growth of the plants has been considered as the dependent variable. GLM was also used to evaluate the precocity of appearance of shoots and roots, considering the effect of the factors "Hydroponic System", "Cultivar" and the interaction between both factors, applying the same tests of separation of means.

3. Results

During the study, temperatures inside the greenhouse ranged from 9.06 to 47.29 °C, with average daily values around 27 ºC, while relative humidity varied from 7.43 to 95.39 %, with average daily values around 54%.

In relation to water quality parameters, nitrate values varied between 18 and 201 mg L^{-1}. EC was maintained below 1 dS/m. pH values ranged from 4.3 to 9 in both systems. Due to the observed decreasing pH trend, an attempt was made to maintain neutral pH values by renewing the water when the analyses results were extreme and by adding KOH and $KHCO_3$ at the doses of 20 and 40g, respectively. Average water temperature ranged between 18.25 and 26.9 ºC during the study period.

Water quality resulted appropriate for tilapia growth, as can be inferred from fish biomass increase throughout the test period in both systems. The weight gain during the 190 days of the test was 6.8 kg and 6.54 for NFT and MB, respectively.

Figure 2 shows the vegetative growth in centimeters for each cultivar during the 184 days of the trial for each of the studied systems. A generalized root and stem soft rot was observed in the MB system 155 days after the start of the trial. All plants showing this symptomatology were found to belong to the red-fleshed cultivar and, after laboratory analysis, it was presumed that the cause could be Fusarium, so the affected plant material was immediately removed.

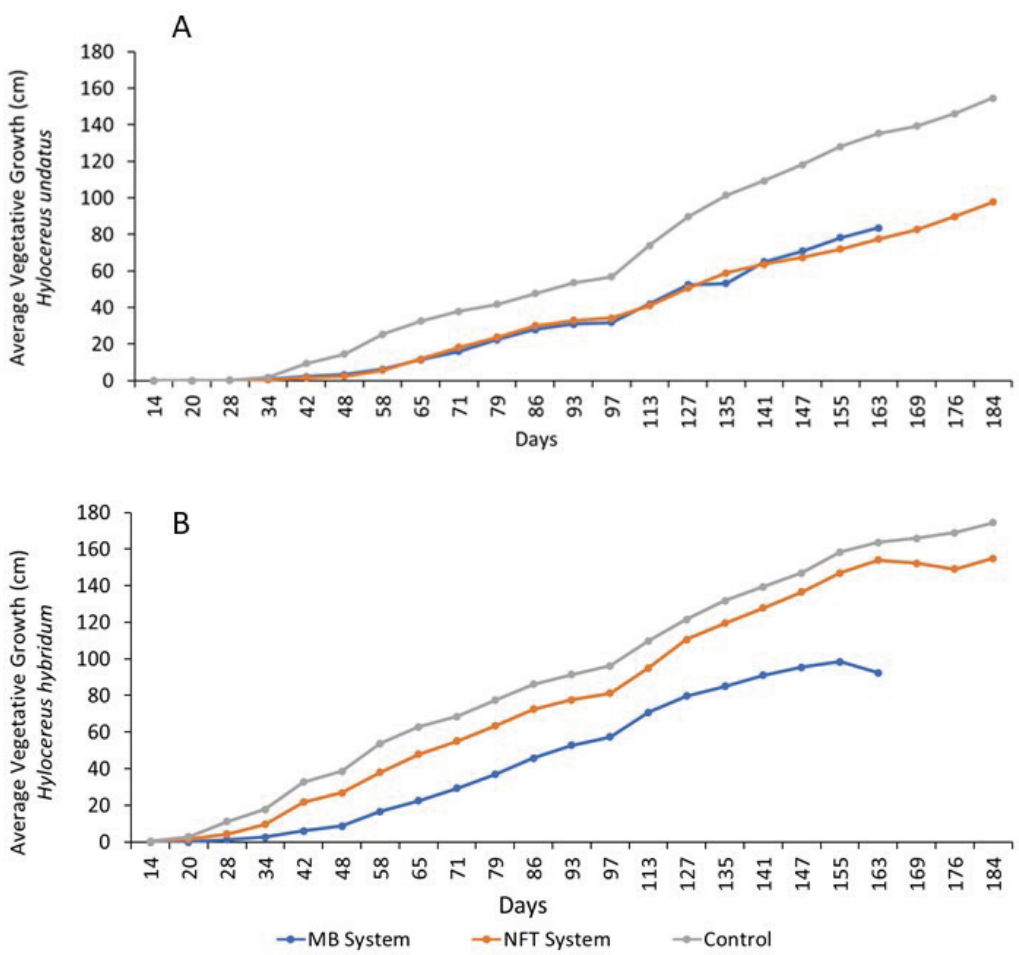


Figure 2. Evolution of vegetative growth (cm) of pitaya in MB, NFT and control for (A) White-fleshed cultivar (*Hylocereus undatus*) and (B) Red-fleshed cultivar (*Hylocereus hybridum*).

The interaction of the system and the cultivar (SxC) was significant (p<0.001), both factors were simultaneously considered in the statistical analysis. These results confirm that the

cultivation system in which the pitaya species are grown will influence its vegetative development.

Table 1. Analysis of variance of vegetative growth of pitaya for each cultivar system and variety studied.

Factor	Degree of freedom	Mean square	F-value
System (S)	2	231296	97.11***
Cultivar (C)	1	299615	125.80***
SxC	2	56089.8	23.55***
Error	1866	2381.73	

Where: *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001.

The system that showed the best results for both cultivars was the control, while a lower vegetative growth rate was observed in both aquaponic systems. For the white-fleshed cultivar, both MB and NFT performed similarly. In the case of the red-fleshed one, NFT was closer to Control but the growth rate was clearly worse in MB.

The precocity in the emission of shoots, measured as the number of days elapsed until the appearance of the first sprout, is shown in Table 2. The red pitaya with red pulp showed much higher precocity than the one with white pulp. The highest earliness was found in Control, followed by the NFT and, lastly, the MB system.

Table 2. Earliness of pitaya sprout emission, in days, for each growing system and cultivar studied.

	System (S) (Mean ± EE)			Cultivar (V) (Mean ± EE)	
	Media-Bed (MB)	**NFT**	**Control**	**White-fleshed cultivar**	**Red-fleshed cultivar**
Precocity	48.8 ± 5.01 a	37.6 ± 3,82 ab	27.9 ± 2.23 b	50.3 ± 3.40 a	25.9 ± 1.92 b

where: EE: Standard Error; Precocity: number of days, since the beginning of cultivation, that the first sprout takes to appear; Different letters (a, b) indicate significant differences (p<0.001).

Regarding root growth, the interaction of the system and the cultivar (SxC) was significant (Table 3). These results confirm that the cultivation system in which the pitaya is grown will influence its root development (p<0.05).

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) of pitaya root growth for each cropping system and cultivar studied.

Factor	Degree of freedom	Mean square	F-value
System (S)	2	64.0096	10.72***
Cultivar (V)	1	0.055556	0.01 n.s.
SxV	2	20.9907	3.52*
Error	66	5.96831	

Where: n.s.: Statistically not significant (p>0,05); *p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001.

4. Discussion

One of the most outstanding issues in this study is the superiority of the parameters related to pitaya growth in the control system, in which a commercial substrate with a slow-release fertilizer was used. The results for the vegetative growth of both cultivars in the control system are in line with the reported by Panisson et al. [7], but are lower for the aquaponic systems.

Pitaya plants irrigated with water with a high salt content (5 dS/m) show a lower accumulation of photoassimilates, leading to a lower vegetative development [8]. Salt stress can also explain a lower number of shoot emergence in plants, due to the increase in NaCl concentration in the root system, affecting growth and formation of new organs [9]. However, in our experiment, the EC values in the aquaponic systems were kept below 1 dS/m, so a high salinity can be discarded as a possible cause. Conversely, high pH values might have produced some growth restrictions as Lezama et al. [10] recommend pH values between 5.3 and 6.7 for pitaya cultivation.

Another possible explanation could be related to the fact that, by maintaining a continuous and stable fertilization in the Control through the slow-release fertilizer provided at source, the plant responded more favorably. In this sense, Gonçalves et al. [11] evaluated the growth and production of pitaya according to different doses of fertilizer, concluding that this species has a high demand for potassium, which is almost double than that of nitrogen. In other works, it was also concluded that potassium is the macronutrient most required by pitaya [12]. Furthermore, when nitrogen is supplied to the plant under conditions of low potassium availability, there is a low efficiency of nitrogen use by the plant [11]. This may explain the lower vegetative growth obtained in both aquaponic systems, as despite the fact that nitrogen contents were high in these systems, they were deficient in potassium, and even if it was applied foliarly, it may not have been done in sufficient doses. Nevertheless, differences between control and NFT systems for red-fleshed cultivar were not so high.

It is also possible that the high irrigation frequencies applied in both aquaponic systems may have altered plant growth, as pitaya is a species that, due to the inherent characteristics of its metabolism, does not need frequent irrigation. In this sense, irrigation frequencies of 48-72 hours are recommended for this crop to obtain optimal development [13]. In fact, an optimal response in the development of pitaya plants has been obtained by applying an irrigation frequency of 3 days [14].

The results obtained on the precocity of shoot emission are in line with the results obtained in previous studies [15,16], where the red-fleshed pitaya showed a better multiplicative response than that of the yellow pitaya. Also, root growth resulted in values similar to those obtained by other authors [17]. The fact that aquaponic systems show lower root growth may be due to the nitrogen fertilization conditions of the water circulating in the aquaponic systems. There is a negative correlation between root growth and nitrogen fertilization content [11]. Due to the activity of the fish and the low initial vegetative development that hardly acted as a nitrogen sink in the early stages of the crop, the nitrogen concentration in the recirculating solution was very high and could have caused a decrease in pitaya root growth.

The MB system is the one with the worst root growth rates for both varieties. This may be due to limited aeration in the root zone inherent to the system, as reported in a study analyzing the delicate situation in terms of available oxygen to which the roots are subjected in different substrates, where the need for aeration of the root zone was determined for adequate root and, therefore, vegetative development [18].

5. Conclusions

Although pitaya cultivation in aquaponic systems proved to be possible, better performance was obtained in the first stages when pots were used with substrate and conventional fertigation. The NFT system has shown better results for vegetative growth, earliness in the emission of

shoots, and root growth than the MB during the evolution of the pitaya crop. In addition, a clear susceptibility to soft rot disease was observed for the red-fleshed cultivar in the MB system.

In terms of vegetative growth, the red fleshed pitaya cultivar showed the best performance results. For both cultivars, the best results regarding vegetative growth of the shoots were obtained in the control system, followed by the NFT and finally the MB system.

The earliness in the appearance of the first shoots of the pitaya cuttings was significantly higher for the red-fleshed cultivar, being the control system the one that showed the highest earliness in the emission of shoots for both cultivars. The rooting earliness of pitaya cuttings was also found to be superior in the red-fleshed pitaya cultivar.

It is necessary to establish future research goals related to the optimization of potassium and nitrogen fertilization of this crop in aquaponic systems, in order to know the physiological response of pitaya depending on the dose of fertilizer provided, as potassium deficiencies are intrinsic to this production systems.

References

1. Abusin, S.A.A.; Mandikiana, B.W. Towards Sustainable Food Production Systems in Qatar: Assessment of the Viability of Aquaponics. *Glob Food Sec* 2020, *25*, 100349.

2. Trivellini, A.; Lucchesini, M.; Ferrante, A.; Massa, D.; Orlando, M.; Incrocci, L.; Mensuali-Sodi, A. Pitaya, an Attractive Alternative Crop for Mediterranean Region. *Agronomy* **2020**, *10*, 1–19, doi:10.3390/agronomy10081065.

3. Mizrahi, Y. Thirty-One Years of Research and Development in the Cacti Pitaya in Israel. In Proceedings of the Workshop On Improving Pitaya Production and Marketing; Jiang, Y.L., Liu, P.C., Huang, P.H., Eds.; Kaohsiung, 2015; pp. 1–18.

4. Somerville, C.; Cohen, M.; Pantanella, E.; Stankus, A.; Lovatelli, A.; Food and Agriculture Organization of the United Nations *Small-Scale Aquaponic Food Production: Integrated Fish and Plant Farming*; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014; ISBN 9789251085332.

5. Montesinos, J.; Rodríguez-Larramendi, L.; Ortiz-Pérez, R.; Fonseca-Flores, M. de los A.; Ruíz, G.; Guevara-Hernández, F. Review Pitahaya (Hylocereus Spp .) a Fitogenetic Resource with an History and Future for the Dry Tropic of Mexico. *Cultivos tropicales* **2015**, *36*, 67–76.

6. Fernández-Cabanás, V.M.; Pérez-Urrestarazu, L.; Juárez, A.; Kaufman, N.T.; Gross, J.A. Comparative Analysis of Horizontal and Vertical Decoupled Aquaponic Systems for Basil Production and Effect of Light Supplementation by LED. *Agronomy* **2020**, *10*, doi:10.3390/agronomy10091414.

7. Panisson, D.; Marques, N.K.; Souza, F.B.M. de; Neto, J.C.M.; Freire, A.I.; Araújo, N.O. de; Melo, C.C.V.; Martins, A.D. Growth and Initial Development of Pitaya White (Hylocereus Undatus) and Red (Hylocereus Monacanthus) in the City of Araguaína-TO. *Research, Society and Development* **2021**, *10*, e401101421921–e401101421921, doi:10.33448/RSD-V10I14.21921.

8. de Sousa, G.G.; Sousa, S.B.; Pereira, A.C. da S.; Marques, V.B.; da Silva, M.L.G.; Lopes, J. da S. Effect of Saline Water and Shading on Dragon Fruit ('Pitaya') Seedling Growth. *Revista*

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental **2021**, *25*, 547–552, doi:10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V25N8P547-552.

9. Franco-Salazar, V.; Véliz, J.A. Effects of Salinity on Growth, Titratable Acidity and Chlorophyll Concentration in Opuntia Ficus-Indica (L.) Mill. *Nº* **2008**, *20*, 12–17.

10. Lezama, A.; Tapia, A.; Muños, G.; Zepeda, V. El Cultivo de La Pitahaya. Secretaria de Agricultura, Ganadería. *Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. México. Recuperado de https://www. academia. edu/30647517/El_cultivo_de_la_Pitahaya* **2009**.

11. Gonçalves, A.F.M.; Pinto, S.I. do C.; Corrêa, R.M. Pitaya (Hylocereus Undatus) Initial Growth in Function to NPK Fertilization. *Revista Agrogeoambiental* **2020**, *11*, doi:10.18406/2316-1817V11N420191370.

12. de Castro Lima, D.; Mendes, N.V.B.; de Medeiros Corrêa, M.C.; Taniguchi, C.A.K.; Queiroz, R.F.; Natale, W. Growth and Nutrient Accumulation in the Aerial Part of Red Pitaya (Hylocereus Sp.). *Rev Bras Frutic* **2019**, *41*, doi:10.1590/0100-29452019030.

13. da Cunha Guimarães, R.R.; de Oliveira Barradas, J.; da Silva, R.T.L.; Moreira, W.K.O.; de Souza, S.K.A. Growth of Pitaya Seedlings According to the Type of Substrate and the Frequency of Irrigation. *Revista Ceres* **2021**, *68*, 276–284, doi:10.1590/0034-737X202168040004.

14. Robson Moreira, A.; Ludmyla Barbosa De Souza, F.; Lima Da Silva, R.T.; Lima De Oliveira, R.L.; Dos, A.; Alonço, S.; Castro De Souza, L.; Carpes, D.P. Determinação Do Turno de Rega Para a Produção de Mudas de Pitaya Em Ambiente Protegido. *Tecno-Lógica* **2018**, *22*, 73–77.

15. Chu, Y.C.; Chang, J.C. Codification and Description of the Phenological Growth Stages of Red-Fleshed Pitaya (Hylocereus Polyrhizus) Using the Extended BBCH Scale- with Special Reference to Spines, Areole, and Flesh Color Development under Field Conditions. *Sci Hortic* **2022**, *293*, 110752, doi:10.1016/J.SCIENTA.2021.110752.

16. Suárez Román, R.S.; Caetano, C.M.; Ramírez, H. Multiplicación de Selenicereus Megalanthus (Pitahaya Amarilla) e Hylocereus Polyrhizus (Pitahaya Roja) Vía Organogénesis Somática. *Acta Agron* **2014**, *63*, 272–281, doi:10.15446/ACAG.V63N3.40980.

17. Bozkurt, T.; İnan, S.; Dündar, İ. Micropropagation of Different Pitaya Varieties. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences* **2020**, *13*, 39–46.

18. Galvão, E.C.; Ramos, J.D.; Pio, L.A.S.; Laredo, R.R.; Silva, F.O. dos R.; Miranda, J.M. de S. Substratos e Ácido Indol-3-Butírico Na Produção de Mudas de Pitaia Vermelha de Polpa Branca. *Revista Ceres* **2016**, *63*, 860–867, doi:10.1590/0034-737X201663060016.

Respuesta del pepino a recortes severos del riego antes de cosecha

Alomari-Mheidat, Munia[1], Martín-Palomo, María José[1,2], Sánchez-Piñero, Marta[1], Castro-Valdecantos, Pedro[1], Medina-Zurita, Noemi [1], Moriana, Alfonso[1,2], Corell, Mireia[1,2]

[1] Dpto de Agronomía, ETSIA, Universidad of Seville. Crta de Utrera Km 1. 41013 Sevilla (España)
[2] Unidad asociada al CSIC "Uso sostenible del suelo y el agua en la agricultura (Universidad de Sevilla-IRNAS)", Sevilla (España)

Abstract: Cucumber is a great water demand vegetable species. Deficit irrigation in this crop was difficult because growth and flowering were simultaneous. The aim of this work was to study the respond of yield to no irrigation period before harvest in Autumn and Spring cycle. The experiments were carried out in a non-heater greenhouse in Seville (Spain). Randomized block design of four repetitions and two treatments were performed (Control and Deficit). Control treatment were full irrigated. Deficit treatment withhold irrigation 15 days after transplanting in Autumn and 97 days after transplanting in Spring. Water relations suggested that water stress was moderate because no significant differences were found. But, vegetative growth was decreased significantly in Autumn cycle. No significant differences were found in yield between treatments in any of the cycles. But Deficit trended to lower values than Control. Such decrease was likely related with a reduction on the number of fruits but not in the weight which was almost equal.

Palabras clave: máximo 5 palabras clave no incluidas en el título

1. Introducción

Los recursos hídricos especialmente en zonas áridas y semi-áridas son cada vez más escasos. El cambio climático está favoreciendo el aumento de las necesidades por efecto del incremento de las temperaturas, lo que unido a periodos de sequía y la competencia de otros usos da lugar a que la disponibilidad de riego sea cada vez más escasa [1]. En estas condiciones, es imprescindible el manejo deficitario del riego, lo que supone someter a estrés hídrico al cultivo. El riego deficitario controlado se inició en cultivos leñosos y consiste en someter a condiciones de estrés hídrico a las plantas durante un periodo en el que la reducción de cosecha se vea poco afectado [2]. Sin embargo, en hortícolas este manejo está poco desarrollado por su mayor sensibilidad al estrés hídrico y por la dificultad de separar los estados fenológicos.

El pepino es un cultivo que tiene unas altas necesidades de agua y en el que es difícil separar diferentes estados fenológicos debido a que el crecimiento de la planta y su floración son coincidentes. La mayor parte de los ensayos de riego emplean estrategias de riego deficitario sostenido en el que el estrés hídrico es progresivo y habitualmente no se caracteriza [3, 4]. El estrés hídrico da lugar a disminuciones en el tamaño de la planta que no siempre van asociados a disminuciones en cosecha [5]. El efecto del estrés hídrico también se ha visto atenuado por el tipo de ciclo empleado. Algunos autores [6] describen mejores resultados en ciclos de otoño, sin diferencia entre tratamientos.

El objetivo del presente trabajo fue el establecer condiciones de estrés hídrico con una parada del riego en diferentes momentos fenológicos del cultivo en función del tipo de ciclo. El objetivo era comprobar que componentes de la cosecha se veían afectados y el grado de disminución del crecimiento.

2. Materiales y métodos

El experimento se realizó en dos ciclos de cultivo, en el año 2021, de septiembre a diciembre, y en 2022, de marzo a junio. Los cultivos se realizaron en un invernadero multitunel, sin calefacción, con ventilación lateral y cenital. Ubicado en los campos de practicas la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA) en Sevilla, España (37º 21' N, 5º 56'W, 33 m. a.s.l.). La transmisividad del plástico del invernadero fue del 75% de la radiación incidente. El suelo era de textura franco arcilloso (21,5% arena gruesa; 4,5% arena fina; 42,3% limo y 31,8% arcilla) con pH 8,11 (medido en agua) y 2,5% de materia orgánica. Las plantas del cultivar Shikito, pepino snack de BASF (Alemania), se obtuvieron mediante la siembra en semillero durante 14 días en un invernadero adyacente. El trasplante al suelo del invernadero se realizó cuando las plantas desarrollaron la segunda hoja verdadera. La densidad de plantación fue de 2 plantas por m^2. La separación entre líneas fue de 1 m y 0,5 m entre plantas. Se utilizó un sistema de riego por goteo con un gotero por planta, de 4 L h^{-1}. Las plantas de pepinos fueron entutoradas y podadas a un solo eje, eliminado los brotes secundarios que fueron apareciendo. El diseño estadístico fue de bloques al azar, con 4 repeticiones. Se aplicaron 2 tratamientos de riego:

- Control. Condiciones óptimas de riego. Se aplicó el 100% de necesidades potenciales de evapotranspiración del cultivo (ETc). El cálculo de la ETc se realizó según el método de Kc-ETo[7]. La ETo dentro del invernadero se calculó empleando un módelo de radiación exterior [8] (obtenida con la estación de La Rinconada de la red Agroclimatologica de Andalucía [9] y la transmisividad del invernadero, 75%).
- Riego Deficitario. Las plantas de este tratamiento se regaron como el tratamiento Control hasta un determinado momento en el que se suprimió el riego completamente hasta el final del experimento. En el ciclo de otoño de 2021, el riego se detuvo 15 días después de trasplante (DDT). En el ciclo de primavera se dejó de regar el 97 DDT.

El estado hídrico del cultivo se caracterizó con medidas de potencial hídrico en hoja y fotosíntesis neta. El potencial hídrico se midió al mediodía en una hoja soleada empleando una cámara de presión (Modelo 1000, PMS, USA). La fotosíntesis se midió en una hoja expandida y soleada con un analizador de gases por infrarrojos (CI-340,CID-BioScience, USA).

El desarrollo vegetativo de las plantas se estimó mediante la medida de la cobertura en vertical de una superficie de 2 m^2, con la aplicación canopeo (Universidad de Oklahoma State). Se realizaron dos fotografías del cultivo, a dos alturas, con una pantalla de 1x1m colocada detrás de la línea de plantas. El porcentaje de superficie cubierta se empleó como una medida del desarrollo del cultivo a lo largo del experimento.

Los frutos se cosecharon semanalmente, en función del tamaño comercial. La cosecha se realizó en las 7 plantas centrales de cada parcela. Se pesaron y contaron los frutos obtenidos en cada parcela para estimar el número de frutos por planta y el peso medio del fruto.

Los datos se analizaron con el programa SX 8 (Statistix, Analytical Software, USA) mediante un análisis de la varianza (ANOVA) con un nivel de significación $p<0.05$.

3. Resultados y discusión

La Figura 1 presenta la evolución del agua aplicada en cada uno de los tratamientos y ciclos presentados. La cantidad de agua aplicada fue sensiblemente inferior en el ciclo de otoño que en el de primavera. Las plantas Control recibieron 238 mm en el primero, incrementandose hasta los 314 mm en el segundo. En el ciclo de otoño, se detuvo el riego a partir del día 44 después de trasplante (DDT) en las plantas Control, mientras que en la Deficitarias se detuvo a partir del 15 DDT, cuando se consideró que el establecimiento del cultivo estaba garantizado. La cantidad total de agua que recibieron las plantas del tratamiento Deficitario fue de 40 mm, aproximadamente un 18% del Control. En el caso del ciclo de Primavera, el riego de las plantas Control se mantuvo

hasta el final del ciclo, 124 DDT, mientras que las plantas del tratamiento Deficitario dejaron de regarse a los 97 DDT. Hasta ese momento, 97 DDT, se mantuvo un riego identico al Control para asegurar un buen estableciento y crecimiento de las plantas. El total de agua qe recibieron las plantas Deficitarias fue de 148 mm, un 47% del tratamiento Control.

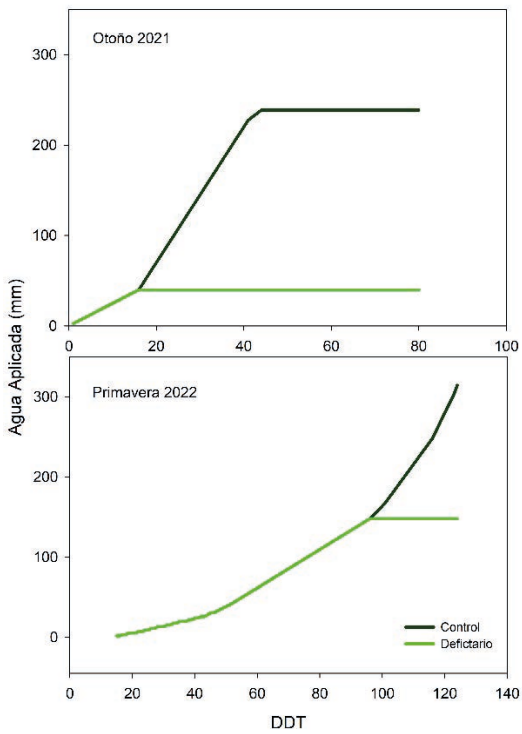


Figura 1. Evolución del agua aplicada en los ciclos de Otoño y Primavera.

La Figura 2 presenta la evolución del potencial hídrico medido al mediodía. El patrón estacional fue diferente entre ciclos debido a la evolución de la demanada evaporativa. En el ciclo de otoño, los valores de potencial hídrico se fueron haciendo más positivos con el trascurso del ensayo en ambos tratamientos. Solamente hubo diferencias significativas a los 42 DDT, en los que las plantas Control estuvieron alrededor de -0.4 MPa y las defcitarias en -06 MPa. Sin embrago, en la mayor parte de las fechas de medida los valores medios de potencial de las plantas del tratamiento deficitario estuvieron por debajo de las plantas Control, a excepción de la última fecha del ensayo. Los niveles de mayor estrés hídrico tuvieron lugar al inicio del ensayo, entre los 13 a 27 DDT en los que las plantas Deficitarias estuvieron cercanas a -1 MPa, mientras que las Control estaban alrededor de -0.8 MPa. El patrón de evolución fue a la inversa en el ciclo de primavera, en el que no hubo ninguna diferencia significativa. En este caso lo valores de potencial hídrico fueron casi identicos entre ambos tratamientos. Durante la mayor parte del ensayo las plantas estuvioeron alrededor de -0.6 MPa, disminuyendo de forma abrupta en las dos últimas fechas hasta valores de -1 MPa.

Las medidas de Fotosíntesis al mediodía tampoco presentaron diferencias entre tratamientos (Figura 3). En el ciclo de otoño, la tendencia de los dos tratamientos fue decreciente a medida que avanzó el experimento. Partiendo de valores máximos de 20 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ y finaliando entorno a 10 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. En ninguna medida se observaron diferencias que sugieran un nivel mayor de estrés hídrico en la plantas Deficitarias, ni siquiera a partir del corte del riego (20 DDT). Tampoco hubo diferencias significativas en el ciclo de Primavera, en el que la tendencia fue a la inversa. Los valores inicialmente fueron menores, alrededor de 15 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, y crecieron hasta alcanzar valores similares a los encontrados al incio del ciclo de otoño. En este caso los valores del

tratamiento Deficitario tendieron a ser algo inferiores al Control a lo largo del todo el experimento pero sin diferencias estadisticamente significativas.

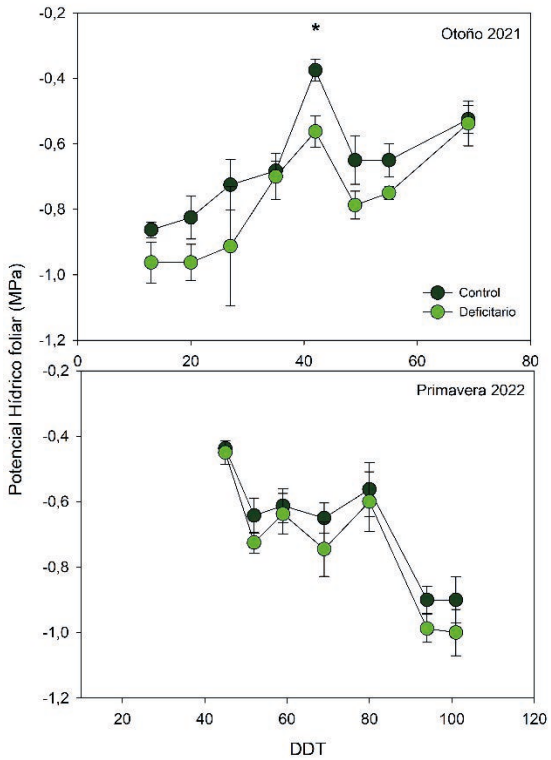


Figura 2. Evolución del potencial hídrico foliar medido al mediodía en el cilco de otoño y primavera. Cada punto es la media de 4 datos y las barras verticales representan el error estándar. El asterisco indica diferencias significativas en esa fecha ($p<0.05$, ANOVA).

El desarrollo de la planta, por el contrario, sí estuvo significativamente afectada durante el ciclo de otoño (Figura 4), aunque no en el de primavera. El desarrollo de la planta en el ciclo de otoño fue similar entre ambos tratamientos hasta los 25 DDT, a partir de esa fecha el tratamiento Deficitario presentó un menor porcentaje de cobertura. Aunque estas diferencias fueron significativas, las diferencias entre tratamientos fueron aproximadamente del 10%, con valores máximos en el Control, ligeramente superiorees al 50% y entorno al 40% en el Deficitario. El patrón de desarrollo fue similar en ambos, llegando a valores máximos alrededor de los 40 DDT. Esto probablemente se debió a que la altura de las plantas fue practicamente identica en valor y evolución estacional (datos no mostrados). La disminciónes observadas en ambos tratamientos alrededor del 60 DDT, que los hizo igualarse, estuvo relacionada con un deshojado, para mejorar la ventilación y evitar un avance de oidio en el cultivo. Por el contrario en el ciclo de primavera, las diferencias encontradas no fueron significativas. Durante este ciclo, el ensayo estuvo afectado por nematodos que restringió claramente el desarrollo de las plantas que sólo alcanzaron alrededor de un 30% de cobertura y crecieron mucho más lentamente. Los valores tendieron a ser menores en el tratamiento Deficitario, especialmente al final del ensayo cuando se alcanzó el máximo desarrollo. En este ciclo la altura de nuevo no presentó nigún tipo de diferencia (Datos no mostrados).

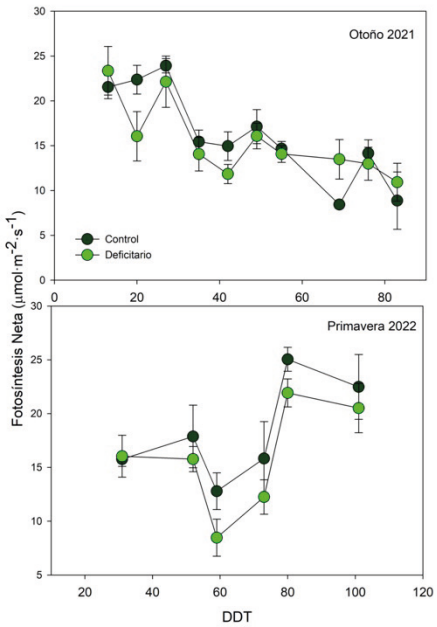


Figura 3. Evolución de la fotosíntesis neta a lo largo del experimento. Cada punto es la media de 4 datos y las barras verticales representan el error estándar. No hubo diferencias significaivas entre tratamientos.

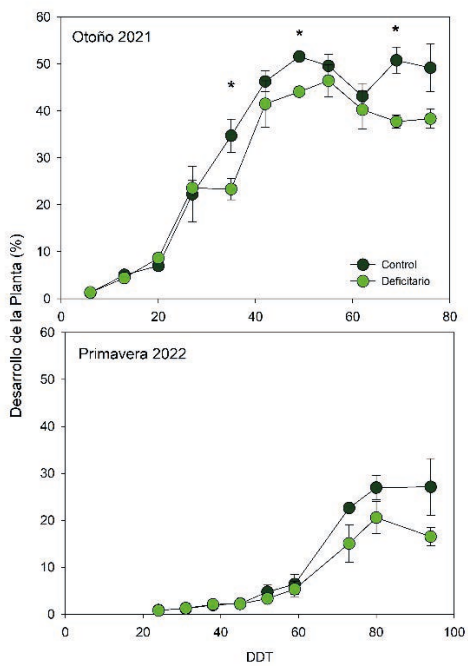


Figura 4. Evolución del desarrollo de la planta a lo largo de los dos ciclos del experimento. Cada punto es la media de 4 datos y las barras verticales representan el error estándar. Los asteriscos indican diferencias significativas en las fehas en las que aparacen ($p<0.05$, ANOVA).

El crecimiento es un proceso muy sensible a la falta de agua [10], más que las medidas de relaciones hídricas presentadas en las Figuras 2 y 3. El nivel de estrés hídrico, a tenor de los valores de potencial hídrico y fotosíntesis fue moderado. La falta de diferencias en estos parámetros, especialmente durante el otoño, estuvieron relacionadas con una baja demanda evaporativa que limitaría el uso de estos indicadores como herramienta de programación, como

han sugerido en tomate algunos autores [11]. El tipo de poda realizada, a un eje con eliminación de secundarios, sugiere que las diferencias en cobertura estuvieron relacionadas con un aumento de la superficie foliar, ya que ni el número de hojas ni la altura presentaron diferencias.

La producción acumulada presentó una evolución muy similar a la obtenida en la medidas de desarrollo de las plantas (Figura 4 vs Figura 5). En el ciclo de otoño se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos a los 62 y 69 DDT. Sin embargo, a partir de esas fechas la tendencia fue a mayores valores en Control que en Deficitario. Al final del ensayo, el tratamiento Deficitario tuvo un 22% menos de producción que el tratamiento Control. Aunque el inicio de cosecha en ambos tratamientos tuvo lugar en la misma fecha. En el ciclo de primavera no hubo diferencias significativas y la cosecha fue claramente inferior a la del ciclo de otoño, llegando sólo a unos 2.5 kg·planta^{-1} (un 62% del ciclo de Otoño). A pesar de no haber diferencias entre tratamientos, los valores de las plantas Deficitarias tendieron a ser menores que en el tratamiento Control. Al final del ensayo, esta reducción fue del 36%, superior a la medida en el ciclo de otoño.

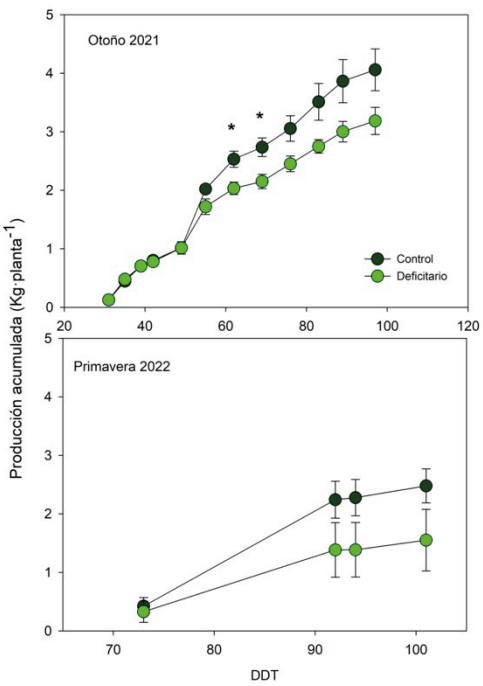


Figura 5. Evolución de la cosecha a lo largo del experimento. Cada punto es la media de 4 datos y las barras verticales representan el error estándar. Los asteriscos indican diferencias significativas en las fehas en las que aparacen ($p<0.05$, ANOVA).

Estas diferencias en producción estuvieron especialmente relacionadas con el número de frutos cosechados (Figura 6a). El número de frutos por planta sólo fue significativamente mayor en Control a los 55 DDT. Sin embargo, a partir de esa fecha, en casi todas la cosecha realizadas, el número de frutos por planta tendió a ser superior en Control que en Deficitario, especialmente al final del experimento. En el caso del ciclo de primavera, no hubo diferencias significativas en niguna de las tres fechas de cosecha. Aunque, de nuevo, los valores Control tendieron a ser ligeramente superiores. En nigún caso hubo diferencias significativas en el tamaño de los frutos cosechados, donde además los valores obtenidos fueron muy semejantes, en ambos ciclos (Figura 6b).

Las restricciones en el riego en ambos experimentos fueron elevadas (Figura 1) y muy restrictivas ya que no fue una reducción continua, como es habitual, sino una parada total. Sin embargo, las disminuciones en cosecha, incluso cuando fueron significativas (Figura 5) fueron

menores que las descritas habitualmente en la bibliografía. Disminuciones progresivas en el riego de aproximadamente el 20%, dieron lugar a pérdidas en cosecha de alrededor del 50 % [3, 4]. Esto pone en evidencia la importacia del nivel de estrés y el momento de aplicación en los cultivos, más que la cantidad de agua total. La estrategia de riego planteadas en el presente trabajo aseguraron, con una dosis restringida de riego, un crecimiento sufiente (Figura 4) que permitió una repercusión en cosecha pequeña. La falta de respuesta de la fotosíntesis y el potencial hídrico sugieren que el estrés fue muy moderado [12], especialmente en el ciclo de otoño. Una cuestión de gran interés es que, aparentemente, las disminuciones en cosecha estuvieron relacionadas con pérdidas en el número de frutos, más que con disminuciones en el tamaño (Figura 6). Otros autores han sugerido también que es este componente de la cosecha, el número de frutos, es el más afectado por el estrés hídrico [3,4, 6, 11]. Aunque en otros trabajos y cuando el estrés es más sevro, tambien se ve reducido el tamaño del fruto [3, 4, 5].

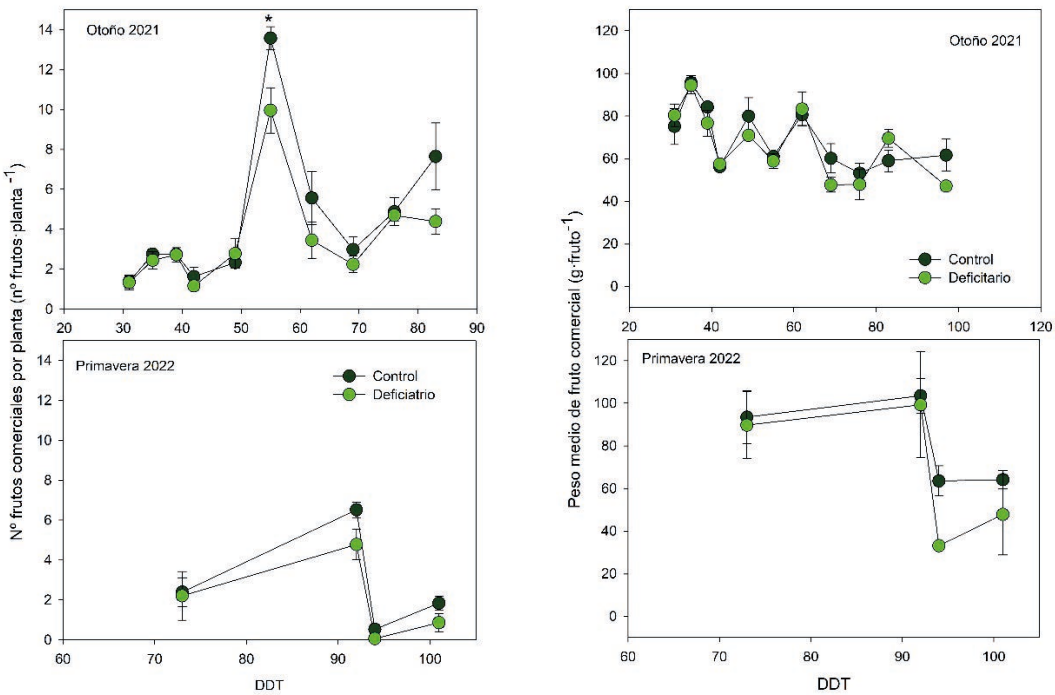


Figura 6. Evolución del número de frutos comerciales cosechados (a) y peso de frutos comerciales (b) a lo largo del experimento. Cada punto es la media de 4 datos y las barras verticales representan el error estándar. Los asteriscos indican diferencias significativas en las fehas en las que aparacen ($p<0.05$, ANOVA).

4. Conclusiones

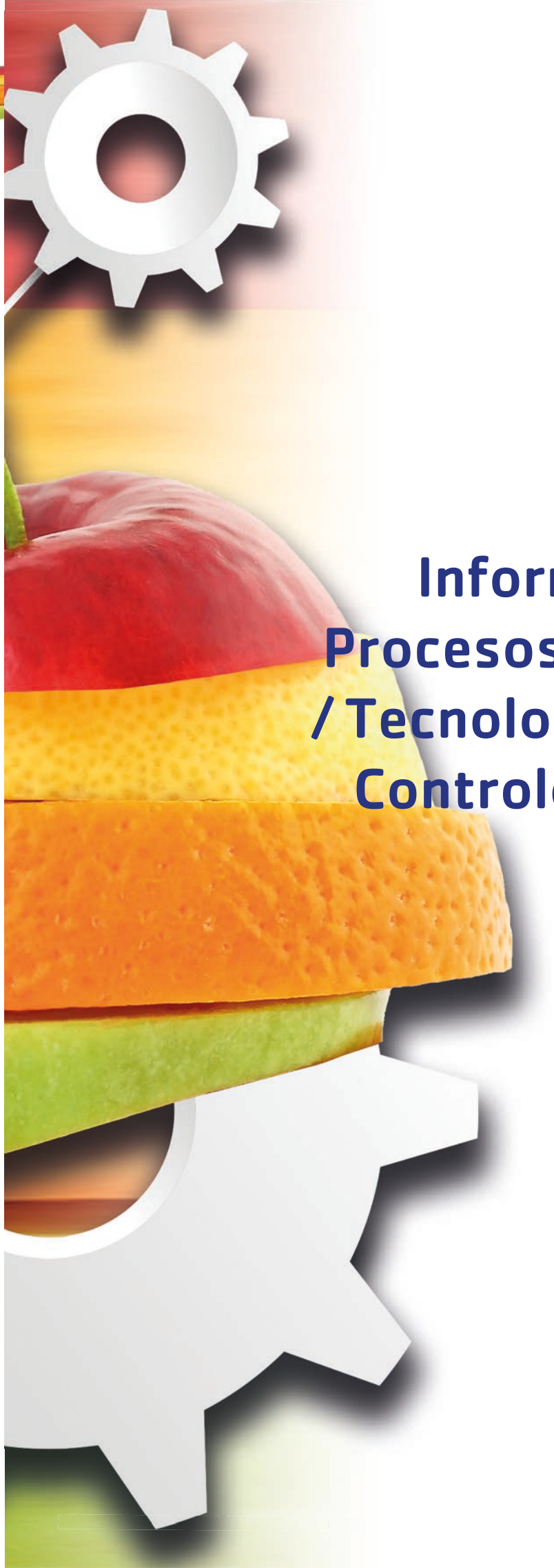
Las diferencias obtenidas en cosecha fueron pequeñas en comparación con el ahorro de agua que supuso el tratamiento Deficitario. La reducción en cosecha estuvo relacionada con una disminución moderada del crecimiento vegetativo que afectó al número de frutos, pero no a su tamaño. Esto supone que un control del estrés hídrico podría tener una muy baja repercusión en la calidad de los frutos y, por lo tanto, en los ingresos del agricultor.

5. Agradecimientos

Marta Sánchez-Piñero disfruta de un contrato predoctoral del VI plan propio de la Universidad de Sevilla.

Referencias

1. Fereres, E y Soriano, MA. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. J. Exp. Bot. 2007, 58, 147-159. https://doi.org/10.1093/jxb/erl165.
2. Chalmers, D.J.; Wilson, I.B. Productivity of peach trees: Tree growth and water stress in relation to fruit growth and assimilate demand. Ann. Bot. 1978, 42, 285-294. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a085459.
3. Wang, Z., Liu, Z., Zhang, Z., Liu, X. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China. Scientia Hort. 2009, 123, 51-57. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.07.020.
4. Zhang, HX, Chi, D, Wang, Q, Fang, J, Fang, X. Yield and quality response of cucumber to irrigation and nitrogen fertilization under subsurface drip irrigation in solar greenhouse. Agric. Sci. China, 2011, 10, 921-930. https://doi.org/10.1016/S1671-2927(11)60077-1.
5. Rahil, MH y Qanadillo, A. Effects of different irrigation regimes on yield and water use efficiency of cucumber crop. Agric. Water Mange. 2015, 148, 10-15. http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.005.
6. Abd El-Mageed, TA, Semida, WM, Taha, RS, Rady, MM. Effect of summer-fall deficit irrigation on morpho-physiological, anatomical resopnses, fruit yield and water use efficiency of cucumber under salt affected soil. Sientia Hortic. 2018, 237, 148-155. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.014
7. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. Publisher: FAO, Rome, Itlay, 1998, 300 pp.
8. Bonachela, S.; González, A.M.; Fernández, M.D. Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. Irrig. Sci. 2006, 25, 53-62.
9. SIAR. https://eportal.mapa.gob.es/websiar/SeleccionParametrosMap.aspx?dst=1. (accessed on 28 June 2023)
10. Hsiao, TC.. Measurements of plant water status. Chap. 9. In: Irrigation of agricultural crops. Agronomy Monograph, 30. Steward, B.A,; Nielsen, D.R., Eds. Publisher: American Society of Agronomy, Madison, USA, 1990, pp 243-279.
11. Parkash, V, Singh, S, Deb, SK, Ritchie, GL, Wallace, RW. Effect of deficit irrigation on physiology, plant growth and fruit yield of cucumber cultivars. Plant Stress, 2021, 1, 100004. https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100004
12. Melkonian, J., & Wolfe, D. W. Relative sensitivity of leaf elongation and stomatal conductance of cucumber plants to changes in leaf and soil water potentials. Canadian Journal of Plant Science. 1995, 75(4), 909-915.



Tecnología de la Información, Control de Procesos y Automatización / Tecnologia da Informação, Controlo e Automatização de Processos



Diseño y construcción de sensores de humedad de bajo coste para uso en riego: validación y comparación con sensores comerciales.

W. Giron-Erazo[1], A. Nole-Reyes[2], R. Ramón-Hurtado[1], D. Chamba-Zaragocin[1-3],

[1] Carrera de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Loja, Ecuador; e-mail: wilson.giron@unl.edu.ec; manuel.r.ramon@unl.edu.ec;

[2] Carrera de Ingeniería en Sistemas, Universidad Nacional de Loja, Ecuador; e-mail: alex.nole@unl.edu.ec;

[1-3] Carrera de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional de Loja, Ecuador, Universidad Politécnica de Madrid, España; e-mail: diego.f.chamba@unl.edu.ec, diego.chambaz@alumnos.upm.es

Abstract:

Soil moisture sensors are devices that allow for the real-time measurement of water present in the soil, making them valuable tools for optimizing irrigation and avoiding water waste in agriculture. This study aims to design, construct, and validate the accuracy of three prototypes of soil moisture sensors using low-cost materials, one of which functions as a moisture detector. The experiments were conducted at the Irrigation Laboratory of the National University of Loja, using a loam soil with a high content of organic matter. A calibration curve was created to validate and compare the accuracy of the sensor prototypes with a commercial sensor (Fc-28). The curve shows the values obtained from the sensor prototypes for different volumes of water gradually added. The second prototype showed the most optimal results, with a correlation of R^2 = 0.9274, compared to the commercial sensor which had a correlation of R^2 = 0.9614, suggesting that these sensors can improve irrigation management, reduce inappropriate water use, and increase agricultural production in regions with limited economic resources.

Palabras clave: Riego eficiente, prototipo, calibración de sensores, humedad de suelo, agricultura de precisión

1. Introducción

El agua es un insumo fundamental para la producción agrícola y desempeña un papel importante en la seguridad alimentaria [1]. En Ecuador, el riego agrícola representa el 82% del consumo total de agua en el país, mientras que el 12,3% se destina para uso doméstico y el 5,6% restante se utiliza para fines industriales [2]. Uno de los principales desafíos que enfrentan los agricultores debido al cambio climático es la escasez de agua, lo que afecta en la producción de alimentos [3]. Para lograr un uso eficiente del agua, se proponen los sistemas de riego localizado como alternativa, debido a la aplicación gradualmente de agua a las raíces de las plantas [4].

El manejo de riego se basa principalmente en el estado de humedad del suelo, el cual se puede medir mediante diferentes métodos. La medición precisa de la humedad del suelo es un indicador clave para determinar cuándo se debe aplicar agua [5] y establecer un balance hídrico adecuado en el suelo [6,7]. Por lo tanto, es importante estimar o conocer el contenido de humedad del suelo [8] para minimizar pérdidas de agua y regar en el momento adecuado según el clima y desarrollo del cultivo. Por ello, es importante que se promueva la capacitación, desarrollo y el acceso a estas herramientas con el fin de mejorar la producción agrícola. [9,10] Para esto, existen métodos indirectos de laboratorio como el gravimétrico y o métodos directos con el uso de sensores FDR, sensores de resistividad del suelo y sensores de matriz granular.

Considerando que la Smart Agro utiliza diversos métodos e instrumentos para lograr una agricultura de precisión. Uno de los instrumentos más utilizados son los sensores para controlar la humedad del suelo, lo que permite manejar con exactitud el tiempo y la cantidad de agua según las características del suelo, los requerimientos hídricos de los cultivos y las condiciones climáticas [11]. Sin embargo, la implementación de estos métodos a menudo implica costos elevados y su disponibilidad en el mercado local es limitada, lo que dificulta el uso por parte de los agricultores [12,13]. Por esta razón, el diseño y la elaboración de prototipos de sensores de bajo costo se convierte en una alternativa viable para los agricultores de escasos recursos económicos [14]. De esta manera, se puede facilitar la adopción de la Agricultura de Precisión y mejorar el manejo del riego, reducir el uso inadecuado de agua y aumentar la producción agrícola en estas regiones.

Por lo antes mencionado el objetivo de estudio se basó en el diseño, construcción y validación de la precisión de la medición de tres prototipos de sensores de humedad de los suelos de bajo coste, para ello se realizó pruebas de laboratorio en suelos para determinar la curva y la ecuación de correlación de los prototipos comparados con un sensor comercial (Fc-28).

2. Materiales y métodos

2.1. Localicación del área de estudio

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Riego de la Carrera de Ingeniería Agrícola de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja, situado en Sudamérica, al sur del Ecuador, provincia de Loja, a una altitud de 2144 msnm.

2.2. Materiales

Computadora, Cronometro, Prototipos de sensores, Sensor Fc-28, Esp-32, Pantalla LCD 20 x 4 I2C, Cables, Fuentes de alimentación externa, Protoboard.

2.3. Descripcion de los prototipos

Para el experimento se desarrollaron tres prototipos de sensor de humedad utilizando materiales de bajo costo:
Prototipo uno: se tomó como referencia el circuito eléctrico recomendado por [15], para construcción de un sensor de humedad de suelo con una sonda de material anticorrosivo.
Prototipo dos: se basó en el sensor de humedad Fc-28 y se recolectó un circuito eléctrico simplificado con una sonda de material corrosivo.
Prototipo tres: se basó en el lector de humedad del suelo, que es simplemente un detector de humedad o nivel de agua y se obtuvo como indicador cuando el suelo está húmedo [16].
Cada uno de los prototipos fue probado en el experimento y se evaluó su desempeño en la medición de la humedad del suelo.

2.4. Tipos de suelo de estudio.

Se tomó una muestra de suelo con textura franco y alto contenido de materia orgánica. La muestra fue secada al sol durante 48 horas y posteriormente se colocó en una maceta con una capacidad de un kilogramo para realizar las pruebas de humedad con los sensores, se realizaron tres repeticiones por cada sensor y por cada volumen de agua agregada de manera ascendente cada cinco minutos como muestra la Figura 1.



Figura 44. Suelo Orgánico secando en 48 horas

2.5. Determinacion de la curva de calibracion de los prototipos de sensores de humedad del suelo

Para la definición de la curva de calibración de los prototipos de sensores de humedad del suelo, se construyó un módulo que incluyó los prototipos y sensores comerciales (Fc-28). Además, se incorporó un medidor de temperatura y humedad ambiente (DHT-11) controlado por un microcontrolador (Esp-32), el cual produjo las lecturas de los sensores Fc-28 y DHT-11. Las lecturas obtenidas se visualizaron en una pantalla LCD tal como se muestra en la Figura 2.

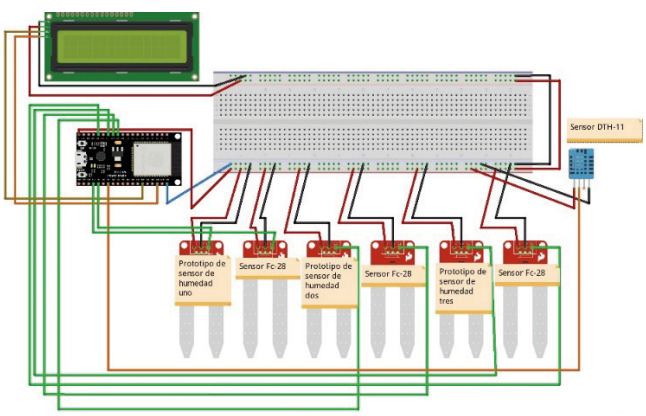


Figura 45. Módulo de los sensores de humedad y DHT-11

2.5.1 Cantidad de agua para aplicar al suelo

La cantidad de agua necesaria para aplicar al suelo se prolongará considerando que por cada kilogramo de suelo se agrega un litro de agua, lo que equivale al 100% de agua contenida en el suelo. En la Tabla 1 se indican las cantidades de agua requeridas para aplicar al suelo en diferentes porcentajes de humedad.

Tabla 20. Cantidad de agua para aplicar.

Porcentaje de agua(%)	Volumen de agua (ml)	Peso (kg)
0	0	0
5	50	0,05
10	100	0,1
15	150	0,15

20	200	0,2
25	250	0,25
30	300	0,30

3. Resultados y discusión

3.1. Descricion del material de los prototipos de los sensores.

La Tabla 2 muestra la descripción y característica de los tres diferentes prototipos de sensores construidos, cada uno consta de dos partes: una sonda y un circuito eléctrico. En la Figura 3 se observa la sonda, que es el elemento que se introduce en el suelo y permite la transferencia bidireccional de energía entre el suelo y el sensor, también se distingue el circuito eléctrico, que es el encargado de recibir y transmitir los datos al microprocesador.

Tabla 21. Descripción de los elementos de los prototipos de sensores de humedad del suelo.

Partes del sensor	Prototipo Uno (a)	Prototipo Dos (b)	Prototipo Tres (c)
Sondas	2 Varillas de cobre de 15 cm Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm2) de 300V con un largo de 35 cm	2 Varillas de acero inoxidable de 8,5 cm Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm2) de 300V con un largo de 35 cm	2 Varillas de acero de 10 cm Cable XT 2x20 AWG (0.52 mm2) de 300V con un largo de 35 cm
Circuito eléctrico	1 bombera de tornillo de dos contactos 1 fila de pines para tres contactos 1 resistencia de 10kΩ 1/4 W Sonda (Clavo de acero inoxidable) 1 capacitor cerámico de 0,1µF Soldadura de estaño. 1 baquelita (5 x 7cm)	1 bombera de tornillo de dos contactos 1 fila de pines para tres contactos 1 resistencia de 10kΩ 1/4 W Sonda (Clavo de acero inoxidable) 1 capacitor cerámico de 0,1µF Soldadura de estaño. 1 baquelita (5 x 7 cm) 1 LM393 1 Diodo led	1 bombera de tornillo de dos contactos 1 fila de pines para tres contactos 1 resistencia de 10kΩ 1/4 W Sonda (Clavo de acero inoxidable) Transistores 2N2222 Soldadura de estaño 1 baquelita (5 x 7 cm) 1 Diodo led

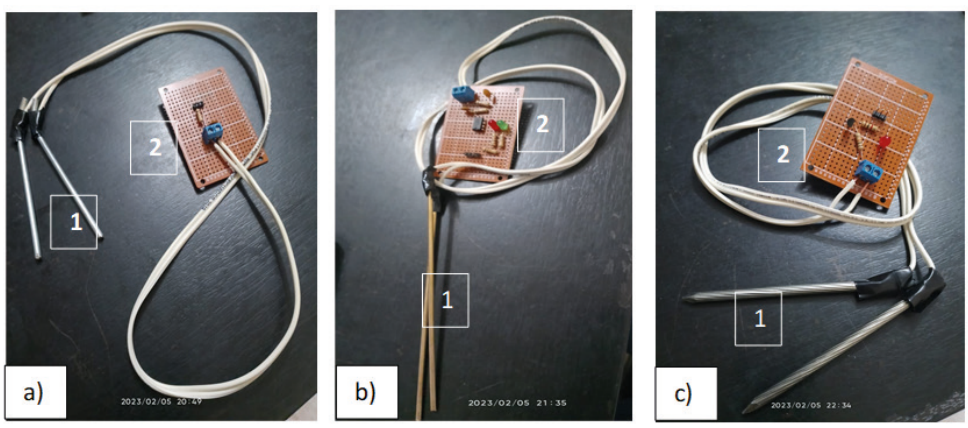


Figura 46. Prototipos contruidos previo a las pruebas. Nota: a) Prototipo uno; b) Prototipo dos; c) Prototipo tres; 1 Sonda, 2 Circuito eléctrico

El funcionamiento de los prototipos uno y dos arrojan datos similares, estos dan mediciones de la humedad de acuerdo con la variación de energía que transmite la sonda de suelo y es comunicada de manera bidireccional a la pantalla LCD y a su vez al ordenador por medio de IoT, en cambio el prototipo tres solo es un detector de humedad, lo que significa que da una señal de luminosidad de encendido cuando el suelo está al porcentaje de humedad requerido, por consiguiente este sensor podría ser recomendable solo para el momento de encendido y apagado del sistema riego, mientras que los otros dos sensores permitirían tener un mejor control de automatización, al dar valores más exactos del contenido de humedad y con ello, tomar decisiones de manera autónoma. Las medidas obtenidas de los dos prototipos son concernientes a un estudio realizado en diseños de sensores para medir la humedad de suelo, que se basaron en la medida real e imaginaria de su impedancia del circuito, encontrando que en este tipo de sensores funcionan correctamente en diferentes tipos de suelos, además la fabricación de su sonda no tienen mayores problemas de medidas en suelos salinos [14], al igual a los resultados encontrados en el presente estudio, donde tampoco hubo mayores complicaciones de medidas de diferentes tipos de suelo. Por otro lado, los prototipos uno y dos de los sensores son similares a estudios donde proponen un diseño de sensor FDR, aquí, sus componentes comunican en una vía de radio en un tiempo real para determinar el estado del suelo y del cultivo [10].

La Tabla 2 muestra que el prototipo uno tiene un circuito rectificador de tensión que consta de un capacitor cerámico y resistencia, a diferencia del prototipo dos que tiene un circuito oscilador donde integra en sus componentes un LM393. A diferencia de un proyecto desarrollado con un circuito eléctrico RLC (contiene un resistor, un inductor y un capacitor, conectados en serie o en paralelo), que es capaz de medir el porcentaje de humedad del suelo mediante la variación dieléctrico en el suelo [17], su funcionamiento se asemeja al fabricado, que cuando aumenta la humedad del suelo da una medida diferente y que las constitución de materiales son de bajo coste. Por otro lado, el prototipo dos propuesto tiene similitud al funcionamiento de un tipo de sensores construidos con materiales anti corrosivos, donde sus componentes se encuentran en un circuito divisor de tensión de voltaje, sus medidas las realiza mediante la variación de energía que aplica el sensor al suelo mojado, este tiene menos resistencia o hay menos tensión, pero cuando el suelo está seco hay más resistencia y más tensión [18]. Mientras que el tercer prototipo, tiene la funcionalidad parecida a un sensor detector de humedad para suelo, donde su función es de alertar que el suelo está mojado donde se inserta. Esto lo consigue a través de la resistencia eléctrica del suelo o la capacidad eléctrica del suelo [16]. También en un estudio de un prototipo de detector de humedad con transistores, obtuvieron que su prototipo se enciende cuando el suelo está húmedo y se apaga cuando está seco [19].

3.2. Curva de calibracion de los prototipos de sensores.

Para la validación de las medidas y la precisión con que miden los sensores, se desarrollaron experimentos en un suelo orgánico, donde se obtuvieron las mediciones de dos prototipos fabricados y comparados con los valores obtenidos por un sensor comercial de referencia, esto se realizó en Laboratorio. La Figura 4 representa los valores obtenidos de humedad de los prototipos de sensores para diferentes volúmenes de agua, que han sido agregados paulatinamente. El prototipo uno presenta una variación de medida a partir de 100 ml de agua, con una correlación de R^2= 0,9241. El prototipo dos muestra una variación de mediana a partir de 50 ml de agua, con una correlación de R^2= 0,9274. El sensor comercial (Fc-28) también tiene una variación a partir de 15 ml de agua, pero con una correlación mayor de R^2= 0,9614. La variación encontrada no es significante entre los prototipos, pero se debería considerar la temperatura y porcentaje de humedad del ambiente, también puede afectar la correcta instalación de los sensores en el

momento de realizar los ensayos. Así en un estudio similar, obtienen la curva de calibración con un modelo matemático de suelos con textura franco arenosas, mejorándose el valor obtenido por el sensor mediante un modelo de ajuste o de estimación resultado del proceso de calibración, pero tratando de controlar todas las variables externas y ensayando ambientes bien controlados [20]. Con esto es necesario mencionar que algunos modelos de estimación requieren de análisis físico de suelo donde sea instalado el sensor pero se tiene que considerar el punto ambiental. El prototipo tres solo funciona como detector de humedad y detecta la humedad en el suelo desde el primer volumen de agua, 20 ml. Los resultados muestran que el prototipo dos es el más óptimo por los que se puede recomendar para instalarlos en campo con características similares de suelo. Los prototipos aún se siguen evaluando para diferentes tipos de suelos y contenidos de humedad.

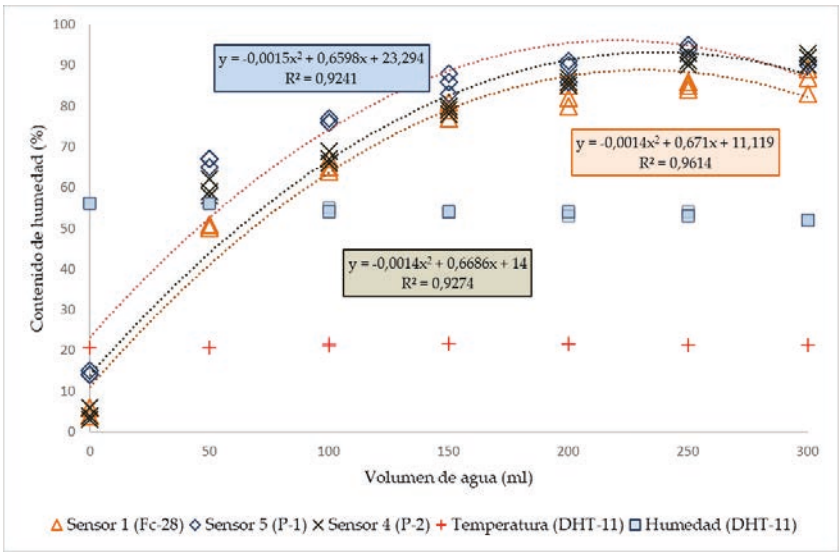


Figura 47. Curva de calibración de los prototipos de los sensores de humedad y sensor Fc-28

4. Conclusiones

Para el diseño, construcción y validación de sensores de humedad del suelo de bajo coste, se utilizaron materiales reciclables y accesibles. Se construyeron tres prototipos de sensores, cada uno con una sonda y un circuito eléctrico, que se validaron mediante la toma de medidas de humedad en el suelo, mediante la cual, se obtuvo la curva de calibración polinómica de categoría dos, no mostrando diferencia entre los prototipos construidos con el sensor comercial. Los sensores mostraron una buena respuesta y precisión para medir la humedad del suelo en diferentes condiciones, dando mejores resultados el prototipo dos, en suelo Franco con alto contenido de humedad, el mismo que podría implementarse a nivel de finca para manejo de riego automatizado. El tercer prototipo cumple la función de indicar cuando el suelo está húmedo, lo que facilitaría el momento de encender y apagar los sistemas de riego. El manejo de los prototipos sensores puede ser una alternativa económica y eficaz para la gestión del agua y el cultivo en la agricultura. Aún se están realizando más pruebas y calibraciones para diferentes clases texturales de suelos con el fin de validar su fiabilidad y aplicabilidad.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la carrera de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Loja por el soporte técnico hacia la ejecución del presente estudio.

Referencias

1. Banco Mundial, S. El agua en la agricultura. 2022 https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture
2. Zapatta, Alex & Gasselin, Pierre. El riego en Ecuador: problemática, debate y políticas. 2005, 01 (9-10)
3. CEPAL. (2011). Agricultura y cambio climático: instituciones, políticas e innovación. Seminarios y Conferencias. 2022, 65, (120). https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/7021/LCL3353s_es.pdf
4. Chamba Zaragocín, Diego Fernando (2020). Caracterización hidráulica del riego por goteo a partir de ensayos en ramales y unidades para su proyecto y gestión económica. Tesis (Doctoral), E.T.S. de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (UPM). https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.65540.
5. FAO: Guía de la FAO para la determinación de las necesidades hídricas de los cultivos. 2015, http://agriculturers.com/guia-de-la-fao-para-la-determinacion-de-las-necesidades-de-agua-de- los-cultivos/
6. Cornelissen, T.; Diekkrüger, T.; Bogena, H. Significance of scale and lower boundary condition in the 3D simulation of hydrological processes and soil moisture variability in a forested headwater catchment, Journal of hydrology. 2014, 516,(140–153)
7. Lin, G.; Wang, T.; Zheng, X. Assessing effects of soil hydraulic properties on the temporal stability of absolute soil moisture content and soil moisture anomaly under different climatic conditions. Environmental Earth Science. 2016, 75 (143-150).
8. Segovia-Cardozo, D. A., Franco, L., & Provenzano, G. Detecting crop water requirement indicators in irrigated agroecosystems from soil water content profiles: An application for a citrus orchard. Science of the Total Environment. 2022806, 150492. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150492
9. Quichimbo, P., Guamán, J., Cajamarca, M. Aguirre, A.. Evaluación del contenido de humedad del suelo por gravimetría y reflectometría. 2016, 4(0), (28–33). https://doi.org/10.36331/revista.v4i1.25
10. Caicedo-Rosero, L. C., Méndez-Ávila, F. J., Gutiérrez-Zeferino, E., & Flores-Cuautle, J. J. . (2021). Medición de humedad en suelos: Revisión de métodos y características. 0, 0(0), 1–8. https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7035
11. Flores-Medina, M., Flores-García, F., Velasco-Martínez, V., González-Cervantes, G., & Jurado-Zamarripa, F. (2015). Monitoreo de humedad en suelo a través de red inalámbrica de sensores. Tecnologia y Ciencias Del Agua, 6(5), 75–88.
12. Martínez, D. G. (2016). Diseño de Sensores de Humedad de Suelo Basados en Técncias de Feflectometría de la Frecuencia (FDR). In Universidad Politécnica de Cartagena.
13. Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2019). Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de humedad. AE496, 1–4. doi.org/10.32473/edis-ae496-2013
14. Magán, H., Vidal, S., Barriga, A., Ceballos-Cáceres, J., Linares-Barranco, B., Mora-Gutiérrez, J. M., & Ramos-Martos, J. (2001). Sensor de humedad del suelo de bajo coste para control de regadíos. Instituto de Microelectrónica de Sevilla. 2001, https://www.ina.gob.ar/archivos/pdf/CRA-IIIFERTI/CRA-RYD-30-Vita.pdf
15. Martin, L. (2020). Construcción de un sensor de humedad de suelo. https://www.automatismos-mdq.com.ar/blog/2020/11/construccion-de-un-sensor-de-humedad-de-suelo.html
16. Garcia, E. (2012). Detector humedad o nivel de agua. https://www.youtube.com/watch?v=wGNqUCyqbyY
17. Betancourth Castro, L. (2016). Sensor de humedad del suelo tipo sonda con sistema de monitoreo para aplicaciones en agricultura de precisión.
18. Santos, H. (2021). Curso de Arduino. Proyecto sensor de humedad del suelo anti corrosión. https://www.youtube.com/watch?v=GffsZsL_MsU

19. Martos-Arena, A. (2012). Diy detector humedad plantas. https://sites.google.com/site/arduinoreciclar/detector-humedad-plantas
20. Monterroso, H., & Chang, M. Calibracion De Sensores Para El Ajuste O Estimación De Humedad a Través Del Desarrollo De Metodología (Hg_Rcg). 2016.

Estimación de los niveles nutricionales de hojas de cítricos mediante análisis no destructivo aplicando técnicas de aprendizaje automático

Guillem Miralles[1], Isabel Rodríguez-Carretero[2], Sergio Cubero[3], Marcelino Martínez[1], Fernando Mateo[1], Ana Quiñones[2], José Blasco[3], Juan Gómez-Sanchís[1*]

[1] IDAL, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Valencia, Av. de la Universidad , S/N, 46100Burjassot, Valencia (Spain). Email: Juan.Gomez-Sanchis@uv.es
[2] Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), CV-315, km 10,7, 46113 Moncada (Valencia), Spain.
[3] Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), CV-315, km 10,7, Moncada (Valencia) 46113, Spain.

Abstract: One of the characteristics of all living beings is that adequate nutrition has a positive impact on health. In the case of plants, and specifically in fruit trees, adequate nutrition is also essential for them to grow healthy and produce fruits in the highest quantity and quality possible. Therefore, optimal nutrition is key for any farmer. However, excessive use of fertilisers can harm the environment and be a waste of resources for farmers. One of the keys to achieving adequate fertilisation is an accurate diagnosis of the nutritional status of the tree. Traditionally, this diagnosis is made by destructive ionomics analysis, which represents a high economic cost and a delay in obtaining the results. This work proposes Vis-NIR hyperspectral imaging and machine learning regression models to estimate the concentrations of macronutrients (N, P, K, and Ca) and micronutrients (Mn and Fe) in citrus leaves. The methodology involved the application of several machine learning regression methods (linear regression, partial least squares, random forest, support vector regression, and Ada Boost). Data were normalised with standard normal variable (SNV), and principal component analysis (PCA) was used to reduce dimensionality. The results were promising in estimating nutrients with R^2 greater than 0,50 in all cases, especially nitrogen (R^2 of 0.77).

Palabras clave: aprendizaje automático, imagen hiperespectral, espectroscopia, agricultura de precisión, cítricos

1. Introducción

La integración de las tecnologías de la información (TIC) en la agricultura ha optimizado la toma inteligente de decisiones basadas en datos, impulsando la productividad y minimizando el impacto ecológico de los procesos agrícolas [1]. Las plantas requieren nutrientes esenciales para crecer de manera saludable y proporcionar productos de calidad [2]. Por lo tanto, una nutrición óptima es clave para cualquier agricultor. Sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes puede dañar el medio ambiente y representar una pérdida de recursos para los agricultores [3]. Una de las claves para lograr una fertilización adecuada es un diagnóstico preciso del estado nutricional del árbol. Tradicionalmente, este diagnóstico se realiza mediante análisis destructivos de la ionómica, lo que representa un costo económico elevado y un retraso en la obtención de los resultados.

La imagen hiperespectral es una técnica que captura información en múltiples bandas del espectro electromagnético. Esto permite identificar y distinguir variaciones en la reflectancia o emisión de energía de los objetos en la escena relacionada con el estado de la planta, lo que es útil

para el análisis de los cultivos. Debido a su amplio rango espectral, las imágenes hiperespectrales pueden proporcionar información rápida sobre las propiedades bioquímicas de los cultivos, como la concentración de clorofila, contenido de humedad, estado vegetativo y contenido de nutrientes. Esto facilita la monitorización del estado de los cultivos, la detección temprana de enfermedades o estreses y la optimización de los programas de riego y fertilización. Este trabajo propone el uso de imágenes hiperespectrales Vis-NIR y modelos de regresión de aprendizaje automático para estimar las concentraciones de macronutrientes (N, P, K y Ca) y micronutrientes (Mn y Fe) en hojas de cítricos, a partir de los datos obtenidos de las imágenes y modelos de regresión de aprendizaje automático.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño Experimental

El material vegetal procede de una parcela de cítricos en Almenara (Castellón) de la variedad Clemenules. En mayo de 2021, se tomaron muestras de 33 árboles, 3 muestras de 60 hojas en diferentes orientaciones: este, oeste y cenital. De cada orientación, se seleccionaron 30 hojas jóvenes (brotación de primavera) y 30 de hojas viejas, con un total de 5940 hojas. De cada muestra, se destinaron 22 hojas para la obtención de los niveles de referencia de nutrientes mediante un análisis de la ionómica foliar y otras 8 se utilizaron para adquirir imágenes hiperespectrales. Debido a su diferente tamaño, en el caso de las hojas viejas, se tomaron 2 imágenes en grupos de 4 hojas; y en las jóvenes, una sola imagen de las 8. Así, se obtuvieron 3 imágenes hiperespectrales por árbol y orientación: hojas jóvenes, primera partición de hojas viejas y segunda partición de hojas viejas. El proceso se describe en la siguiente Figura 1.

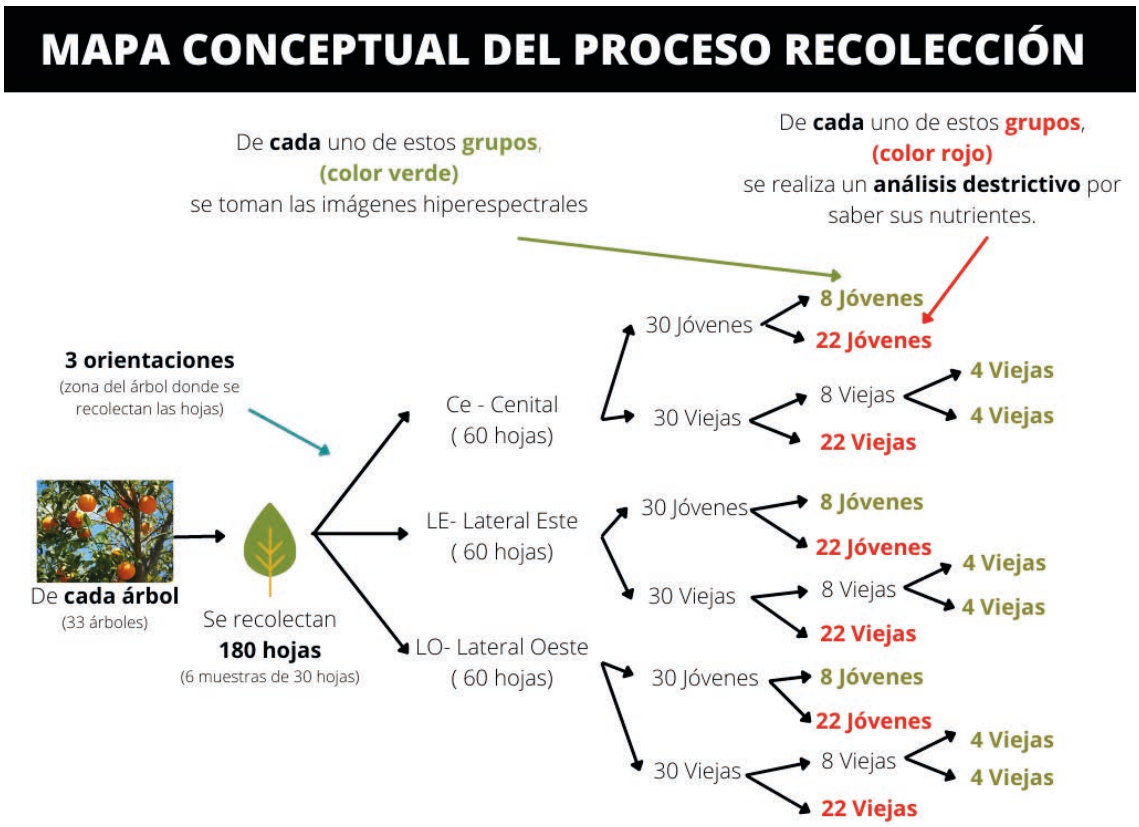


Figura 1. Esquema del proceso de recolección de datos hiperespectrales y nutricionales.

2.2. Toma y procesado de imágenes

Se utilizó un sistema de adquisición de imágenes hiperespectrales en el rango Vis-NIR, consistente en una cámara industrial y dos filtros sintonizables de cristal líquido (LCTF). Se capturaron imágenes de 1392 x 1040 píxeles con una resolución espacial de 0,14 mm/píxel en el rango espectral de 400 nm a 1050 nm, en pasos de 10 nm. Cada imagen se componía de 65 bandas.

Se utilizó un sistema basado en iluminación halógena difusa, compuesto por 12 lámparas halógenas de 35 W situadas dentro de una campana semiesférica. Para evitar problemas de imágenes borrosas debido a la dispersión cromática de la lente, se estableció el enfoque de la misma en la longitud de onda central (730 nm) del rango de trabajo. Se adquirió una imagen hiperspectral de un blanco de referencia certificada para optimizar el rango dinámico, evitar la saturación de la imagen y corregir la sensibilidad espectral del sistema.

Después de obtener las imágenes hiperespectrales, se realizaron tres etapas de procesamiento digital para extraer el espectro de cada hoja. Primero, se calibraron por referencia blanca y negra las imágenes registradas. Luego, se corrigió el desplazamiento espacial entre las imágenes. Debido a que las imágenes se obtuvieron con dos LCTF, existía una ligera variación entre ellas ocasionada por la geometría del sistema. Finalmente, se segmentó la hoja del resto de la escena mediante una máscara de umbralización y se obtuvo el espectro promedio de los píxeles de la hoja. Este espectro promedio constituyó la entrada a la etapa de preprocesado espectral y aprendizaje automático. La metodología de preprocesado se detalla en Fazari et al. [4].

2.3. Conjuntos de calibración y prueba, preprocesado espectral e ingeniería de características.

Para evaluar el rendimiento de los modelos de regresión, el conjunto inicial se dividió en un conjunto de calibración (Cal) (75 %) y un conjunto de prueba independiente (Test) (25 %). Se realizo un preporcesado espectral simple. En particular, se normalizaron las bandas espectrales estandarizándolas con el fin de uniformizar el rango de variación de las mismas. El método empleado fue standard normal variate (SNV) [5]. También se exploró una opción simple de ingeniería de características (ICR) usando el análisis de componentes principales (PCA) [6]. Se evaluaron modelos de regresión empleando como entrada diferente número de componentes principales (5, 7, 9, 12, 15, 18, 20, 25 y 30, estos números se determinaron de forma empírica hasta no conseguir mejora en el rendimiento de los métodos de regresión) y con todas las bandas sin aplicar PCA.

2.4. Modelos

En este estudio, se utilizaron cinco técnicas de regresión del campo del aprendizaje automático entre los que se incluyen la Regresión Lineal, partial least squares (PLS), support vector regression (SVR), Random Forest y Ada Boost. Todos ellos se implementaron en el lenguaje de programación Python con la ayuda de la librería Scikit-learn.

- **Regresión Lineal**, se usó como método de referencia para comparar con las otras técnicas empleadas en el trabajo. Basa su funcionamiento en suponer una relación lineal entre las variables independientes y la variable dependiente, su principal ventaja radica en la interpretabilidad del modelo [7].
- **PLS**, es un método de regresión especialmente indicado cuando las variables de entrada del problema están altamente correlacionadas. El método permite modelizar el problema reduciendo el conjunto de variables a un conjunto más pequeño de componentes no correlacionados [8].
- **SVR**, es una técnica basada en las máquinas de vectores de soporte. Esta técnica de regresión es capaz de gestionar relacionales no lineales entre las variables entrada y la

variable independiente del problema, proporcionando una solución robusta frente a posibles *outliers* [9].

- ***Random Forest***, es un método de regresión basado en la combinación (*ensemble methods*) de árboles de decisión. Se caracteriza por agregar múltiples soluciones para mejorar la predicción y la robustez de la solución [10].
- ***Ada Boost*** es un método de regresión basado en *boosting* que se basa en la idea de crear un modelo fuerte a partir de varios modelos débiles [11].

2.5. Construcción de los modelos.

Para garantizar una correcta construcción de los modelos, se empleó el conjunto de calibración. Con el fin de evitar el sobreajuste de los modelos y conseguir una combinación óptima de hiperparámetros en la fase de entrenamiento, se adoptó un enfoque de validación cruzada *K-Fold* [12] con 3 subconjuntos (*folds)*. Se empleó técnica *Grid Search* [13] para conseguir una combinación adecuada de hiperparámetros. Los rangos de variación de los hiperparámetros (en aquellos modelos con hiperparámetros libres) escogidos de forma empírica para cada modelo fueron:

- **PLSRegression**: *n_components* [1-25], *scale* [False, True], *max_iter* [100-1000], *tol* [0,1-0,00001].
- **SVR**: *kernel ['linear', 'rbf', 'sigmoid'], gamma ['scale', 'auto'], C* [0,1-250], epsilon [0,1-0,00001].
- ***RandomForest***: *n_estimators* [5-500], *max_depth* [10, 50, 100, None], *min_samples*_split [2-10], *min_samples_leaf* [1-4], *max_features ['auto', 'sqrt', 'log2', None], bootstrap [True, False].*
- ***AdaBoost***: *n_estimators* [5-500], *learning_rate* [0,001-1], *loss ['linear', 'square', 'exponential'].*

3. Resultados y discusión

3.1 Macronutrientes.

La Tabla 1 muestra los resultados relativos a la estimación de los macronutrientes nitrógeno, fosforo, potasio y calcio. Se muestran diferentes índices de rendimiento de los modelos, en particular el coeficiente de determinación R^2, el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE), tanto en el conjunto de calibración como en el de prueba.

Se observa que, para el nitrógeno todos los modelos presentan una mejora respecto a la regresión lineal. Esta tendencia se va a mantener en todos los nutrientes incluidos en el estudio. La metodología basada en *Random Forest* empleando como entrada todas las bandas, presenta los mejores resultados en el conjunto de prueba para el nitrógeno (R^2 de 0,77). Respecto al fósforo, la metodología que proporciona mejores resultados es la combinación de *Ada Boost* empleando como entradas 18 componentes principales consiguiendo un coeficiente de determinación R^2 de 0,66. En relación con el potasio, la mejor metodología es SVR empleando 9 componentes principales con una R^2 de 0,61. Del mismo modo, *Ada Boost* con 20 componentes principales es la metodología que mejores resultados proporciona para el calcio con un valor de R^2 de 0,62. La capacidad de estimación de las mejores metodologías para todos los macronutrientes es buena, con valores del coeficiente de determinación por encima de 0,6 en todos los casos.

Las mejores metodologías de estimación extraídas del análisis del coeficiente de determinación para los macronutrientes se mantienen si se analizan los otros índices de rendimiento calculados. Así, si se examinan los valores de MAE y RMSE para cada macronutriente, se observa que los valores mínimos de los errores de estimación coinciden con los valores máximos de R^2. Esto pone de manifiesto la robustez de los resultados en cuanto a la estimación del rendimiento de los modelos.

Tabla 1. Resultados de los modelos para los macronutrientes N, P, K y Ca. La columna FE muestra la mejor opción de ingeniería de características (ICR), indicando el número de componentes principales (CP) o empleando todas las bandas (No). En negrita se muestra la mejor metodología para cada macronutriente en base al valor de R^2 en el conjunto de prueba.

	MODELO	ICR	R^2 Cal	MAE Cal	RMSE Cal	R^2 Test	MAE Test	RMSE Test
	LinearRegresion	5 CP	0,585	0,132	0,180	0,335	0,145	0,223
	PLSRegression	7 CP	0,724	0,120	0,149	0,726	0,112	0,143
N	SVR	No	0,792	0,102	0,129	0,677	0,122	0,155
	RandomForest	**No**	0,813	0,087	0,123	**0,772**	**0,102**	**0,130**
	AdaBoost	No	0,793	0,101	0,129	0,761	0,105	0,133
	LinearRegresion	5 CP	0,115	0,030	0,050	0,210	0,035	0,055
	PLSRegression	7 CP	0,667	0,021	0,032	0,604	0,025	0,038
P	SVR	9 CP	0,742	0,017	0,028	0,586	0,027	0,039
	RandomForest	12 CP	0,686	0,020	0,031	0,562	0,026	0,034
	AdaBoost	**18 CP**	0,700	0,020	0,030	**0,657**	**0,025**	**0,033**
	LinearRegresion	5 CP	0,482	0,195	0,274	0,268	0,257	0,331
	PLSRegression	5 CP	0,575	0,171	0,246	0,618	0,153	0,241
K	**SVR**	**9 CP**	0,623	0,144	0,232	**0,614**	**0,144**	**0,239**
	RandomForest	No	0,658	0,132	0,222	0,510	0,179	0,271
	AdaBoost	12 CP	0,596	0,156	0,241	0,597	0,167	0,246
	LinearRegresion	5 CP	0,340	0,724	1.214	0,528	0,791	1,123
	PLSRegression	7 CP	0,730	0,504	0,763	0,537	0,675	1,113
Ca	SVR	12CP	0,794	0,353	0,662	0,595	0,623	1,041
	RandomForest	No	0,747	0,399	0,732	0,533	0,693	1,118
	AdaBoost	**20 CP**	0,739	0,405	0,741	0,**620**	**0,612**	**1,008**

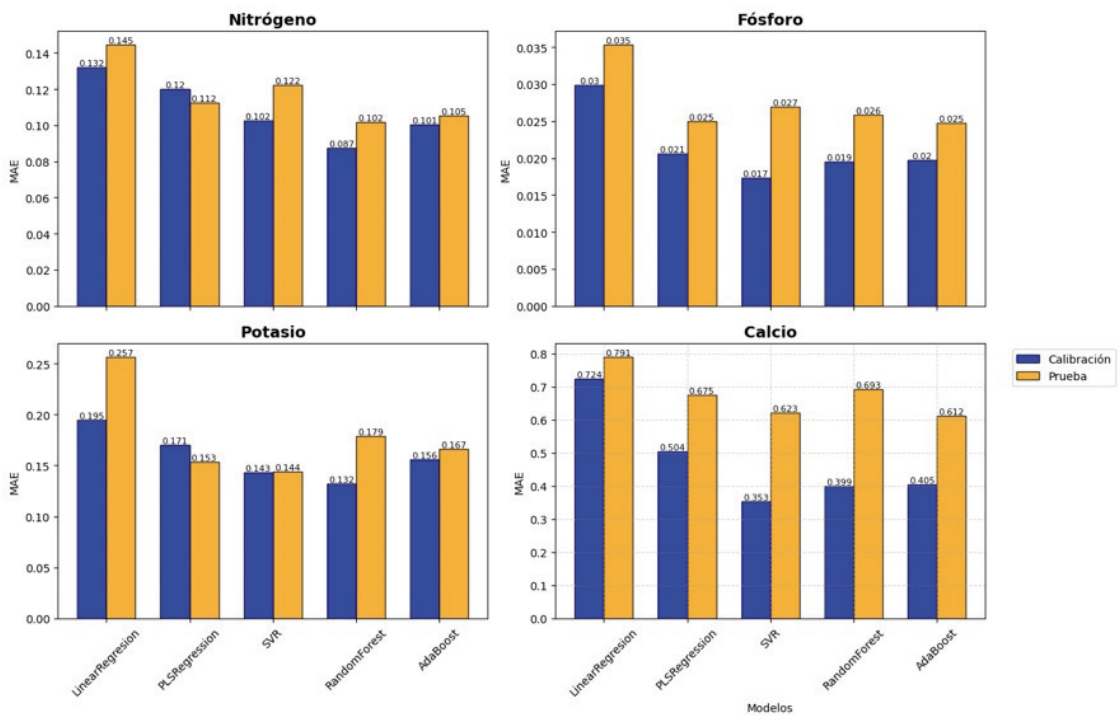


Figura 2. Comparación del R^2 obtenido calibración y prueba de los diferentes modelos que predicen los macronutrientes.

La figura 2 muestra, en un gráfico de barras, la comparación entre el MAE de los conjuntos de calibración y prueba para cada macronutriente con cada una de las metodologías empleadas. La pauta general es que el error producido en los conjuntos de calibración y prueba son muy similares (dentro de cada metodología). Este hecho pone de manifiesto que no ha habido sobreajuste en la construcción de los modelos y que la capacidad de generalización de los modelos es óptima.

3.2 Micronutrientes.

La Tabla 2 muestra los resultados relativos a la estimación de los micronutrientes manganeso, y hierro. Se muestran los mismos índices de rendimiento que en el caso de los macronutrientes. Se observa que, para el manganeso todos los modelos presentan una mejora respecto a la regresión lineal. Esta tendencia se mantiene también con el hierro. Las metodologías que mejores resultados proporcionan para el manganeso y el hierro son *Random Forest* y *Adaboost* respectivamente (R^2=0,57 y R^2=0,52). La capacidad de estimación de las mejores metodologías para los micronutrientes es menor que en el caso de los macronutrientes, no consiguiéndose valores del coeficiente de determinación mayores a 0,57 en el conjunto de prueba.

Al igual que en el caso de los macronutrientes, las mejores metodologías de estimación extraídas del análisis del coeficiente de determinación para los micronutrientes se mantienen si se analizan los otros índices de rendimiento calculados. Si se estudian los valores de MAE y RMSE para cada micronutriente, se observa que los valores mínimos de los errores de estimación coinciden con los valores máximos de R^2, esto pone de manifiesto la robustez de los resultados en cuanto a la estimación del rendimiento de los modelos.

Tabla 2. Resultados de los modelos para los micronutrientes Mn y Fe. La columna ICR muestra la mejor opción de ingeniería de características, indicando el el número de componentes principales (CP) o empleando todas las bandas (No). En negrita se muestra la mejor metodología para cada micronutriente en base al valor de R^2 en el conjunto de prueba.

	MODELO	ICR	R^2 Cal	MAE Cal	RMSE Cal	R^2 Test	MAE Test	RMSE Test
Mn	LinearRegresion	5 CP	0,331	4,838	6,081	0,277	5,384	8,321
	PLSRegression	5 CP	0,525	3,866	5,206	0,569	3,988	4,810
	SVR	5 CP	0,517	3,713	5,236	0,566	3,861	4,862
	RandomForest	**No**	0,535	3,777	5,174	**0,570**	**3,832**	**4,808**
	AdaBoost	No	0,543	3,671	5,130	0,391	4,463	5,718
Fe	LinearRegresion	5 CP	0,318	14,337	18,542	0,367	16,070	20,537
	PLSRegression	25 CP	0,410	12,990	17,359	0,465	15,590	18,876
	SVR	5 CP	0,430	12,518	17,089	0,371	14,989	20,479
	RandomForest	25 CP	0,511	12,351	15,816	0,496	14,675	18,326
	AdaBoost	**25 CP**	0,495	12,973	16,091	**0,518**	**14,298**	**17,917**

La figura 3 muestra la comparación entre el MAE de los conjuntos de calibración y prueba para cada micronutriente con cada una de las metodologías empleadas. Al igual que ocurría en el caso de los macronutrientes, los modelos no muestran sobreajuste ya que el error de calibración y test son muy similares.

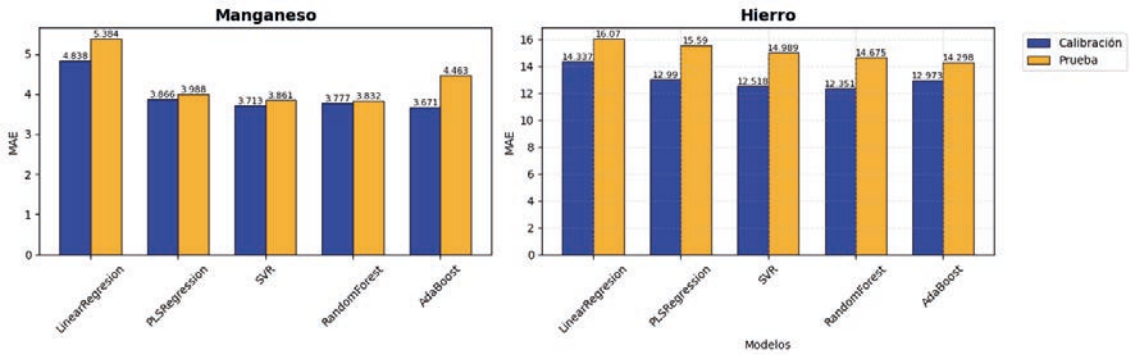


Figura 3. Comparación del R^2 calibración y prueba de los modelos que estiman el hierro y el manganeso.

4. Conclusiones

La metodología propuesta, basada en el uso de un sistema de visión hiperspectral Vis-NIR y técnicas de regresión de aprendizaje automático, permite estimar el contenido del nitrógeno con un R^2 de 0,77. Para el fósforo, potasio y calcio, se obtuvieron valores de R^2 de 0,66, 0,61 y 0,62 respectivamente. En el caso de los dos micronutrientes probados, manganeso y hierro, se obtuvieron valores de 0,57 y 0,51 respectivamente, lo que indica una mayor dificultad en su estimación.

La utilización del sistema de visión hiperspectral Vis-NIR y los modelos de regresión de aprendizaje automático se demuestran como una alternativa útil para estimar los niveles de nutrientes en las hojas de cítricos. Estos métodos ofrecen una solución no destructiva, más económica, rápida y precisa en comparación con las técnicas destructivas, costosas y lentas, cumpliendo así nuestro objetivo principal de eficiencia y reducción del impacto ambiental.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos TED2021-130117B-C31 y C33, financiados por MCIN/AEI/1 0,13039/501100011033 y por la UE "NextGenerationEU"/PRTR, y los proyectos GVA-IVIA 52203, 52204 y la UE a través del FEDER de la Generalitat Valenciana 2021-2027.

Referencias:

14. Geovanny Rambauth-Ibarra, "Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola", J. Comput. Electron. Sci.: Theory Appl., vol. 3 no. 1 pp. 34-38. January - June, 2022, doi: http://dx.doi.org/1 0,17981/cesta.03.01.2022.04
15. Petra Marschner , "Marschnner's Mineral Nutrition of Higher Plants", (3rd ed.), Elsevier, 2012, doi: https://doi.org/1 0,1016/C2009-0-63043-9
16. Jiao Chen, Shaoyu Lü, Zhe Zhang, Xuxia Zhao, Xinming Li, Piao Ning, Mingzhu Liu, "Environmentally friendly fertilisers: A review of materials used and their effects on the environment", Science of The Total Environment, Volumes 613–614, 2018, Pages 829-839, ISSN 0048-9697, doi: https://doi.org/1 0,1016/j.scitotenv.2017.09.186
17. Antonio Fazari, Oscar J. Pellicer-Valero, Juan Gómez-Sanchıs, Bruno Bernardi, Sergio Cubero, Souraya Benalia, Giuseppe Zimbalatti, Jose Blasco, "Application of deep convolutional neural networks for the detection of anthracnose in olives using VIS/NIR

hyperspectral images", Computers and Electronics in Agriculture, Volume 187, 2021, 106252, ISSN 0168-1699, doi: https://doi.org/1 0,1016/j.compag.2021.106252

18. Emily Grisanti, Maria Totska, Stefan Huber, Christina Krick Calderon, Monika Hohmann, Dominic Lingenfelser, Matthias Otto, "Dynamic Localized SNV, Peak SNV, and Partial Peak SNV: Novel Standardization Methods for Preprocessing of Spectroscopic Data Used in Predictive Modeling", Journal of Spectroscopy, vol. 2018, Article ID 5037572, 14 pages, 2018, doi: https://doi.org/1 0,1155/2018/5037572
19. Dong, Y., Shan, Y., Li, P., Jiang, L., & Zhang, X, "Nondestructive Characterisation of Citrus Fruit by near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy (NIRDRS) with Principal Component Analysis (PCA) and Fisher Linear Discriminant Analysis (FLDA)". Foods, 11(4), 1-16. 2022, doi: https://doi.org/1 0,1080/00032719.2022.2063306
20. Bishop, Christopher M., "Linear Models for Regression" in Pattern Recognition and Machine Learning, New York: Springer, 2006, doi: https://doi.org/1 0,5555/1162264
21. Vinzi, V. E., Chin, W. W., Henseler, J., & Wang, H, "Handbook of Partial Least Squares: Concepts, Methods and Applications", Springer, 2010, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-3-540-32827-8
22. Bishop, Christopher M., "Support Vector Machines for Regression" in Pattern Recognition and Machine Learning, New York: Springer, 2006, doi: https://doi.org/1 0,5555/1162264
23. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, "Random Forests" in The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, New York : Springer, Second Edition, 2009, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-0-387-84858-7
24. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman, "Boosting and Additive Trees" in The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction, New York : Springer, Second Edition, 2009, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-0-387-84858-7
25. Refaeilzadeh, P., Tang, L., Liu, H., "Cross-Validation " In: LIU, L., ÖZSU, M.T. (eds) Encyclopedia of Database Systems. Springer, Boston, MA, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-0-387-39940-9_565
26. Feurer, M., Hutter, F, "Hyperparameter Optimization". In: Hutter, F., Kotthoff, L., Vanschoren, J. (eds) Automated Machine Learning. The Springer Series on Challenges in Machine Learning. Springer, Cham, 2019, doi: https://doi.org/1 0,1007/978-3-030-05318-5_1

Desarrollo de un sistema de detección de 4 tipos malezas en el cultivo de Maíz (*Zea mays L.*) bajo invernadero utilizando el modelo YOLOv5 v7.0

García-Navarrete O.L[1-2], Santamaria Becerril O[2], Martin-Ramos P[2], Valenzuela-Mahecha M.A[1] Navas Gracia L.M[2]

[1] Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Bogotá, Colombia; olgarcian@unal.edu.co*, mavalenzuelam@unal.edu.co
[2] Universidad de Valladolid, Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, Palencia, España; oscarleonardo.garcia@uva.es, oscar.santamaria@uva.es, pmr@uva.es, luismanuel.navas@uva.es

Abstract:

Corn (Zea mays L.) is one of the most important cereals worldwide, to maintain crop productivity it is important to eliminate weeds that compete for nutrients and other resources, the eradication of these causes environmental problems through the use of agrochemicals, so the implementation of technology to mitigate this impact is a challenge. In this work, an artificial vision system was implemented based on the YOLOv5s (You Only Look Once) model, which uses a single convolutional neural network (CNN) that allows differentiating corn from 4 types of weeds, for which a mobile support structure was built to capture images,. The performance of the trained model had a value of mAP@05 (mean Average Precision) at a threshold of 0.5 of 83.6%. A prediction accuracy of 97% and a mAP@05 of 97.5% were obtained for the maize class. For the weed classes, Lolium Perenne, Sonchus Oleraceus, Saolanun Nigrum, and Poa Annua obtained an accuracy of 86%, 90%, 78%, and 74%, and a mAP@05 of 81.5%, 90.2%, 76.6% and 72.0% respectively. The results are encouraging for the construction of a precision weeding system.

Palabras clave: deep-learning; Precision agriculture; convolutional neural network (CNN); Computer vision; precision weeding.

1. Introducción

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el maíz (*Zea mays L.*) es el principal cereal sembrado en el mundo llegando a una producción de 1.12 mil millones de toneladas en el 2021 [1], Por lo que su manejo integrado respecto a las malezas es esencial para mantener la productividad [2]. El uso de herbicidas de pre y post emergencia es cotidiano como medida de mitigación, pero genera un alto impacto ambiental, también se usa el deshierbe manual o escarda, pero por su elevado coste en mano de obra no es una opción económicamente viable. Una de las tecnologías que se pueden utilizar para contrarrestar este problema es el desarrollo de sistemas basados en visión artificial que permitan ubicar y clasificar las plantas en diversas condiciones, logrando así diferenciar el cultivo de las malezas, y realizar una escarda de precisión. Una de las nuevas herramientas tecnológicas de visión artificial que usan actualmente para la detección y clasificación de objetos en tiempo real es YOLO (You Only Look Once) desarrollado por [3] en el 2016 donde propone un algoritmo de detección de objetos que consiste en entrenar una CNN (Convolutional Neuronal Network) profunda que predice para cada clase, la posición precisa de los objetos en las imágenes. El Algoritmo YOLO es altamente eficiente por lo que su diversificación a diferentes ramas de la ciencia ha crecido en los últimos años logrando tener diferentes versiones que mejoran su

eficiencia y se especializan en diferentes problemas. La utilización de las diferentes versiones YOLO en la agricultura ha generado diversas aplicaciones, por ejemplo, en [4] propone una modificación a YOLOv4 para mejorar la eficiencia y precisión en la identificación de malezas del cultivo de sésamo logrando un mAP (mean Average Precision) de 96.16%. En [5] propone un modelo ligero de detección de malezas llamado YOLO v4-weeds para las malezas entre las plántulas de zanahoria. Específicamente, la red troncal del YOLOv4 original fue reemplazada por MobileNetV3-Small alcanzando un mAP de 88.46%. En el trabajo de [6] entrenan las versiones de YOLO v3, v4, y v5 para detectar y delimitar la presencia de insectos en el campo encontrando que YOLO v5 ofrece la mejor precisión de detección de insectos con una (mAP) del 99,5%.

Estos algoritmos se implantan en diferentes plataformas para la identificación de las malezas, como en [7] que utiliza vehículos terrestres no tripulados (UGV) para la identificación y eliminación de malezas en cultivos de lechuga, con los modelos YOLO, Faster R-CNN y SSD Mobile. En [8] utilizo el YOLOv5 para construir un robot de deshierbe láser en tiempo real en tres cultivos: okra, calabaza amarga, calabaza esponja y cuatro especies de malezas, logrando un mAP de 88%. También se ha utilizado en aplicaciones con UAV (Unmanned Aerial Vehicle), [9] empleo un UAV para capturar imágenes y procesarlas con YOLOv7 con el fin de detectar la maleza *Mercurialis annua*, en el cultivo de remolacha azucarera, obteniendo un mAP 62.1%. Igualmente [10] evaluó el rendimiento de YOLOv5 en la clasificación de cultivos y malezas con imágenes tomadas con UAV, encontrado que el modelo obtuvo una presión del 65% mAP.

En el cultivo de maíz [11] usó imágenes aéreas para la detección de malezas empleando las versiones de YOLO v4 y v5, obteniendo un mAP de 73.1% con YOLOv5-s y un 72.0% con YOLOv4. En [12] construyo un robot de aspersión de precisión para el cultivo de maíz utilizando las diferentes versiones de YOLOv5, como resultado obtuvo un mAP de 89.4%, aunque no obtuvo el mejor rendimiento su tiempo de procesamiento fue menor que las demás versiones. El potencial y el uso de los algoritmos YOLO en la detección de malezas es una potente herramienta que realizando los entrenamientos adecuados y los ajustes necesarios para cada cultivo llegará a revolucionar los métodos de control de malezas en el mundo.

En esta investigación se presentan los resultados de la evaluación del desempeño del modelo YOLOv5s v7.0 en el desarrollo de un sistema de detección de 4 tipos malezas en el cultivo de Maíz (*Zea mays L.*) bajo invernadero.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales:

2.1.1 Material biológico:

Se utilizó semilla de maíz dulce (*Zea mays L.*). Se sembró en una cama elevada y se distribuyó en 46 recipientes colocando 3 semillas en cada recipiente, obteniendo un total de 138 plantas. El cultivo se ubicó en el invernadero climatizado de la Universidad de Valladolid campus la Yutera.

Se utilizaron 4 tipos de malezas (*Lolium perenne, Sonchus oleraceus, Saolanun nigrum, Poa annua*), se sembraron en 2 etapas de cultivo, para un total de 966 plantas de maleza.

2.1.2 Sistema de adquisición de imágenes:

Para la captura de las imágenes se construyó una estructura de soporte móvil en aluminio sobre la cama elevada del invernadero, la estructura va sobre ruedas guías que permite el desplazamiento controlado, Figura 1. El sistema de visión se compone de una cámara réflex Canon 850D con sensor CMOS de 22,3 x 14,9 mm ubicada a un metro de altura del sustrato del cultivo, se utilizó un objetivo EF-S 15-55mm f/4-536 IS STM con filtro polarizador circular PL-C 58mm. El sistema de iluminación se construyó con dos lámparas de luz blanca tipo LED de 6000 K configurada en matriz de 6 x 6 leds, a cada lámpara se le incorporó un filtro polarizador ROSCO de transmisión: 38 % (1,5 f/stop) para evitar los brillos sobre las hojas de las plantas, adicionalmente se aísla la escena de la luz exterior con paneles de polipropileno blanco.

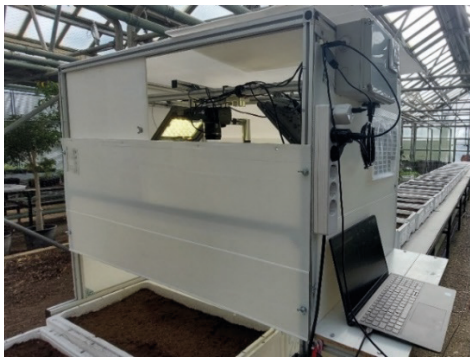


Figura 1. Estructura móvil de adquisición de imágenes

2.2 Metodología:

2.2.1 Siembra del material biológico

Se sembraron 138 semillas de maíz dulce (*Zea mays L.*) en sustrato en cama elevada. Las plantas se mantuvieron hasta finalizar la etapa fenológica del desarrollo vegetativo (día 60 después de la siembra), considerándose la etapa más sensible del cultivo debido al requerimiento de nutrientes y su competencia con las malezas [2], [13].

Para las malezas, se sembraron en 2 etapas: Etapa 1: considerada desde la siembra de la semilla hasta el día 31. En esta etapa se sembró aleatoriamente 4 tipos con una distribución de 6 plantas alrededor de cada maíz, obteniendo 12 ejemplares por recipiente, para un total de 552. Al día 31 se erradico por su tamaño, considerando que comercialmente las malezas no superan ese tamaño en cultivo. Etapa 2: considerada desde el día 32 después de la siembra, hasta el día 60 del cultivo. Después de su erradicación se sembraron nuevamente con una distribución de 9 plantas por recipiente, obteniendo un total de 414 en esta etapa.

2.2.2 Captura de imágenes

Se tomatón imágenes en RGB con resolución de 6000x4000 píxeles por 35 días, distribuidos desde el momento de la emergencia de la planta (día 12) hasta el final de la etapa fenológica del desarrollo vegetativo (día 60) obteniendo un total de 1640 imágenes.

2.2.3 Selección y etiquetado de las imágenes

Se seleccionaron las imágenes aptas para el entrenamiento, eliminando las que tuvieran desenfoque o que la planta fuera tan grande que se saliera de la escena, estas se encontraron en los últimos días de la etapa vegetativa. En la selección se eliminaron 240 imágenes, quedando un total de 1400 imágenes. Para el etiquetado de las imágenes se utilizó la herramienta de código abierto LabelImg, la cual, permite guardar las etiquetas en formato YOLO. Se usaron 5 Clases de etiquetas de acuerdo a las especies empleadas abreviando sus nombres para el mejor manejo: maíz, para las plantas de maíz, mh1: para *Lolium perenne*, mh2: para *Sonchus oleraceus*, mh3: para *Saolanun nigrum*, mh4: para *Poa annua.*

Se obtuvo un conjunto de 4.200 etiquetas de cuadro delimitador de maíz y de 10.322 etiquetas de malezas. Para el entrenamiento de dividió aleatoriamente el conjunto de 1400 imágenes en tres: 70% para el entrenamiento con 980 imágenes, 25% para la validación con 350 imágenes y el testeo con 5% con 110 imágenes.

2.2.4 Parámetros de configuración para el entrenamiento

Se utilizó el algoritmo de detección de objetos Yolov5s v7.0 desarrollado por [14]. Este algoritmo es un sistema de detección de objetos en imágenes en tiempo real de código abierto, el cual, utiliza una única red neuronal convolucional (CNN), pre-entrenada con el conjunto de datos COCO. El modelo de pesos pre-entrenado yolov5s.pt, este fue seleccionado debido a que en el trabajo desarrollado por [12] el modelo yolov5s.pt mostro un mejor rendimiento sobre los demás modelos de la familia Yolov5 en el mismo cultivo, adicionalmente en el trabajo de [15] afirma el mismo resultado.

Se configuro el archivo custommaiz1400.yaml con las etiquetas de obtenidas por la herramienta de código abierto LabelImg. Se utilizaron 300 épocas (epochs) para el entrenamiento, este valor fue seleccionado ya que, en entrenamientos previos se llegaba al mejor peso de la red en la mitad de épocas. En el trabajo de [10] entreno el algoritmo con diferentes cantidades de épocas, obteniendo la mayor precisión con 600 épocas, por lo que se realizaron los entrenamientos previos mencionados. El tamaño del lote (batch_size) se estableció en 32 siendo un valor que permite reducir el sobreajuste del modelo en las etapas iniciales. En cuanto al tamaño de la imagen los modelos Yolov5 reducen uniformemente las imágenes de entrada a 640 x640 píxeles. Los hiperparámetros de la tasa de aprendizaje inicial (lr0) y final (lrf) se establecieron en 0.01, el parámetro weight decay en 0.0005 y el Momentum en 0.937, valores recomendados por [14], los demás hiperparámetros utilizados han sido los definidos por el modelo por defecto. Los resultados del entrenamiento del algoritmo se organizaron en una matriz de confusión de clasificación. El rendimiento de la CNN se basó en tres métricas usando las ecuaciones de [16]: Recall, F1-score, y mAP (mean Average Precision).

2.2.5 Configuración del equipo

Para el entrenamiento y validación del modelo se utilizó la configuración de hardware y software descrita en la tabla 1.

Tabla 1. Configuración utilizada para el entrenamiento del modelo

Elemento del sistema	Descripción
Procesador	Procesador: Core(TM) i7-12650H 12th Gen Intel(R) 2.70 GHz
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3050 4096MiB
Memoria RAM	16 GB
Sistema Operativo	Windows 11 Enterprise
Entorno acelerado	CUDA 11.7
	Jupyter Notebook Versión 6.5.4
Entorno de desarrollo	Python 3.8.16
	PyTorch 2.0.0 - Torchvision 0.15.0 – Torchaudio 2.0.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados del entrenamiento

Como resultado del entrenamiento se obtiene el archivo best.pt que contiene los pesos del modelo. Sobre estos valores se realiza la validación con las 350 imágenes y se obtienen las siguientes métricas como indicadores del rendimiento del modelo.

3.1.1 Matriz de confusión

Según los resultados de la matriz de confusión (Figura 2), el modelo demostró un desempeño excepcional en la localización y clasificación del maíz y de las malezas. Se observó la precisión de predicción más alta para el maíz con un 97%. También se obtuvo una alta predicción para la mh2 (*Sonchus Oleraceus*), con un 90%. Sin embargo, se registraron tasas de precisión de predicción más bajas para la mh1(*Lolium Perenne*) con un 86%, mh3 (*Saolanun Nigrum*) con un 78% y mh4 (*Poa Annua*) con un 74%. Comparando los resultados de la matriz de confusión con los de [12] que utilizo el mismo algoritmo obtuvo una predicción de 92% para el maíz, y un de 86% para las malezas, es posible que los valores de predicción de [12] sean menores debido a que las imágenes se tomaron en diferentes condiciones de iluminación lo que afecta directamente la predicción del modelo. Es importante mencionar que entre las malezas el modelo suele confundirse, específicamente las mh2 (*Sonchus Oleraceus*) con la mh3 (*Saolanun Nigrum*) en un 11%, esto debido a que en sus primeras etapas de desarrollo las hojas suelen tener la misma forma, y a medida que crecen varían en su número de hojas y forma. Igualmente pasa con la mh1(*Lolium Perenne*) y mh4 (*Poa Annua*) con un 7% que corresponden a hoja estrecha.

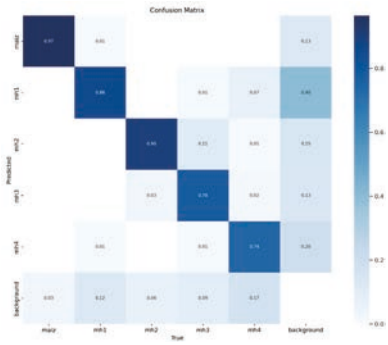
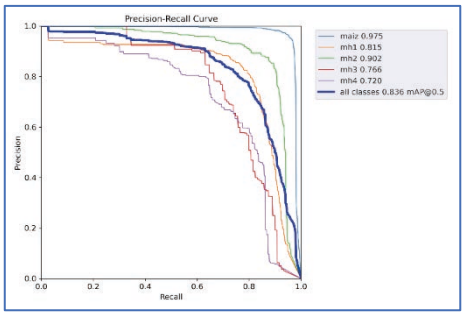


Figura 2. Matriz de confusión para las 5 clases del modelo.

3.1.2 Curva Precision-Recall y Curva F1-score - Confidence

Para cada época el algoritmo estima la Precisión y el Recall y se grafican para conocer el rendimiento del modelo (Figura 3), para esto se calcula las áreas bajo las curvas de cada clase, y se obtienen los valores mAP@05 de cada clase.



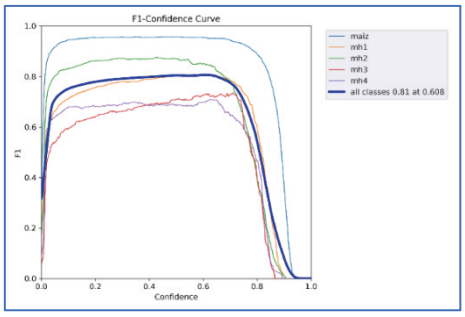


Figura 3. Curva Precision-Recall para las 5 clases.

Figura 4. Curva F1 – Confidence para las 5 clases.

El mAP@05 calcula el promedio de las precisiones de cada clase a un umbral de confianza de 0.5. Cuanto mayor sea el valor de mAP@05, mejor será el rendimiento del modelo. La clase maíz tiene el valor más alto de 0.975 mAP (97.5%), por lo cual, su poder de predicción es mayor que las demás clases. Las clases de las malezas varían entre 0.902 (90.2%) y 0.720 (72.0) mAP respectivamente. Para el modelo en general se calcula la media de los mAP de las 5 clases obteniendo un valor de 0.836 (83.6%) mAP@0.5. El valor mAP general del modelo (83.6%) es menor que el de la clase maíz (97.5%), debido a que es una media de los valores de precisión de las demás clases (malezas), haciendo que la eficiencia en la detección del modelo en general sea menor, pero esto no significa que su aplicación en campo sea inapropiado, ya que, si se busca discriminar el maíz de las malezas sin interesar la especie, el modelo es adecuado para implementar en un sistema de escarda que busque eliminar las malezas sin interesar su especie. En el trabajo de [12] los valores de mAP para el maíz fue de 96.3% y los de las malezas en 88.9%, valores similares al obtenido por nuestro modelo. Igualmente, que para la Curva Precision-Recall, se calcula F1-score como métrica del desempeño, y se grafica versus los puntajes de confianza, obteniendo un valor medio de 0.81 para todas las clases Figura 4. Corroborando lo anterior, se ve el comportamiento similar que en la Figura 3, mostrando que la clase maíz tiene el mayor poder de predicción.

3.1.3 Funciones de perdida

En la Figura 5 se presentan las diversas funciones de pérdida y métricas de evaluación del entrenamiento. Las curvas ilustran tres tipos de funciones de pérdida: pérdida de cajas (box_loss), pérdida de objetos (obj_loss) y pérdida de clasificación (clc_loss). La pérdida de cajas representa

la cobertura predictiva del cuadro delimitador del objeto objetivo, evaluando la probabilidad de que un objeto específico se encuentre en una región de interés. La pérdida de objetos indica si un objeto está presente en una ventana de imagen determinada. Por otro lado, la pérdida de clasificación se refiere a la discrepancia entre la clase real de un objeto predicho y la clase esperada.

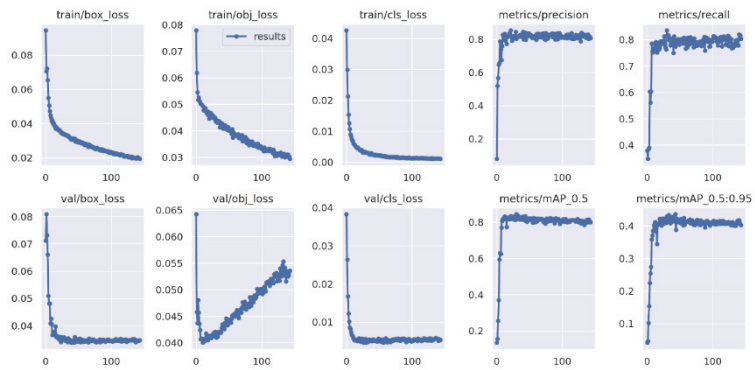


Figura 5. Funciones de perdida y métricas de rendimiento.

En la Figura 5, se observa claramente que el rendimiento del modelo mejora a medida que avanza el entrenamiento. Además, se aprecia un aumento progresivo en la precisión y el recall, tanto en el conjunto de entrenamiento como en las pruebas, lo que sugiere que el modelo no sufre de sobreajuste. Es de importancia resaltar que de las 300 épocas configuradas el algoritmo efectuó únicamente 143, ya que desde la época 43 el modelo llego a la convergencia. Se observa como en la validación el modelo parece converger incluso antes de la época 43 mencionada. Por otra parte, en la gráfica val/obj_loss, se aprecia un aumento en la pérdida pasadas las primeras 10-20 épocas. Esto mismo sucede con las gráficas de precisión y mAP. Los valores muestran una estabilización e incluso una disminución pasada estas 30-40 épocas.

3.1.4 Verificación de los resultados

Se realizó una verificación adicional a los resultados de las métricas de rendimiento, para evaluar los resultados del modelo visualmente. Para esto, se seleccionó un conjunto de imágenes de diferentes etapas de desarrollo del cultivo, se instanciaron y se compararon con las imágenes antes del etiquetado. Los valores de los cuadros delimitadores corresponden a las clases, 0: maíz, en color azul, 1: mh1(*Lolium Perenne*) en color verde, 2: mh2 (*Sonchus Oleraceus*) en color rojo, 3: mh3 (*Saolanun Nigrum*) en color cyan, 4: mh4 (*Poa Annua*) en color amarillo.



Figura 6. Imagen sin procesar del cultivo a 15 días después de la siembra.

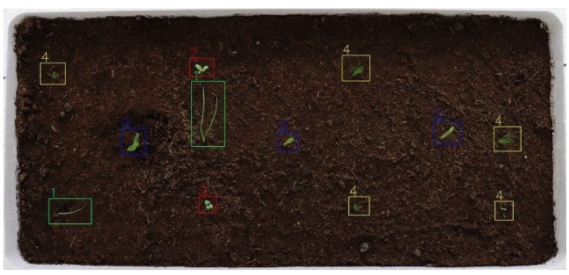


Figura 7. Imagen procesada del cultivo a 15 días después de la siembra.

En las Figuras 6 y 7 se observan el cultivo a 15 días después de la siembra, se identifican las plantas de maíz y las malezas que emergieron a la fecha el modelo las encuentra y las clasifica correctamente. En las figuras 8 y 9 se observa el cultivo a 30 días de la siembra, en ella la imagen procesada identifica las plantas de maíz de manera correcta, aunque dentro de un cuadro delimitar de la tercera planta de maíz, se esconde una mh4 (4-amarillo), en la Figura 7 si se separó

adecuadamente, esto se podría corregir aumentando la cantidad de imágenes con este comportamiento en el entrenamiento.



Figura 8. Imagen sin procesar del cultivo a 30 días después de la siembra.

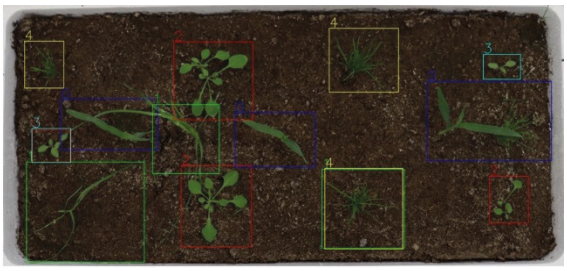


Figura 9. Imagen procesada del cultivo a 30 días después de la siembra.

En cuanto a las malezas, la clase mh1 (1-verde) de las 2 plantas presentes el modelo identificó 3, es decir clasifico una más, presentado un caso de falso positivo, identificándola como mh4 (4-amarillo), la similitud entre las hojas (estrechas) de las dos clases hace que puede ser clasificadas equivocadamente. Para la clase mh4 (4-amarillo), de las 4 plantas presentes 2 se clasificaron correctamente, la tercera fue clasificada correctamente pero también el sistema la clasifico como mh1 (1-verde), corroborando lo mencionado anteriormente, las malezas de la misma forma el sistema suele clasificarlas como pertenecientes a las dos clases. La cuarta planta mh4 (4-amarillo) no la identifico el modelo, no siendo clasificada, esta fue identificada en el cuadro delimitador del tercer maíz. En las mh2 (2-rojo) el sistema encontró 4 de las 3 sembradas, clasificando una más, teniendo nuevamente un falso positivo, ocurriendo algo similar a las dos clases anteriores, la forma de la hoja en este caso ancha, el sistema puede clasificarla en las dos categorías. En cuanto a la mh3 (3-cyan) de las 2 presentes el sistema las clasifico correctamente, solo una fue clasificada dos veces. En las figuras 10 y 11 se observa el cultivo a 45 días después de la siembra, se aprecia las plantas de maíz clasificadas correctamente. Las nuevas malezas emergentes de la segunda siembra se clasificaron correctamente.



Figura 10. Imagen sin procesar del cultivo a 45 días después de la siembra.

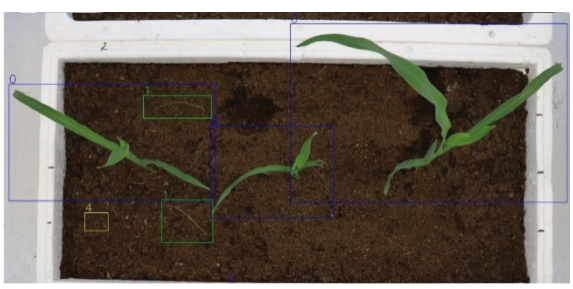


Figura 11. Imagen procesada del cultivo a 45 días después de la siembra.

4. Conclusiones

Se construyó una estructura de soporte móvil para la adquisición de imágenes que sirvió para el entrenamiento del modelo YOLOv5s. Este modelo implemento una CNN para la clasificación de 5 clases, obteniendo una predicción de 97% y un mAP@05 de 97.5% para el maíz, para las malezas se obtuvo: mh1(*Lolium Perenne*) con un 86% de predicción y un mAP@05 de 81.5%, mh2 (*Sonchus Oleraceus*) con un 86% de predicción y un mAP@05 de 90.2%, mh3 (*Saolanun Nigrum*) con un 78% de predicción y un mAP@05 de 76.6%, y para la mh4 (*Poa Annua*) con un 74% de predicción y un mAP@05 de 72.0%. El modelo en general para todas las clases tuvo un mAP@05 de 83.6%. La predicción y el mAP@05 de la clase maíz es la más alta de todas las clases del modelo, lo que es un resultado esperanzador para el proyecto en general, que busca la

construcción de un sistema de escarda de precisión, ya que, si el algoritmo identifica con una alta probabilidad la planta a proteger (maíz) y se diferencia de las malezas, el sistema buscara eliminar la maleza sin importar su precisión, sin embargo es necesario seguir alimentando el modelo con imágenes de nuevas campañas y enriquecer el conjunto de imágenes de entrenamiento.

Trabajo futuro: Se realizará una nueva campaña de cultivo para alimentar el conjunto de imágenes de entrenamiento que mejoren la clasificación en los casos encontrados como anómalos, con los nuevos resultados se validará en campo y se construirá un sistema de escarda de precisión integrado a la estructura móvil presentada en este trabajo.

5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto CIRAWA HEEU-101084398. Los autores de agradecen al grupo empresarial Huercasa por el suministro de la semilla y sus recomendaciones de cultivo, y al personal del invernadero del Departamento Producción Vegetal y Recursos Forestales de la ETS Ingenierías Agrarias de la Universidad de Valladolid.

Referencias

[1] FAO, "Perspectivas de cosechas y situación alimentaria #4, diciembre 2021," *Crop Prospects and Food Situation #4, December 2021*, Dec. 2021, doi: 10.4060/CB7877EN.

[2] I. Rajcan and C. J. Swanton, "Understanding maize–weed competition: resource competition, light quality and the whole plant," *Field Crops Res*, vol. 71, no. 2, pp. 139–150, Jun. 2001, doi: 10.1016/S0378-4290(01)00159-9.

[3] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection", Accessed: May 29, 2023. [Online]. Available: http://pjreddie.com/yolo/

[4] J. Chen *et al.*, "Weed detection in sesame fields using a YOLO model with an enhanced attention mechanism and feature fusion," *Comput Electron Agric*, vol. 202, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.COMPAG.2022.107412.

[5] B. Ying, Y. Xu, S. Zhang, Y. Shi, and L. Liu, "Weed detection in images of carrot fields based on improved YOLO v4," *Traitement du Signal*, vol. 38, no. 2, pp. 341–348, Apr. 2021, doi: 10.18280/TS.380211.

[6] S. Verma, S. Tripathi, A. Singh, M. Ojha, and R. R. Saxena, "Insect Detection and Identification using YOLO Algorithms on Soybean Crop," *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*, vol. 2021-December, pp. 272–277, 2021, doi: 10.1109/TENCON54134.2021.9707354.

[7] M. Espinoza, C. Z. Le, A. Raheja, and S. Bhandari, "Weed identification and removal using machine learning techniques and unmanned ground vehicles," p. 20, May 2020, doi: 10.1117/12.2557625.

[8] H. S. Fatima, I. ul Hassan, S. Hasan, M. Khurram, D. Stricker, and M. Z. Afzal, "Formation of a Lightweight, Deep Learning-Based Weed Detection System for a Commercial Autonomous Laser Weeding Robot," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 6, 2023, doi: 10.3390/app13063997.

[9] I. Gallo, A. U. Rehman, R. H. Dehkordi, N. Landro, R. La Grassa, and M. Boschetti, "Deep Object Detection of Crop Weeds: Performance of YOLOv7 on a Real Case Dataset from UAV Images," *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 2, 2023, doi: 10.3390/rs15020539.

[10] O. G. Ajayi, J. Ashi, and B. Guda, "Performance evaluation of YOLO v5 model for automatic crop and weed classification on UAV images," *Smart Agricultural Technology*, vol. 5, 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100231.

[11] C. Mota-Delfin, G. de J. López-Canteñs, I. L. López-Cruz, E. Romantchik-Kriuchkova, and J. C. Olguín-Rojas, "Detection and Counting of Corn Plants in the Presence of Weeds with Convolutional Neural Networks," *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 4892*, vol. 14, no. 19, p. 4892, Sep. 2022, doi: 10.3390/RS14194892.

[12] B. Wang, Y. Yan, Y. Lan, M. Wang, and Z. Bian, "Accurate Detection and Precision Spraying of Corn and Weeds Using the Improved YOLOv5 Model," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 29868–29882, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3258439.

[13] M. W. MYERS *et al.*, " The Effect of Weed Density and Application Timing on Weed Control and Corn Grain Yield 1 ," *Weed Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 102–107, Jan. 2005, doi: 10.1614/WT-03-263R.

[14] G. Jocher *et al.*, "ultralytics/yolov5: v7.0 - YOLOv5 SOTA Realtime Instance Segmentation," Nov. 2022, doi: 10.5281/ZENODO.7347926.

[15] F. Dang, D. Chen, Y. Lu, and Z. Li, "YOLOWeeds: A novel benchmark of YOLO object detectors for multi-class weed detection in cotton production systems," *Comput Electron Agric*, vol. 205, 2023, doi: 10.1016/j.compag.2023.107655.

[16] M. Sokolova and G. Lapalme, "A systematic analysis of performance measures for classification tasks," *Inf Process Manag*, vol. 45, no. 4, pp. 427–437, Jul. 2009, doi: 10.1016/J.IPM.2009.03.002.





Tecnología de la Producción Animal y Acuicultura / Tecnologia de Produção Animal e Aquicultura



Validación de sistemas de posicionamiento en interiores para granjas lecheras. Estudio de caso.

J. M. Pereira[1], C. Miras[1], J. Bueno[1], C. Amiama[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidade de Santiago de Compostela, Campus Terra, Lugo; javier.bueno@usc.es

Abstract: around 200 words and in English

In the last years, Indoor Real Time Location Systems (IRTLS) have started to be used in dairy farms. Cow location is an important parameter that can monitoring behaviour and measuring the time budget in dairy cows. Behaviour are indicators of health and welfare problems so thus they can be used as an early warning system. In this paper a case study methodology is described for validating the accuracy of an IRTLS in a cattle barn (67,45x36m) with 19 fixed beacons and animals equipped with an electronic label attached to the ear. Two different test was realized, static and dynamic test, with two labels on a stick located to 75 and 125 cm. The overall average accuracy in static test was 1,92 m with a standard deviation of 1,58 m. In dynamic test was 2,74 m with a standard deviation of 1,69 m. It seemed that the accuracy was negatively affected by position changes and in this case study it is not enough to accurately monitor the time budget of the cows.

Palabras clave: Ganadería de precisión, localización en interiores, posicionamiento en tiempo real.

1. Introducción

Se puede definir la producción lechera de precisión como el uso de tecnologías de la información y la comunicación para mejorar el control a nivel detallado de la variabilidad de los animales y los recursos físicos, para optimizar el rendimiento económico, social y ambiental de la granja lechera [1]. Bajo la denominación de Smart Dairy Farming o Tecnologías Lecheras de Precisión (TLP) se engloban una serie de sistemas basados en sensores que puede adquirir datos de forma continua, automática y en tiempo real de numerosos parámetros relacionados con la producción, la calidad de la producción, el comportamiento, la actividad, la localización, la salud, el consumo de alimento, la condición corporal, el momento del parto y la fertilidad de la vaca. La arquitectura general está formada por uno o varios sensores que capturan los datos, los cuales son transferidos a una estación base, la estación base puede enviar los a la nube o tratarlos in situ con un software específico, los datos son analizados utilizando diferentes técnicas y métodos, el software enviará alertas al granjero, en algunos casos puede predecir eventos futuros y en general ayudará en la gestión del rebaño [2,3].

Las Tecnologías de Precisión (TP) se están constituyendo como uno de los pilares de la sostenibilidad del sistema de producción y representan para muchos, la esperanza de mejorar las condiciones de trabajo en las explotaciones de forma que resulte más atractivo. Permiten monitorizar los animales y las granjas, puede mejorar el bienestar animal, aumentar la eficiencia de la producción animal y disminuir el impacto ambiental de la producción ganadera, mejorando así la percepción que la sociedad tiene del sector, al demostrar el compromiso de las explotaciones con el medio ambiente y el desarrollo de estrategias que mejoran el bienestar animal [4, 5].

Una de estas tecnologías son los sistemas de posicionamiento en interiores (IPS) utilizados para conocer la localización en el interior de los establos de las vacas lecheras. Los IPS pueden ser utilizados no sólo para conocer la localización en tiempo real de cada animal en el interior de la explotación, también para conocer la distribución del tiempo a lo largo del día de cada animal individual y del rebaño, en general, en las diferentes zonas del establo (ordeño, alimentación, descanso, pasillos, bebederos, etc). La importancia de la distribución del tiempo (time Budget), en vacuno lechero, es bien conocida. En general, las vacas lecheras pasan de 3 a 5 h/d comiendo, consumiendo de 9 a 14 comidas al día, rumian de 7 a 10 h/d, requieren aproximadamente 10 h/d de tiempo de reposo, pasan aproximadamente 30 min/d bebiendo y 2 a 3 h/d en actividades de manejo y ordeño [6]. Cualquier factor que limite los tiempos que necesita el animal para alimentación, rumia y descanso, o que pueda provocar miedo, incomodidad o estrés, puede afectar a la producción y por tanto al rendimiento del sistema.

Los aspectos económicos juegan un papel central en la adopción de las TP, siendo la adopción mayor donde permite incrementar los rendimientos y reducir los costes de producción, tradicionalmente en situaciones donde la disponibilidad de mano de obra es baja o cara. Realizar una planificación estratégica, que permita estimar el impacto financiero de implementar TLPs, es fundamental. La estimación de las consecuencias financieras no siempre es predecible, una gran variedad de factores influye en la toma de decisiones, existen múltiples opciones, y esto hace más difícil tomar la decisión acertada ya que muchos productores simplemente desconocen las tecnologías disponibles [7].

Es fundamental disponer de la información necesaria para discernir cual será la tecnología que mejor se adapta a cada caso, y cumplir con las expectativas en ellas depositadas Para que la tecnología sea útil, y económicamente viable, deben monitorizar continuamente y cuantificar con precisión y facilidad parámetros fisiológicos o de comportamiento de los animales, con algoritmos fiables en los que se basará la toma de decisiones. [8]. En este trabajo hemos puesto a punto una metodología de trabajo que permite validar a nivel de explotación la fiabilidad y precisión de los IPS que se están comenzando a instalar en las granjas lecheras.

2. Materiales y métodos

Los trabajos se llevaron a cabo en la granja experimental y docente del Campus Terra, de la Universidad de Santiago de Compostela (USC), ubicada en Castro de Riberas de Lea (Lugo) y en la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, en los primeros meses del año 2022. La granja experimental y docente de la USC cuenta con algunos de los últimos avances en TLP: Identificación por radiofrecuencia, sistema de ordeño robotizado VMS 300 (DeLaval, Tumba, Sweden), contador de células somáticas online (OCC), cámara de puntuación de condición corporal (BCS), supervisión remota del tanque de leche, sistema avanzado de monitoreo Smartbow (MKW electronics GmbH, Jutogasse, Austria) con medición de rumia, actividad y localización en tiempo real, sistemas informáticos de administración y control DelPro (DeLaval) y Smartbow.

El sistema Smartbow (SB) está formado por un conjunto de antenas de posición fija y conocida, en número variable dependiendo de las dimensiones y los obstáculos del edificio (19 antenas en nuestra granja experimental), tags de oreja portados por cada uno de los animales - cada tag contiene un radio chip, acelerómetro y batería en su interior, los datos de los acelerómetros no fueron utilizados para este estudio -, un servidor y el sistema informático (Software + PC). Para que el sistema localice a los animales es necesario que el tag portado esté al alcance de un mínimo de tres antenas para fijar la posición en dos dimensiones (x, y), o de cuatro antenas para fijar la posición en tres dimensiones (x, y, z). Mediante triangulación de la posición relativa de cada tag en relación a la distancia a las antenas, de una forma similar al

funcionamiento de los sistemas GPS utilizados para localizar vehículos en exteriores, el sistema es capaz de ubicar la posición de los animales en la explotación (figura 1).

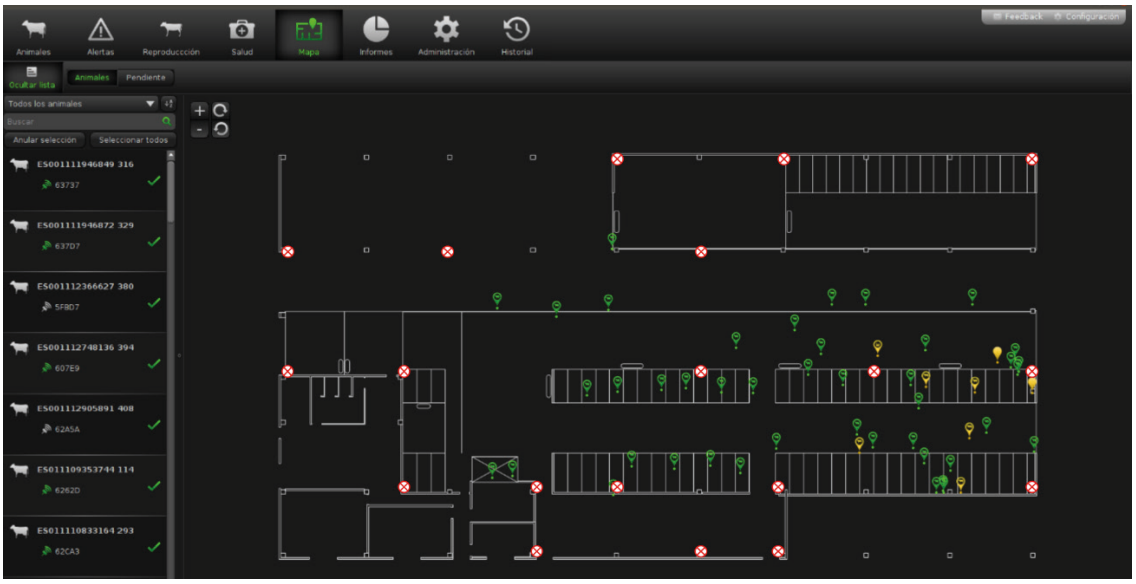


Figura 1. Pantalla de referencia con la localización en tiempo real de los animales (granja experimental y docente de la Diputación provincial de Lugo / USC). ⊗ Posición de las antenas

2.1. Coordenadas de referencia

No fue posible acceder al fichero de coordenadas del sistema, por lo cual, para validar la precisión en la localización establecimos un sistema de referencia propio, formado por una matriz con celdas de 0,5m. x 0,5 m. La posición ofrecida por el software fue comparada con la posición real (figura 2), calculando el error de posición (h), con la sencilla aplicación del Teorema de Pitágoras.

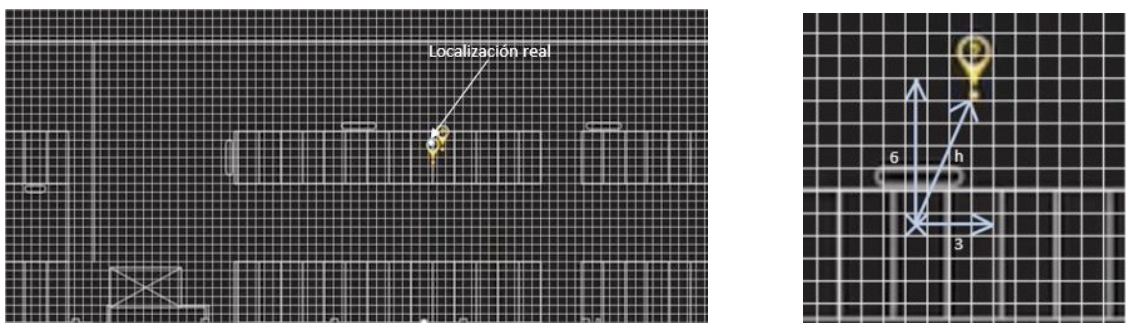


Figura 2. Sistema de referencia para determinar el error de posición (h), distancia entre posición real y posición asignada por el software (en la figura $h = \sqrt{6^2 + 3^2}$)

2.2. Mediciones estáticas de referencia

Utilizamos un bastón al que acoplamos dos tags SB a diferentes alturas, y un sistema de medición laser (GLM 50C Bosch). Un tag a 76 cm representa la posición típica de un animal acostado, el otro a 155 cm de altura representa a un animal caminando o de pie (figura 3).



Figura 3. Colocación de dos tags a 75 y 155 cm de altura respectivamente, acoplados a un bastón para toma de datos de mediciones estáticas de referencia.

Se establecieron 50 puntos de referencia de posición fija y conocida a lo largo y ancho de toda la edificación por las zonas de acceso de los animales (cubículos, cornadiza, pasillos, ordeño) En cada uno de los puntos se posicionó el bastón, con los dos tags colocados, durante un periodo de 2 minutos sin realizar ningún tipo de movimiento (ensayo estático), se registró la hora de llegada al punto (hh:mm:ss) y la hora de salida (2 minutos después), trascurridos los dos minutos se cambia el bastón al siguiente punto y así sucesivamente repitiendo el procedimiento hasta completar los 50 puntos fijados en la edificación (figura 4).

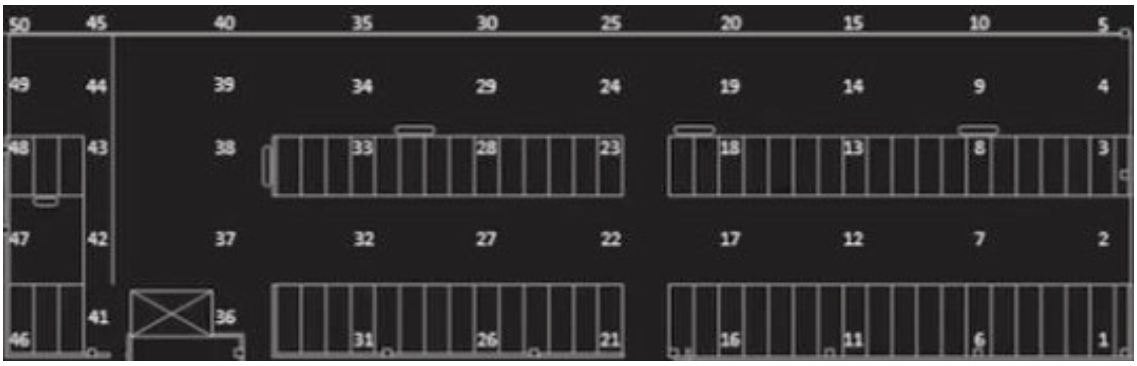


Figura 4. Distribución de puntos de posición fija y conocida para realizar medidas estáticas de referencia.

Simultaneamente a la toma de datos punto a punto se grabaron las ubicaciones registradas en el software, registrando la posición ofrecida a intervalos de 20 segundos para cada una de las

posiciones de referencia (2 tags, 50 posiciones,7 datos por tag y posición, 700 datos). Los datos se pasaron a Excell (Microsoft Corp.) y se compararon los datos registrados con la posición real (6 datos para cada una de las 50 posiciones) utilizando la matriz de coordenadas de referencia para calcular el error de posición, utilizando un factor de conversión de 0,5 para transformar las distancias calculadas a metros. Obtenidas las distancias se realizó un análisis estadístico descriptivo utilizando IBM SPSS Statistics.

2.3. Ensayo dinámico

Simulando condiciones reales de desplazamiento de los animales por el establo, con el tag colocado a 155 cm, se siguió la trayectoria representada en la figura 4, en la cual se realizaron un total de 34 paradas de duración variable (entre 5 segundos y 9 minutos), registrando la hora de llegada, la de salida (hh:mm:ss), registrando la posición reflejada por el software a intervalos de 10 segundos para cada punto de referencia El itinerario fue diseñado de forma que se obtuviesen datos de todas las áreas de la estabulación por las que los animales tienen libertad de movimientos.

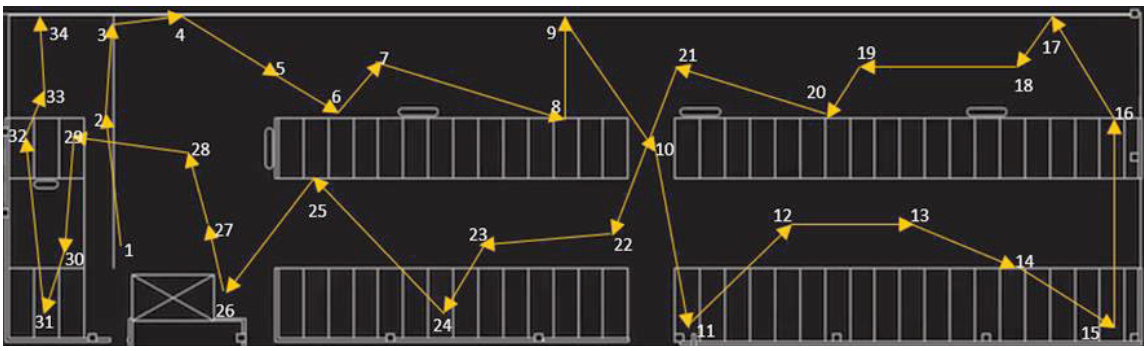


Figura 4. Itinerario seguido en el ensayo dinámico.

Un total de 236 registros fueron obtenidos teniendo en cuenta los tiempos de parada en cada posición. Para calcular el error de posición se utilizó la matriz de referencia siguiendo el mismo procedimiento descrito para el ensayo estático. Se vincularon los datos a tres zonas: alimentación (cornadiza), descanso (cubículos) y ejercicio (pasillos)

3. Resultados y discusión

3.1. Ensayo estático

De los 700 datos previstos en el ensayo, 686 fueron válidos, 14 datos fueron perdidos por incidencias en la toma de datos. La representación de los errores de posición medidos en los 50 puntos de referencia (figura 5), muestra una elevada desviación con valores que van desde 0 a los 17 m, medidos siguiendo el sistema de referencia definido en metodología.

Tan sólo el 23,8 % de los datos resultaron encontrarse a 1 metro o menos de la distancia real, el 78,4 % de los datos resultaron encontrarse a una distancia menor o igual a 2,5 m (percentil 75), suficientemente cercana como para que un operario localice sin dificultad los animales y realizar las diferentes tareas de manejo diario, pero insuficiente para definir con una precisión aceptable la distribución del tiempo que los animales pasan en las zonas de la explotación, cuyo dato es necesario para determinar con precisión el time Budget de animales individuales y del rebaño en general. El número de casos atípicos es variable en función de la posición, 33 si se toman los datos para cada posición, 17 tratando todos los datos en conjunto.

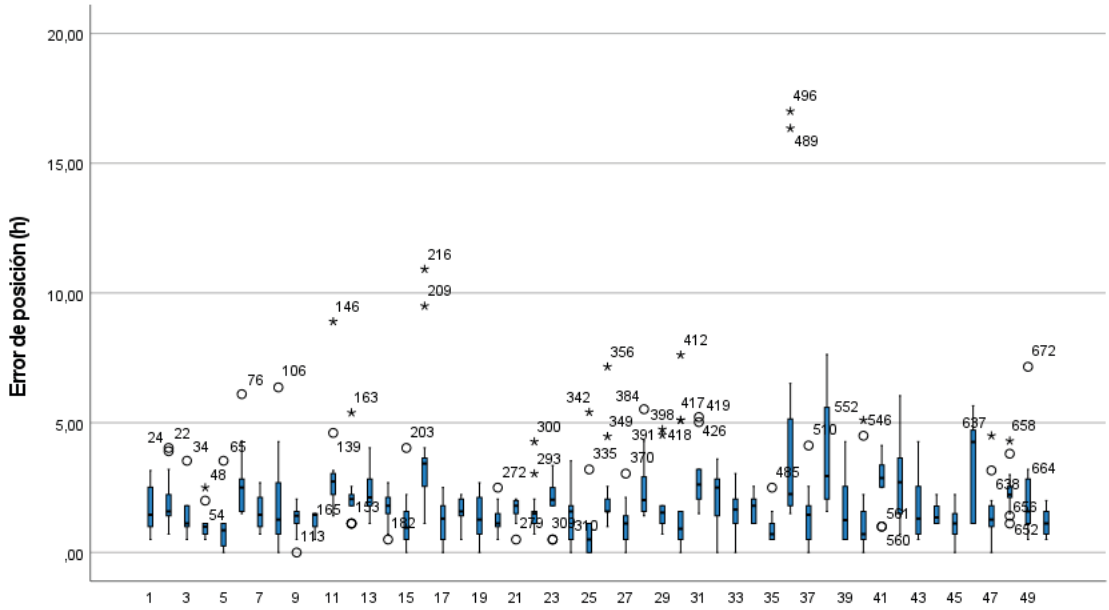


Figura 5. Valores observados para el error de posición en los 50 puntos definidos en el ensayo estático

El error medido de posición resultó ser de 1,91±1,58 metros. Agrupando los datos y analizándolos de forma separada para 5 zonas de la explotación (cornadiza, pasillo de alimentación, camas centrales, pasillo de zona de descanso, y camas laterales), podemos ver que existen diferencias substanciales entre las distintas zonas (tabla 1). La zona con mayor precisión es la cornadiza (1,21 ±1,16) y pasillo de alimentación, por el contrario el mayor error es da en la zona más alejada de la cornadiza en las camas laterales (2,92 ±2,36). Estos datos contrastan fuertemente con los ofrecidos por otros autores [9, 10] que observaron para dispositivos similares valores de precisión de 30,5 cm con una desviación standard de 25 cm y una sensibilidad superiores al 70% en pasillos, entorno al 90% o ligeramente superiores para cubículos y cornadiza, y valores de especificidad superiores al 90% en pasillos y superiores al 80 % para el resto de áreas del establo. Se podría pensar en una inadecuada distribución de las antenas, más enfocadas a la zona de alimentación, sin embargo la zona de camas centrales tiene un error bastante superior (2,15 ±1,35) respecto al pasillo de la zona de descanso (1,76 ±1,07) que queda separando ambas líneas de cubículos y que tienen el mayor margen de error, se podría pensar que las zonas con gran cantidad de elementos metálicos pudiesen generar algún tipo de distorsión en la señal entre los tags y las antenas, pero esto último no concuerda con la zona de cornadiza, donde se alcanza la mayor precisión.

Tabla 1. Error de posición obtenido por zonas en el ensayo estático, (SD= desviación estándar)

				Intervalo de confianza 95%			
Posición	**N**	**Media**	**SD**	**Inferior**	**Superior**	**Mínimo**	**Máximo**
Cornadizas	137	1,21	1,16	1,01	1,40	0,00	7,62
Pasillo de alimentación	133	1,55	0,97	1,38	1,72	0,00	7,16
Camas centrales	140	2,15	1,35	1,93	2,38	0,00	7,63
Pasillo zona descanso	140	1,76	1,07	1,58	1,94	0,00	6,04

Camas laterales	136	2,92	2,36	2,52	3,32	0,50	17,01
Total	686	1,92	1,58	1,80	2,04	0,00	17,01

3.1. Ensayo dinámico

Se obtuvieron un total de 232 datos válidos, 4 datos fueron perdidos por incidencias en la toma de datos.

El error medido de posición resultó ser de 2,74±1,69 metros, lo que significa una precisión inferior a la medida en el ensayo estático (1,91±1,58). Observando la agregación de datos por zonas (Tabla 2), constatamos que el error es menor en la zona de alimentación (cornadiza) con un valor medio de 1,50±1,57 metros y mucho mayor, 3,01±1,55 en las zonas de ejercicio (pasillos). Este último dato contrasta con los resultados obtenidos en el ensayo estático, en el cual se observaron los errores de mayor magnitud en las zonas de descanso (camas).

Tabla 2. Error de posición obtenido por zonas de la edificación en el ensayo dinámico

				Intervalo de confianza 95%			
	N	**Media**	**Desviación estándar**	**Inferior**	**Superior**	**Mínimo**	**Máximo**
Alimentación	29	1,50	1,57	0,91	2,10	0,00	7,16
Descanso	77	2,76	1,76	2,36	3,16	0,00	10,31
Ejercicio	126	3,01	1,55	2,74	3,28	0,50	8,28
Total	232	2,74	1,69	2,52	2,96	0,00	10,31

Tan sólo el 15,9 % de los datos resultaron encontrarse a 1 metro o menos de la distancia real, el 50,4 % de los datos resultaron encontrarse a una distancia menor o igual a 2,5 m (percentil 75), aunque los valores difieren bastante entre las diferentes zonas de la explotación (figura 6), con diferencias que resultaron ser significativas (P<0,005). Así el 50% de los datos resultaron encontrase a 1 m o menos para la zona de alimentación mientras que se aproxima a los 2,5 m para la zona de descanso y casi alcanza los 3 m en la zona de ejercicio. Nos inclinamos por pensar que los cambios frecuentes de posición afectan negativamente a la precisión y que las diferencias observadas entre las zonas son multifactoriales, probablemente debidas a la interacción entre la distribución y número de antenas (habría que incrementar el número de antenas), la proximidad a las paredes de la edificación y la presencia de elementos metálicos, pero se requiere más investigación al respecto para llegar a conclusiones relevantes.

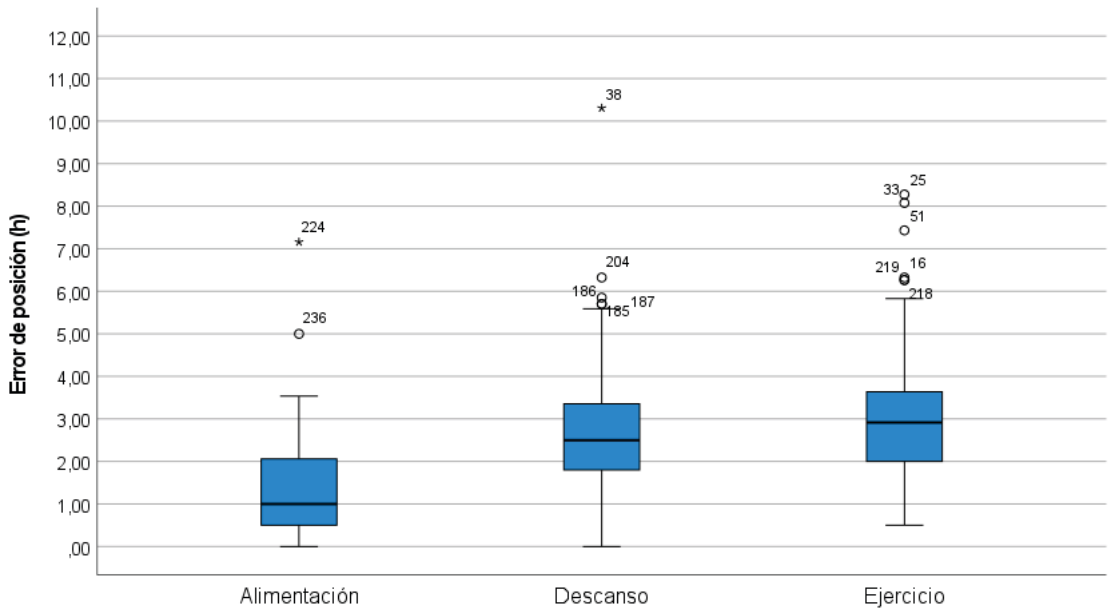


Figura 6. Valores observados para el error de posición en las 3 zonas del establo

4. Conclusiones

El método utilizado es válido y resulta práctico para validar la precisión de los sistemas utilizados para localizar en tiempo real los animales en el interior de sus alojamientos, aunque sería deseable que los sistemas informáticos de los IRTLS ofreciesen el valor numérico de las coordenadas de referencia. Utilizando el sistema de referencia formado por una matriz con celdas de 0,5m. x 0,5 m se han obtenido valores de precisión globales de 1,91±1,58 metros para el ensayo estático y de 2,74±1,69 para el ensayo dinámico, encontrando diferencias importantes entre las distintas zonas de la estabulación que resultaron ser significativas entre la zona de alimentación (1,50±1,57), la de descanso (2,76±1,76) y alimentación (3,01±1,55). Independientemente de que algunos elementos como paredes o estructuras metálicas pueden afectar a la precisión de los IRTLS, consideramos que en el caso de estudio analizado debería ser incrementado el número de antenas para poder alcanzar valores de precisión encontrados por otros autores en instalaciones similares.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Diputación Provincial de Lugo el facilitarnos el acceso a las instalaciones de la granja experimental y docente “Gayoso Castro” y a todo el personal de la misma por su colaboración en la toma de datos.

Referencias

Las referencias se citarán en el texto numéricamente, entre corchetes: [1]. [2,3], etc.

21. Eastwood, C. R., Chapman, D. F., Paine, M. S. (2012). Networks of practice for co-construction of agricultural decision support systems: Case studies of precisión dairy farms in australia. Agricultural Systems 108(0):10-18.

22. Akbar, M.,Shahbaz Khan, M., Jamshaid Ali, M., Hussain, A., Qaiser, G., Pasha, P., Pasha, U., Saad Missen, M., Akhtar, N. (2020). IoT for Development of Smart Dairy Farming. Journal of Food Quality. https://doi.org/10.1155/2020/4242805
23. Borchers, M. R., Bewley, J.M. (2015). An assessment of producer precision dairy farming technology use, prepurchase considerations, and usefulness. J. Dairy Sci. 98:4198–4205.
24. Laca, E. A. (2009). Precision livestock production: Tools and concepts. Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science 38(SPE):123-132.
25. Rutten, C.J., Velthuis, A.G., Steeneveld, W., Hogeveen, H. (2013). Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. J. Dairy Sci. 96(4):1928-1952.
26. Grant, R.J., Albright, J.L. (2001). Effect of Animal Grouping on Feeding Behavior and Intake of Dairy Cattle. J. Dairy Sci. 84(E. Suppl.): E156-E163.
27. Russell, R.A., Bewley, J.M. (2013). Characterization of kentucky dairy producer decision-making behavior. J. Dairy Sci. 96(7):4751-4758.
28. Berckmans, D. (2006). Automatic on-line monitoring of animals by precision livestock farming. Livestock production and society 287: 27-30
29. Chapa, J. M., L. Lidauer, A. Steininger, M. Öhlschuster, T. Potrusil, M. Sigler, W. Auer, M. Azizzadeh,M. Drillich, and M. Iwersen (2021). Use of a real-time location system to detect cows in distinct functional areas within a barn. J. Dairy Sci. 2: 217-222.
30. Ipema, A.H., T. Van de Ven and P.H. Hogewerf (2013). Validation and application of an indoor localization system for animals. Precision Livestock Farming 13: 135-144



Depurado de los registros de estaciones electrónicas de alimentación en porcino: estimaciones de eficiencia

M. Garrido-Izard[2], E.C. Correa[1], J.M. Requejo[3], B. Diezma[1]

[1] Laboratorio de Propiedades Físicas y Técnicas Avanzadas en Agroalimentación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB), Universidad Politécnica de Madrid, Avenida Puerta de Hierro 2-4, Madrid, 28040 (Spain). e-mail: belen.diezma@upm.es
[2] Centro Tecnológico de Componentes-CTC, Scientific and Technological Park of Cantabria (PCTCAN), c/Isabel Torres 1, 39011 Santander, Spain
[3] Hypor, Hendrix-Genetics Company. Hypor B.V. Villa 'de Körver', Spoorstraat 69, 5831 CK Boxmeer, Holanda

Abstract: Electronic feeding stations are frequently used to automatically record feeding behavior in pigs by collecting feed ingested and live mass in each visit. In breeding programmes, the identification of the most efficient animals is a priority objective. To achieve this, they combine the information provided by the electronic feeding stations with that derived from growth models previously adjusted according to the line of animals. It has been found that this practice eliminates infrequent but possible events by substituting intake and body weight values collected by the stations with values interpolated according to the growth models. This results in a double estimation of efficiency, one derived solely from the debugged records of the feeding stations and the other from the growth models. It has been shown that selection of animals according to efficiencies determined only by the growth model leaves out individuals with real efficiencies according to stations above 0.47. Consideration of both efficiencies in the classification of animals would lead to more robust selection procedures.

Palabras clave: modelos de crecimiento, cebo en ganado, ganadería de precisión, filtrado de datos, índice de conversión.

1. Introducción

Las estaciones electrónicas de alimentación (EEA) permiten registrar automáticamente el comportamiento alimentario individualizado de los animales de distintas especies, entre ellas de porcino. Estos registros sistemáticos posibilitan la monitorización precisa de cada animal, al incluir el identificador único del individuo, el peso corporal y la ingesta en cada visita. Con estas dos variables se determina la eficiencia en la alimentación (incremento de peso animal/alimento ingerido), indicador clave de sostenibilidad económica y ambiental en la producción animal. Pero los datos resultantes de estas EEAs requieren depurados previos para eliminar datos aberrantes que distorsionan las estimaciones basadas en ellos, y comprometen la incorporación de estas bases de datos en los sistemas de ayuda a la decisión. Las curvas de crecimiento y los índices de conversión son de especial relevancia en las empresas dedicadas a la mejora genética, puesto que, entre otros parámetros genotípicos y fenotípicos, utilizan éstos en la selección de los animales más eficientes.

En trabajos previos, realizados en colaboración con la empresa de mejora genética animal Hendrix Genetics, los autores de este artículo han puesto a punto una metodología para depurar los datos de EEAs [1] adquiridos en los procesos de cebo. Las series temporales de alimento

ingerido y peso vivo de cada animal se someten a un proceso automatizado, cuyo paso inicial consiste en identificar y eliminar aquellas series que están fuera de los umbrales establecidos sobre los histogramas de cada parámetro; posteriormente se analizan las curvas de peso de los animales para detectar y suavizar las grandes fluctuaciones del peso en un corto periodo de tiempo, e identificar errores en la calibración de la báscula de pesaje. Tras la aplicación del proceso descrito a dos bases de datos de una granja de cebo comercial (calibración y validación) con más de 2.000 animales cada una, el número de animales objeto de estudio se redujo en torno a un 40%, sin embargo, se comprobó que el procedimiento permitió consolidar bases de datos más fiables para ser utilizadas en análisis posteriores más complejos, como la estimación de la eficiencia.

En situaciones en las que la recogida de información individualizada es complicada, el crecimiento de un animal en condiciones no limitantes se predecía a partir de los valores de un pequeño grupo de variables introducidas en funciones de crecimiento derivadas de un limitado conjunto de supuestos sencillos [2]. Sin embargo, este potencial puede verse limitado por ingestas restringidas o por condicionantes ambientales, que cada animal enfrenta con diferente capacidad. La caracterización de cada individuo mediante el registro sistemático de indicadores de crecimiento y comportamiento, permiten complementar la información obtenida de modelos más o menos complejos, como regresiones logísticas, funciones de Gompertz [3] o de Von Bertalanffy [4]. En la actualidad se están redoblando los esfuerzos para la monitorización continua del peso corporal y del tamaño de los animales durante las fases de engorde, hasta incorporar sistemas de imagen, además de los registros de las estaciones de alimentación [5].

En Hendrix Genetics, la curva de crecimiento de cada animal se obtiene mediante un procedimiento que combina la información individualizada de cada animal y modelos ajustados para cada una de sus líneas, lo que conduce a eliminar cualquier evento circunstancial producido durante el engorde de un animal concreto, como puede ser un ayuno temporal. Estos eventos, sin embargo, sí son retenidos en el procedimiento de depuración descrito anteriormente por los autores. Consecuentemente, la estimación de la eficiencia en la transformación puede discrepar si se consideran las curvas ajustadas de Hendrix Genetics o las que resultan directamente de las estaciones de alimentación tras el proceso de depurado.

Así, el objetivo del presente estudio es analizar las consecuencias de las diferencias entre los datos registrados por las EEAs y los modelos de crecimiento en la clasificación de animales según su eficiencia en la transformación.

2. Materiales y métodos

Los datos objeto de estudio corresponden a registros de 1.504 machos Landrace no castrados en la fase de cebo, durante un periodo de 5 años (2015-2020), en una granja de cría en Villatobas, Castilla-La Mancha, España (39◦54002,7" N 3◦17031,400 W). Los machos criados en esta granja en los últimos años (más de 5.000 animales) presentan una media de peso inicial, peso final, edad de inicio y edad final de 27,6 kg, 119,4 kg, 71,8 días y 167,1 días respectivamente. Los animales se distribuyeron en corrales de 15 m^2 (15 cerdos por corral) con solera de rejilla de hormigón. Todos los animales tenían acceso *ad-libitum* al agua (dos tetinas en cada corral) y al pienso seco.

El pienso peletizado suministrado contenía 16,1% de proteína bruta, 2,9% de grasa bruta, 3,7% de fibra bruta, 5,5% de ceniza bruta, 0,85% de calcio, 0,49% de fósforo, 0,22% de sodio, 0,39% de metionina y 1,03% de lisina. El pienso se distribuyó a través de la EEA Compident MLP (Schauer Agrotronic GmbH, Austria), que calcula el peso del pienso ingerido restando el peso del pienso en el comedero antes y después de cada visita. Todos los animales llevaban un marcador RFID (identificación por radiofrecuencia) único de baja frecuencia en sus crotales, que debía leerse antes de entrar a la EEA. Si el RFID no es reconocido a la entrada de la EEA, ésta no se abre. Una vez que el animal ha sido identificado por el detector de la pared frontal, se abre la puerta del comedero y se dispensa el pienso desde el recipiente al comedero (previamente el pienso no es visible para los animales).

Se ha realizado una comparación de las estimaciones de eficiencia en la transformación realizadas a partir, tanto de las curvas de peso corporal e ingesta depuradas según procedimiento descrito en [1] (eficiencias EEA), como de los modelos de crecimiento de Hendrix Genetics (eficiencias MC), para analizar el efecto de eventos atípicos en el cálculo de la eficiencia y evaluar la discrepancia entre ambos procedimientos de estimación.

3. Resultados y discusión

A continuación, se muestran los estadísticos que caracterizan las dos bases de datos de eficiencias y la relación entre ambas, y los resultados de evaluar los eventos esporádicos registrados por las EEA.

3.1. Estadísticos de las eficiencias en la transformación según las estaciones electrónicas de alimentación y según los modelos de crecimiento

En la Tabla 1 se muestra el rango, la media y la mediana de las eficiencias EEA y las eficiencias MC. Se observa que, a pesar de que los valores de media y mediana son similares en ambos procedimientos los rangos difieren, siendo más del doble el de las eficiencias EEA que el de las eficiencias MC.

Tabla 5. Principales estadísticos de las poblaciones de eficiencias de las estaciones electrónicas de alimentación (EEA) y de los modelos de crecimiento (MC).

Base de datos	Eficiencias EEA	Eficiencias MC
Número de animales	1 504	
Rango	[0.263 - 0.708]	[0.300 – 0.588]
Media	0.435	0.421
Mediana	0.436	0.422
Desviación típica	0.033	0.034

La comparación de las eficiencias (kg engordado/ kg ingerido) obtenidas para los modelos y las EFS demostró tener un coeficiente de correlación de 0.55 (Figure 1).

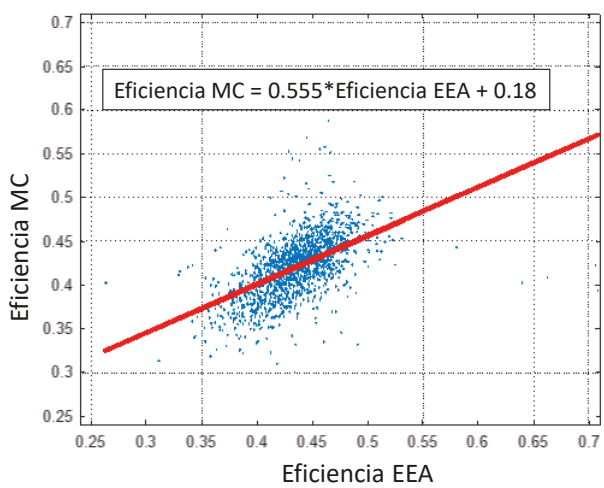


Figura 1. Eficiencia de cada animal según la estación electrónica de alimentación (EEA) y según el modelo de crecimiento (MC) (r = 0.55).

3.2. Fuentes de variación en la estimación de eficiencias

La Figura 2 muestra el histograma de las diferencias entre la eficiencia MC y la eficiencia EEA para cada animal. Se observa que mayoritariamente, las eficiencias son superiores según las EEA que los MC (resaltado con fondo naranja). El rango de diferencias oscila entre -0.314 y 0.139, con un valor medio de -0.015 (+/- 0.032).

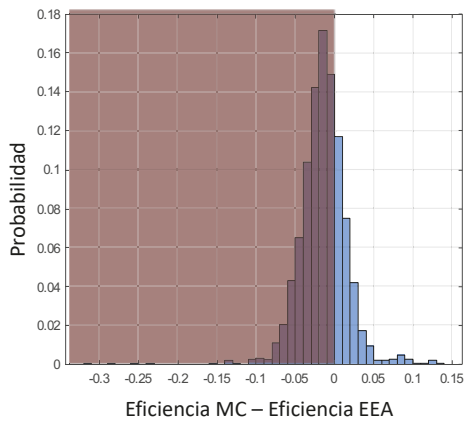


Figura 5. Histograma de las diferencias entre las eficiencias según estaciones electrónicas de alimentación (EEA) y las eficiencias según modelos de crecimiento (MC)

Para explicar el origen de la discrepancia entre ambas eficiencias, se estudian las dos variables que intervienen en su estimación, la ganancia de peso del animal y el alimento ingerido.

La Figura 3 muestra claramente que las ingestas consideradas en los MC son superiores a las establecidas a partir de los datos de las EEA. De media, los animales ingieren casi 10 kg (+/- 12.19 kg) más de pienso según los MC que según las EEA, dentro de un rango que va de -33.44 a 117.97 kg; mientras que sobreestima la ganancia de peso en sólo 1 kg (+/- 6.91 kg) de media con respecto a las determinaciones de la báscula de la EEA dentro de un rango que va de -45.31 a 42.12 kg. Lo que explica los menores valores de eficiencia calculados según los MC.

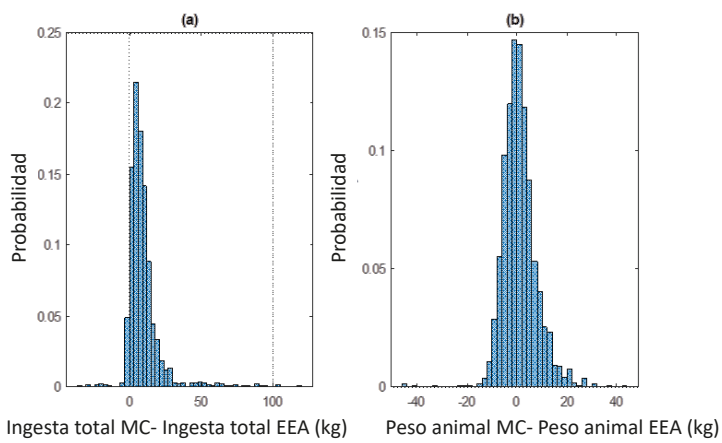


Figura 3. Histograma de (a) diferencias entre las ingestas totales (kg); (b) diferencias entre las ganancias de peso de los animales según los modelos de crecimiento (MC) y las estaciones electrónicas de alimentación (EEA).

El análisis de las curvas de ingesta y las del peso del animal, con registros agregados por día, según las estimaciones de las EEA y las de los MC, permitió identificar situaciones en las que las curvas diferían durante un periodo de tiempo de varios días. La Figura 4 muestra la ingesta diaria (a) y la ganancia de peso (b) correspondientes al cebo de un animal durante la primavera de 2019.

Se observa que durante el periodo comprendido entre el 25 de mayo y el 4 de junio, se produce un ayuno que es registrado por la EEA, pero que se obvia en la curva considerada para el cálculo de la eficiencia según los MC; análogamente en torno al 9 de julio vuelve a producirse un acusado descenso de la ingesta.

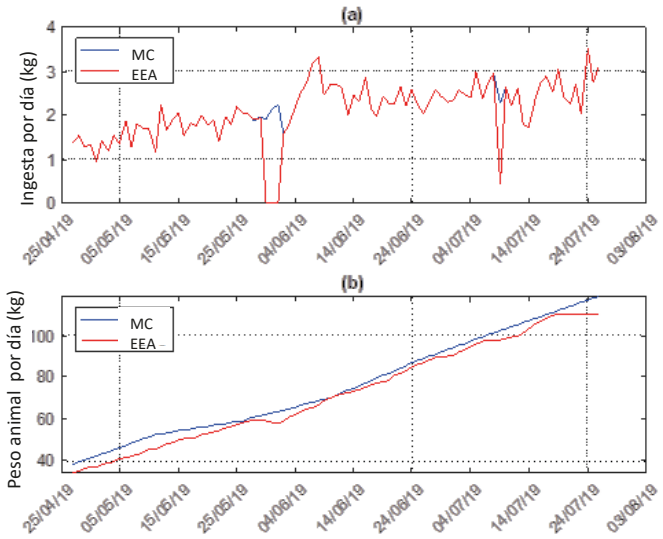


Figura 4. Ejemplo de un animal que presenta un periodo de ayuno: (a) detalle de la ingesta por día y (b) peso del animal por día según las estaciones electrónicas de alimentación (EEA) y según los modelos de crecimiento (MC).

Los ayunos se corroboran con una pérdida de peso del animal inmediatamente posterior a los mismos, lo que se aprecia claramente en la Figura 5, un detalle del periodo de ayuno del animal presentado en la Figura 4.

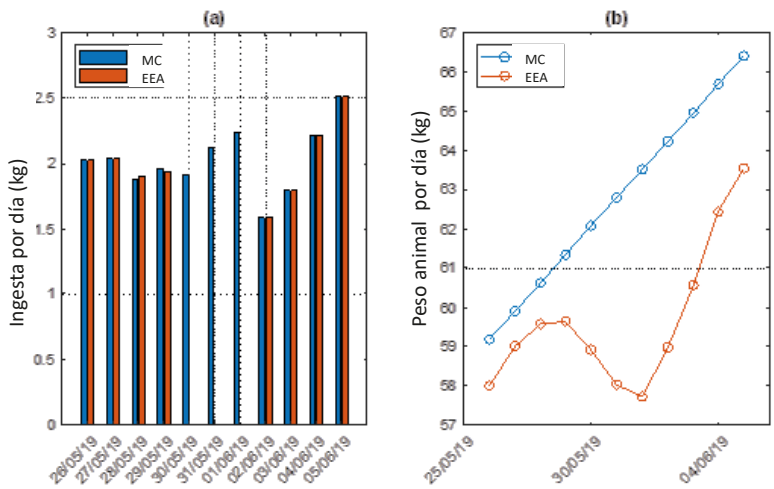


Figura 5. Detalle del periodo de ayuno (días del 25/05/2019 al 04/06/2019) del animal de la Figura 4:(a) detalle de la ingesta por día y (b) pesos del animal por día según las estaciones electrónicas de alimentación (EEA) y según los modelos de crecimiento (MC).

Definiéndose un día de ayuno como aquel en el que el animal ingiere una cantidad inferior a 300 gramos, la Figura 6 presenta la probabilidad de ayunos de diferente duración. La ocurrencia de ayunos prolongados (más de 6 días consecutivos con ingestas inferiores a 300 gramos) son poco frecuentes afectando sólo al 2.2% de la población. Ayunos de más de dos días consecutivos son más frecuentes afectando a un 24.3% de los animales.

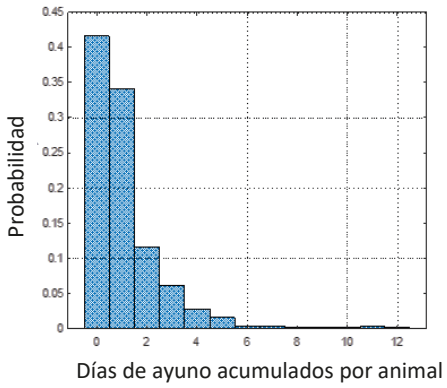


Figura 6. Probabilidad de ocurrencia de ayunos de diferentes días de duración.

El efecto de los ayunos en la estimación de la eficiencia por MC se observa en la Figura 7 c, en la que al eliminar los animales que han sufrido algún ayuno de dos días o más, mejoran todos los indicadores de la correlación entre las eficiencias MC y las eficiencias EEA, aumentando el coeficiente de correlación hasta 0.65, y disminuyendo el intercepto y aumentando la pendiente de 0.56 a 0.69 en el ajuste.

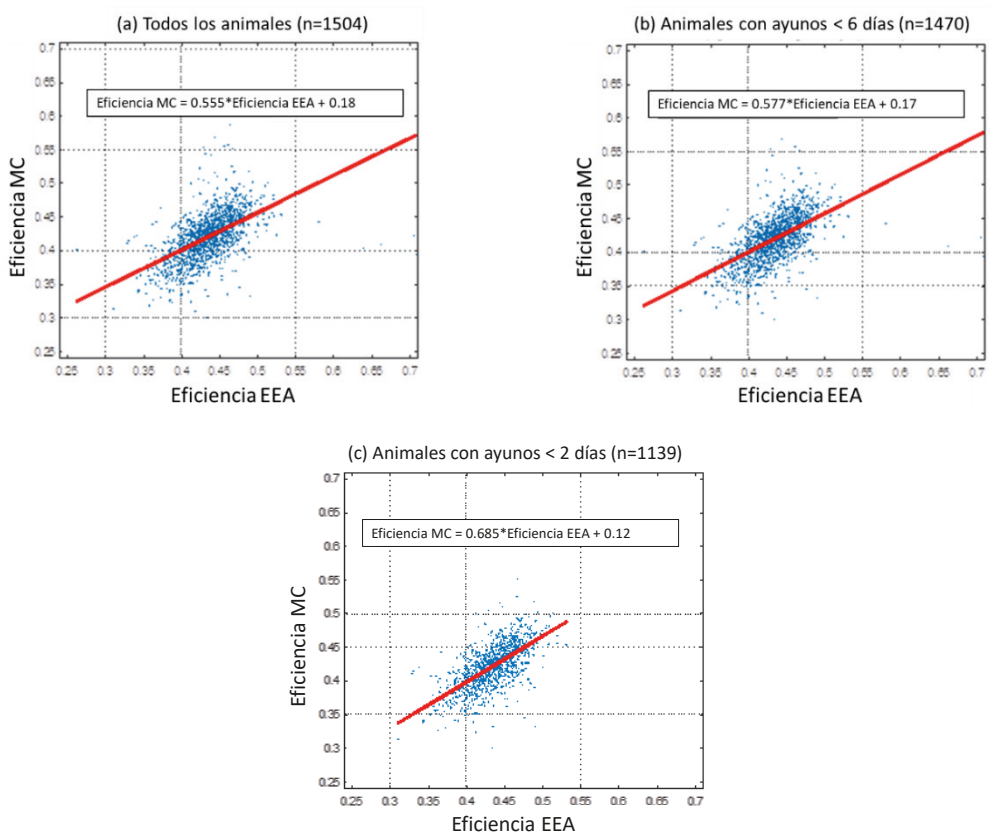


Figura 7. Gráfico de dispersión de las eficiencias EEA y las eficiencias CM, considerando: (a) todos los animales (r = 0.55); (b) aquellos animales sin ayuno o con ayunos de duración inferior a 6 días (r = 0.57); (c) aquellos animales sin ayuno o con ayunos de duración inferior a 2 días (r = 0.65).

Al seleccionar el 10% de los animales con mayor eficiencia según los MC y las EEA, se observa que sólo una parte de los seleccionados son comunes a ambos procedimientos. Si se considera la totalidad de los animales (1 504), se observa que el porcentaje de animales comunes el del 35.33% (53 del total de 150 con mayores eficiencias); al eliminar los animales con ayunos superiores a dos días (se consideran 1 139), el porcentaje de animales incluidos en el 10% de los más eficientes tanto por las EEA como por los MC asciende al 40.36% (46 animales de 114). Esto demuestra que en el segundo caso se han eliminado los animales que, por sufrir ayunos, son clasificados como de baja eficiencia según los MC, pero que logran reponerse en los días posteriores al ayuno, acabando su periodo de cebo con eficiencias del primer decil según las EEA.

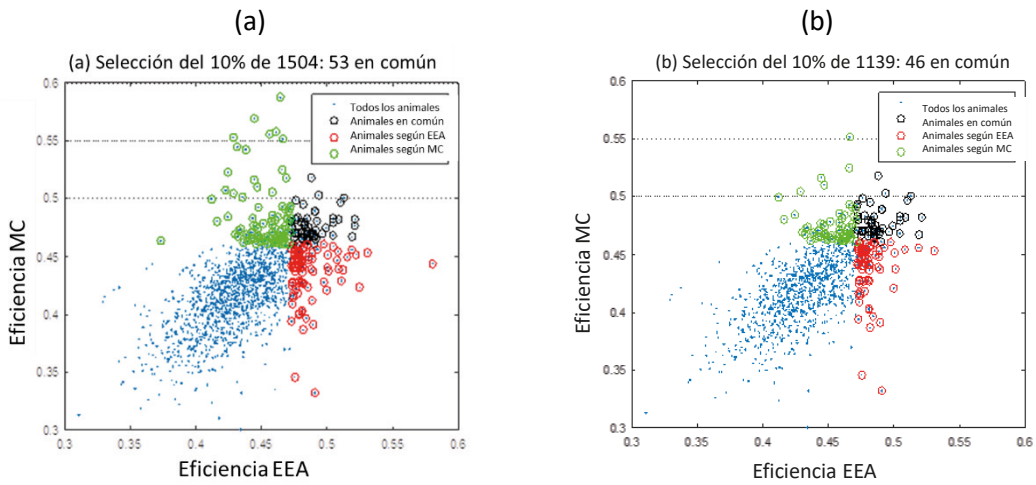


Figura 8. Gráficos de dispersión de las eficiencias MC y las eficiencias EEA; en rojo, verde y negro se rodean los animales incluidos en el 10% de mayores eficiencias, en negro los seleccionados según MC y EEA, en rojo los seleccionados según EEA y en verde los seleccionados según MC. Incluyendo todos los animales (a), eliminando los animales con ayunos superiores a dos días (b).

4. Conclusiones

Las estaciones electrónicas de alimentación son equipos costosos que las granjas utilizan para llevar a cabo un seguimiento individualizado de los animales. En los programas de mejora, la identificación de los animales de mayor eficiencia en la transformación de alimentos es un objetivo prioritario. Para lograrlo combinan la información suministrada por las estaciones electrónicas de alimentación con la derivada de modelos de crecimiento previamente ajustados según la línea de animales, o la época del año, entre otros factores. En este trabajo se ha constatado que con esta práctica se eliminan eventos poco frecuentes pero posibles, al sustituir valores de ingesta y peso corporal recogidos por las estaciones por valores interpolados según los modelos de crecimiento.

Se llega así a una doble estimación de la eficiencia, una derivada únicamente de los registros depurados de las estaciones de alimentación y otra de los modelos de crecimiento. Se ha comprobado que selección de animales según eficiencias determinadas solo por el modelo de crecimiento deja fuera a individuos con eficiencias reales según estaciones por encima de 0.47. La consideración de ambas en la clasificación de animales según su eficiencia daría lugar a procedimientos de selección más robustos.

5. Agradecimientos

Trabajo financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades "Desarrollo de una PRoducción porcina más sostenible a través de la mejora del ÍNdice de ConvErsión (PRINCE)" RTC-2017-5977-2 y Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

1. Garrido-Izard M., Correa E.C., Requejo J.M., Villarroel M., Diezma B. Cleansing data from an electronic feeding station to improve estimation of feed efficiency. Biosystems Engineering. 2022, 224, 361-369.
2. Emmans G. Genetic components of potential and actual growth. BSAP Occasional Publication. 1988, 12, 153-181.
3. Wellock I., Emmans G., Kyriazakis, I. Describing and predicting potential growth in the pig. Animal Science. 2004, 78(3), 379-388.
4. Luo J, Lei H, Shen L, Yang R, Pu Q, Zhu K, Li M, Tang G, Li X, Zhang S, Zhu L. Estimation of Growth Curves and Suitable Slaughter Weight of the Liangshan Pig. Asian-Australas J Anim Sci. 2015, 28(9), 1252-1258.
5. Guixin Li, Xinliang Liu, Yafang Ma, Bingbing Wang, Lihua Zheng, Minjuan Wang. Body size measurement and live body weight estimation for pigs based on back surface point clouds. Biosystems Engineering. 2022, 218, 10-22.



Tecnología de Poscosecha / Tecnologia Pós-colheita



Aprovechamiento de residuos de aguacate para la obtención de octoxinoles y ácido cianúrico, y su valorización como biorracionales

A. Corrêa-Guimarães[1], E. Sánchez-Hernández[1], J. Martín-Gil[1], P. Martín-Ramos[1] , y R. Gavara[2].

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia; adriana.correa@uva.es (A.C.-G.); eva.sanchez.hernandez@uva.es (E.S.-H.); mgil@iaf.uva.es (J.M.-G.); pmr@uva.es (P.M.-R.)

[2] Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, CSIC, Grupo de Envases, 46980 Paterna, España, rgavara@iata.csic.es (R.G)

Abstract: In the processing of avocados, approximately 27-35% of the fruit's weight is discarded as waste in the form of peels and seeds. However, these byproducts can be effectively utilized to produce bioproducts, aligning with the sustainable and efficient practices of the circular economy. This study focuses on the extraction of phytochemicals from avocado peels and seeds using ultrasonication. Two extraction mediums are explored: an aqueous ammonia medium and a natural deep eutectic solvent (choline chloride:urea). The extracted compounds are then characterized using infrared spectroscopy and gas chromatography-mass spectrometry techniques. Extraction using an aqueous ammonia medium yields octylphenol ethoxylates, which find applications in the manufacturing of wetting agents, emulsifiers, defoamers, and detergents. On the other hand, extraction with choline chloride:urea primarily yields cyanuric acid, which serves as a precursor or component in the production of disinfectants, herbicides, and bleaches. Additionally, the ammoniacal extracts demonstrate antimicrobial properties in *in vitro* tests conducted against two avocado phytopathogens, namely *Xanthomonas vesicatoria* and *Phytophthora cinnamomi*. Thus, these extracts show potential as biorational agents.

Palabras clave: antibacteriano; economía circular; NADES; oomiceticida; ultrasonidos

1. Introducción

El aguacate (*Persea americana* Mill) es un fruto altamente apreciado por su sabor y propiedades nutricionales, siendo un alimento rico en grasas saludables, vitaminas y minerales. Sin embargo, durante su procesamiento, se generan grandes cantidades de residuos, como pieles y semillas, que representan un 27-35% en peso [1]. Estos residuos, a menudo desechados, poseen un potencial significativo debido a su contenido en compuestos bioactivos, como polifenoles, carotenoides y tocoferoles [2], además de polímeros naturales como la celulosa, el almidón o la pectina [3]. Estos compuestos pueden ser utilizados en diversas aplicaciones, como la producción de aceites esenciales, colorantes naturales, productos cosméticos, y suplementos alimenticios, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia de la industria agroalimentaria, en consonancia con los principios de la economía circular.

Existen diversas técnicas para la extracción de fitoquímicos de las pieles y semillas de aguacate, que pueden clasificarse en métodos clásicos y emergentes. Entre los métodos clásicos, se encuentran la extracción sólido-líquido con disolventes orgánicos [4] y la extracción por prensado en frío. Estos métodos, aunque efectivos, pueden presentar desventajas como la co-extracción de compuestos no deseados y la degradación térmica de los compuestos bioactivos.

Por otro lado, las técnicas emergentes, como la extracción asistida por ultrasónidos o microondas ofrecen ventajas en términos de rendimiento, tiempo y temperatura de extracción, calidad del extracto y sostenibilidad [5].

En el presente estudio se aborda la extracción asistida por ultrasonidos en dos medios no ensayados hasta la fecha, medio amoniacal y un sistema de disolvente eutéctico profundo natural (NADES) basado en cloruro de colina y urea, y la caracterización de los extractos obtenidos mediante espectroscopía infrarroja y cromatografía de gases-espectroscopía de masas (GC-MS). El medio amoniacal puede eliminar los grupos acetilo de los polímeros de xilano, reducir la cristalinidad de la celulosa, descomponer selectivamente y eliminar la lignina de los sustratos, aumentar la porosidad y liberar pequeñas cantidades de compuestos que causan la degradación del azúcar. Entre sus ventajas se incluyen la asequibilidad, la no corrosividad, la no contaminación, la seguridad y la reciclabilidad [6]. En cuanto a los NADES, son capaces de disolver una amplia gama de compuestos, incluidos fármacos, productos naturales, polímeros y biomoléculas, siendo considerados un medio de disolución y extracción versátil en diversas aplicaciones, como la industria farmacéutica, la química analítica, la biotecnología y la producción de alimentos. Además de su capacidad de disolución, los NADES también pueden exhibir propiedades físicas y químicas únicas, como la alta estabilidad térmica, la baja volatilidad y la capacidad de formar estructuras supramoleculares.

Con vistas a la valorización de los extractos, se han ensayado *in vitro* su actividad frente a dos importantes fitopatógenos del aguacate: *Xanthomonas vesicatoria*, que causa el cancro bacteriano, y *Phytophthora cinnamomi*, un oomiceto que causa la pudrición de la raíz (la enfermedad más destructiva e importante de este cultivo en todo el mundo).

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras de fruto, reactivos y fitopatógenos

Para la obtención de muestras compuestas de piel y semilla de aguacate, se mezclaron muestras de exocarpio y semilla de 10 aguacates de variedad Hass (origen Chile). En laboratorio se separaron la piel, la pulpa y la semilla, descartándose la pulpa. Para reducir su humedad, las muestras se secaron a 65 °C durante 24 horas, procediendo después a su trituración.

El cloruro de colina (CAS 67-48-1), la urea (CAS 57-13-6), el agar de triptona de soja (TSA) y el caldo de triptona de soja (TSB) se adquirieron de Sigma-Aldrich Química (Madrid); mientras que el agar de dextrosa de patata (PDA) fue suministrado por Becton Dickinson (Bergen County, NJ, EE.UU.).

El aislado de *Phytophthora cinnamomi* fue suministrado por el Centro de Sanidad Forestal de Calabazanos (Villamuriel de Cerrato, Palencia). La cepa de *Xanthomonas vesicatoria* (Doidge) Vauterin et al. (cepa CITA Xv-5) fue suministrada por el Laboratorio de Bacteriología del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA, Zaragoza) como subcultivo en TSA.

2.2. Preparación de extractos de piel y semilla de aguacate

Para la extracción en medio amoniacal, se dispersaron 4,31 g de semilla en 100 mL de solución acuosa de amoníaco (25 mL de amoniaco anhidro + 75 mL de agua) y se sonicaron durante 1 h (sin superar los 40 °C) usando un ultrasonicador tipo sonda (modelo UIP1000hdT; Hielscher Ultrasonics, Teltow, Alemania). La solución se dejó reposar 24 h, se centrifugó a 9000 rpm durante 15 min y el sobrenadante se filtró con papel Whatman n.º 1. Tras liofilización, el rendimiento de extracción fue del 28,2%. En el caso de la piel, se partió de 2,70 g y el procedimiento de extracción fue similar, pero se procedió a neutralizar la solución a pH neutro empleando ácido acético. El rendimiento de extracción en este caso fue del 65,4%.

Para la extracción en NADES, se optó por cloruro de colina:urea (relación 1:2 molar), empleando 57,3 g de cloruro de colina y 49,3 g de urea. En 8 mL del NADES fundido, se sumergieron 1,74 g de muestra de semilla, seguido de agitación durante 24 h a 70 °C, y sonicación durante 3 min. A continuación, se adicionó 20 mL de metanol, sonicando otros 3 min, y dejando reposar el gel resultante durante 24 h. En el caso de la muestra de piel, el procedimiento fue idéntico, partiendo de 0,468 g en 5 mL de NADES.

2.3. Procedimientos de caracterización

Los espectros vibracionales de los materiales de partida y de los extractos se registraron utilizando un espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) Nicolet iS50 de Thermo Scientific (Waltham, MA, EE.UU.) equipado con un sistema de reflectancia total atenuada (ATR), en el intervalo 400–4000 cm^{-1}, con una resolución espectral de 1 cm^{-1}.

Los extractos se analizaron por GC–MS en los Servicios de Apoyo a la Investigación (STI) de la Universidad de Alicante utilizando un cromatógrafo de gases Agilent Technologies modelo 7890A acoplado a un espectrómetro de masas de cuatro polos modelo 5975C. Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: volumen de inyección = 1 µL; temperatura del inyector = 280 °C, en modo *splitless*; temperatura inicial del horno = 60 °C, durante 2 min, seguida de una rampa de 10 °C/min hasta una temperatura final de 300 °C, durante 15 min. La columna cromatográfica utilizada para la separación de los compuestos fue una columna HP-5MS UI de Agilent Technologies con una longitud de 30 m, un diámetro de 0,250 mm y un espesor de película de 0,25 µm. Las condiciones del espectrómetro de masas fueron las siguientes: temperatura de la fuente de impacto de electrones del espectrómetro de masas = 230 °C; temperatura del cuadrupolo = 150 °C; energía de ionización = 70 eV. La identificación de los componentes se basó en la comparación de sus espectros de masas y tiempos de retención con los de los compuestos auténticos y en el cotejo informático con la base de datos del National Institute of Standards and Technology (NIST11).

2.4. Evaluación de la actividad antimicrobiana in vitro

La actividad antibacteriana de los extractos obtenidos en medio amoniacal se evaluó según la norma M07−11 del Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI), utilizando el método de dilución en agar para determinar la concentración mínima inhibitoria (CMI). Inicialmente, las colonias de *X. vesicatoria* se incubaron a 28 °C durante 48 h en TSB. Posteriormente, se realizaron diluciones seriadas, partiendo de una concentración de 10^8 UFC·mL^{-1}, hasta alcanzar un inóculo final de 10^4 UFC·mL^{-1}. La suspensión bacteriana se extendió sobre la superficie de placas de TSA a las que se había añadido previamente el extracto, a concentraciones de entre 62,5 y 1.500 µg·mL^{-1}. A continuación, las placas se incubaron a 28 °C durante 48 h. La CMI se determinó como la concentración más baja del extracto en la que no se observó crecimiento bacteriano. Todos los experimentos se repitieron tres veces, con tres placas por tratamiento y concentración.

La actividad oomiceticida se determinó mediante el método de dilución en agar, de acuerdo con los procedimientos estándar de las pruebas de susceptibilidad antifúngica EUCAST. Se incorporaron alícuotas de solución madre al medio PDA para obtener concentraciones finales de entre 62,5 y 1500 µg·mL^{-1}. Se transfirieron tapones de micelio (⌀ = 5 mm), procedentes del margen de cultivos de 1 semana de edad de *P. cinnamomi*, al centro de placas de PDA con las concentraciones mencionadas de extracto (tres placas por tratamiento y concentración, con dos duplicados). Las placas se incubaron a 25 °C en la oscuridad durante una semana. El medio PDA sin ninguna modificación se utilizó como control. La inhibición del crecimiento micelial se estimó según la fórmula $((d_c - d_t) / d_c) \times 100$, donde d_c y d_t representan los diámetros medios de las colonias fúngicas de control y tratadas, respectivamente. Las concentraciones eficaces (CE_{50} y CE_{90}) se determinaron mediante análisis PROBIT en SPSS Statistics v.25 (IBM, Nueva York, NY, EE.UU.).

3. Resultados y discusión

3.1. Espectros FTIR

Las bandas presentes en los espectros de pieles y semilla de aguacate y sus extractos en medio amoniacal (Tabla 1) corresponden a modos de tensión de grupos funcionales propios de fenoles, éteres, ésteres y ácido cianúrico.

Tabla 1. Principales bandas en los espectros ATR-FTIR de los productos de partida y los extractos en medio amoniacal, expresadas en números de onda (cm^{-1}).

Residuo de partida		Extractos NH_3(aq)		
Piel	**Semilla**	**Piel**	**Semilla**	**Asignación**
3339				tensión N-H
	3269			tensión del grupo N-H
		3182	3209	tensión N-H degenerada
		3034		tensión C-H; deformación N-H (ácido cianúrico)
2919		2933	2940	tensión asimétrica CH_3
2850		2865		tensión simétrica CH_3
1739				tensión C=O en ésteres y glicéridos
	1653	1694		tensión C=O en cetonas, aldehídos y ésteres
1624				C=C en aril sustituidos
1520	1558	1545	1558	tensión simétrica C=N (presente en ácido cianúrico)
1444	1406	1400	1406	deformación N-H en el plano
1327	1334		1335	deformación -CH_2-
	1311		1311	tensión C-O de ácidos carboxílicos
1246	1262	1268	1262	tensión C-O-C en éteres
	1204		1204	tensión C-O en fenol
1100	1079		1079	tensión simétrica de grupos OCH_3
1031		1046		tensión C-O (característica de ácido cianúrico)
	1017	1015	1017	C-H en aromáticos
	875	884	875	deformación C-O
		654		deformación -O-C=O
	609	619	610	aromáticos
			572	deformación -N-C=O
	522	492		deformación grupo CO
		449	445	balanceo grupo NH_2

3.2. Composición de los extractos obtenidos en medio amoniacal

El tratamiento en medio amoniacal conduce, en el caso de las pieles de aguacate, a una mezcla de acetamida, acetamida derivados y octilfenoles etoxilatos; y, en el caso de la semilla, principalmente a octilfenoles etoxilatos (ver Tabla 2). La presencia de acetamida en el extracto de la piel se debe a la descomposición del acetato amónico formado al neutralizar el exceso de amoniaco del extracto con ácido acético (en el extracto amoniacal de semillas, que no fue neutralizado, no aparece la acetamida). Los derivados de la acetamida son potenciales agentes antimicrobianos y antifúngicos, usados como desinfectantes [7]. La presencia de octilfenol y los octilfenoles etoxilados se debe a un proceso de etoxilación de fenoles (la etoxilación implica la reacción del fenol con óxido de etileno para introducir grupos etoxi (-OCH_2CH_2-) en la estructura molecular). Se trata de sustancias usadas principalmente en la fabricación de detergentes, emulsificantes, agentes humectantes y desespumantes, y, en menor medida, en pesticidas. En concreto, los octoxinoles u octilfenoxipolietoxietanoles son surfactantes no iónicos que varían en

el número de grupos etoxi (oxi-1,2-etanodílicos) que se repiten (es el caso de octoxinol-2 y octoxinol-3). El origen del etileno implicado en la etoxilación debe referirse a un origen natural: la producción media de etileno de los frutos de aguacate es de 10 $\mu L \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ [8], pero la sonicación y el medio básico acelerarían su producción.

Tabla 2. Principales especies químicas identificadas por GC-MS en los extractos en medio amoniacal

Especie química identificada	Piel	Semilla
acetamida	46,4%	
4-acetamidobenzofuroxano	7,4%	
4-acetamidofenil(fenil)acetileno	4,5%	
4-tert-octilfenol (o 4-(1,1,3,3-tetramethilbutil)-fenol)	2,6%	12,4%
4-tert-octilfenol etoxilato		18,5%
4-tert-octilfenol dietoxilato (u octoxinol-2)	7,5%	30,1%
4-tert-octilfenol trietoxilato (u octoxinol-3)	9,4%	20,4%
8-metoxi-2,4-difenilquinolina		17,0%
N-[2-(phenylethynyl)phenyl]-acetamide	4,5%	
N-methyl-1-adamantanoacetamida	2,2%	

3.3. Composición de los extractos obtenidos en líquidos iónicos

Respecto a los extractos en NADES, las principales especies químicas identificadas se recogen en la Tabla 3. Los extractos de semilla y piel comparten la presencia de ácido cianúrico (48,5-65,7%), 1-amino-2-metilnaftaleno (6,2-8,7%), aciridinas (1,5-4,2%), piperazinas (4,3-6,1%) y N,N-dimetilaminoetanol (0,9-1,5%). Por otra parte, son compuestos específicos del extracto de la semilla la butanimidamida (2,9%) y el *o*-butyl isopropilfosfonocloridato (2,0%); y del extracto de las pieles los ésteres de los ácidos carbámico (12,6%) y glutárico (5,2%).

Especies químicas presentes en el extracto de la semilla de aguacate susceptibles de valoración son ácido cianúrico (forma trímera del ácido ciánico, presente también en el extracto de la piel) y 1-amino-2-metilnaftaleno. El ácido cianúrico es empleado como precursor o componente de blanqueadores, desinfectantes y herbicidas, mientras que el 1-amino-2-metilnaftaleno es un precursor de polímeros electroactivos con aplicaciones como protectores de la corrosión, sensores químicos y dispositivos electrocrómicos [9]. La presencia en la piel de ésteres del ácido carbámico presumiblemente es debida a contaminación (plagicidas).

Tabla 3. Principales especies químicas identificadas por GC-MS en los extractos en NADES.

Especie química identificada	Piel	Semilla
ácido cianúrico	48,5%	65,7%
ésteres del ácido carbámico	12,6%	
1-amino-2-metilnaftaleno	6,2%	8,7%
derivados del ácido piperazina-1-carboxílico	5,2%	3,4%
3-heptil éster del ácido glutárico	5,2%	
N-[3-methilaminopropil]aziridine		3,4%
butanimidamida		2,9%
o-butyl isopropilfosfonocloridato		2,0%
N,N,N'-trimetil-1,3-propanodiamine	1,8%	
2,4,5-trifluorobenzonitrilo	1,5%	
N-[dimetilaminometil]aziridina	1,5%	0,8%
N,N-dimetilaminoetanol	0,9%	1,5%
N-metilhomopiperazina	0,9%	0,9%
N,N'-bis(1,1-dimetiletil)-urea	1,4%	

3.4. Actividad antimicrobiana

Respecto a la actividad antibacteriana de los extractos en medio amoniacal frente a *X. vesicatoria*, las CMIs fueron de 500 y 1500 μg·mL^{-1} para los extractos de piel y semilla, respectivamente. En cuanto a la actividad oomiceticida frente a *P. cinnamomi* (Figura 1), las concentraciones efectivas CE_{50} y la CE_{90} del extracto de pieles (135,9 y 175,8 μg·mL^{-1}, respectivamente) fueron menores que las del extracto de semilla (307,3 y 453,8 μg·mL^{-1}, respectivamente). La mayor eficacia del extracto de la piel puede atribuirse, en parte, a la presencia de acetamida. En comparación con las CMIs referidas en la bibliografía para otros productos naturales, la eficacia de los extractos frente a *X. vesicatoria* sería comparable a las de los extractos de hojas de *Ginkgo biloba* (1000 μg·mL^{-1}) [10]; y frente a *P. cinnamomi* sería inferior a la del extracto amoniacal de corteza de *Quercus ilex* subsp. *ballota* (78 μg·mL^{-1}) [11] y a la de los extractos de *Opuntia ficus-indica* (EC_{90} = 121,7 μg·mL^{-1}) [12], y comparable –en el caso del extracto de las pieles– a la de extractos de *Flourensia cernua* (EC_{90} = 193,4 μg·mL^{-1}) [12] y aceite esencial de *Thymus vulgaris* (MIC = 200 μg·mL^{-1}) [13], que se cuentan entre las más bajas hasta la fecha.

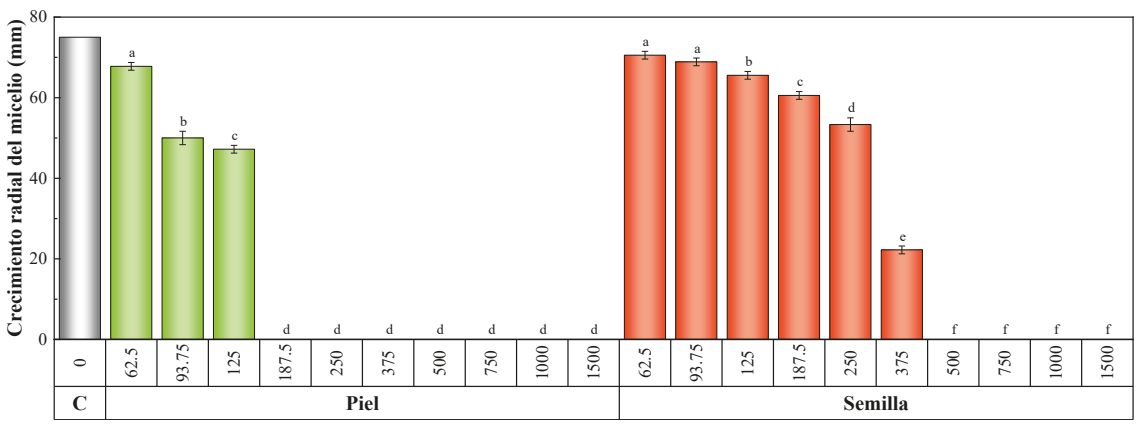


Figura 1. Resultados de los ensayos *in vitro* de inhibición del crecimiento de *P. cinnamomi* empleando extractos amoniacales de piel y semilla de aguacate.

4. Conclusiones

La extracción asistida con ultrasonidos de residuos de aguacate (piel y semilla) permite, cuando se realiza en un medio amoniacal, obtener octilfenoles etoxilatos, empleados en la fabricación de detergentes, emulsificantes, agentes humectantes y desespumantes, y, en menor medida, en pesticidas. Si se opta por un NADES como medio de extracción, se obtiene principalmente ácido cianúrico (empleado como precursor o componente de blanqueadores, desinfectantes y herbicidas). Los extractos amoniacales pueden ser susceptibles de valorización como biorracionales para la protección del propio cultivo del aguacate, en tanto en cuanto presentan actividad antibacteriana (con CMIs de 500 y 1500 μg·mL^{-1} frente a *X. vesicatoria*) y oomiceticida (con valores de CE_{90} de 176 y 454 μg·mL^{-1} frente a *P. cinnamomi*).

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Union Europea, Programa Horizonte Europa (HORIZON-CL6-2022-FARM2FORK-01) por la financiación del proyecto "Agro-ecological strategies for resilient farming in West Africa (CIRAWA)" ID: 101084398.

Referencias

1. Rojas-García, A.; Fuentes, E.; Cádiz-Gurrea, M.d.l.L.; Rodriguez, L.; Villegas-Aguilar, M.d.C.; Palomo, I.; Arráez-Román, D.; Segura-Carretero, A. Biological evaluation of avocado residues as a potential source of bioactive compounds. *Antioxidants* **2022**, *11*, 1049, doi:10.3390/antiox11061049.
2. Lyu, X.; Agar, O.T.; Barrow, C.J.; Dunshea, F.R.; Suleria, H.A.R. Phenolic compounds profiling and their antioxidant capacity in the peel, pulp, and seed of Australian grown avocado. *Antioxidants* **2023**, *12*, 185, doi:10.3390/antiox12010185.
3. Merino, D.; Bertolacci, L.; Paul, U.C.; Simonutti, R.; Athanassiou, A. Avocado peels and seeds: Processing strategies for the development of highly antioxidant bioplastic films. *ACS Applied Materials & Interfaces* **2021**, *13*, 38688-38699, doi:10.1021/acsami.1c09433.
4. Sridhar, A.; Ponnuchamy, M.; Kumar, P.S.; Kapoor, A.; Vo, D.-V.N.; Prabhakar, S. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: a review. *Environmental Chemistry Letters* **2021**, *19*, 3409-3443, doi:10.1007/s10311-021-01217-8.
5. Trujillo-Mayol, I.; Céspedes-Acuña, C.; Silva, F.L.; Alarcón-Enos, J. Improvement of the polyphenol extraction from avocado peel by assisted ultrasound and microwaves. *Journal of Food Process Engineering* **2019**, *42*, 1–11, doi:10.1111/jfpe.13197.
6. Zhang, H.; Wu, J. Statistical optimization of aqueous ammonia pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn cob powder for enhancing sugars production. *Biochem. Eng. J.* **2021**, *174*, 108106, doi:10.1016/j.bej.2021.108106.
7. Katke, S.; Amrutkar, S.; Bhor, R.; Khairnar, M. Synthesis of biologically active 2-chloro-N-alkyl/aryl acetamide derivatives. *Int. J. Pharm. Sci. Res* **2011**, *2*, 148-156.
8. Adato, I.; Gazit, S. Water-deficit stress, ethylene production, and ripening in avocado fruits. *Plant Physiology* **1974**, *53*, 45-46, doi:10.1104/pp.53.1.45.
9. Ciric-Marjanovic, G.; Cvjeticanin, N.; Mentus, S.; Budinski-Simendic, J.; Krakovsky, I. Electrochemical polymerization of 2-methyl-1-naphthylamine. *Polym. Bull.* **2003**, *50*, 319-326, doi:10.1007/s00289-003-0174-8.
10. Sánchez-Hernández, E.; González-García, V.; Palacio-Bielsa, A.; Lorenzo-Vidal, B.; Buzón-Durán, L.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Antibacterial activity of *Ginkgo biloba* extracts against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, *Pseudomonas* spp., and *Xanthomonas vesicatoria*. *Horticulturae* **2023**, *9*, 461, doi:10.3390/horticulturae9040461.
11. Sánchez-Hernández, E.; Balduque-Gil, J.; Barriuso-Vargas, J.J.; Casanova-Gascón, J.; González-García, V.; Cuchí-Oterino, J.A.; Lorenzo-Vidal, B.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Holm oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) bark aqueous ammonia extract for the control of invasive forest pathogens. *Int. J. Mol. Sci.* **2022**, *23*, 11882, doi:10.3390/ijms231911882.
12. Castillo-Reyes, F.; Clemente-Constantino, J.A.; Gallegos-Morales, G.; Rodríguez-Herrera, R.; Noé, C. In vitro antifungal activity of polyphenols-rich plant extracts against *Phytophthora cinnamomi* Rands. *African Journal of Agricultural Research* **2015**, *10*, 4554-4560.
13. Giamperi, L.; Fraternale, D.; Ricci, D. The *in vitro* action of essential oils on different organisms. *J. Essent. Oil Res.* **2002**, *14*, 312-318.



Consecuencias ambientales de la extensión de la vida útil: envasado convencional versus activo para ensaladas

D.A. Murcia-Velasco[1], R. Villanova-Estors[2], A. Correa-Guimaraes[1], G. López-Carballo [2], R. Gavara[2]

[1] Universidad de Valladolid, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, 34004, Palencia, España, dianaalexandra.murcia@uva.es, adriana.correa@uva.es

[2] Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, CSIC, Grupo de Envases, 46980, Paterna, España, raquel.villanova@iata.csic.es, glopez@iata.csic.es, rgavara@iata.csic.es

Abstract: The use of coatings in fresh food packaging is an innovative technique that extends the shelf life of the product and reduces food waste. The objective of the study is the analysis of the environmental performance during the life cycle of a modified packaging (AP) with an active component, oregano essential oil (OEO), inhibitor of microbial growth in an EVOH matrix for the packaging of minimally processed fresh products, in this case salad mix. For this purpose, a life cycle analysis (LCA) was carried out based on ISO 14040 and 14044, using the ReCiPe methodology. A comparison was made between its manufacture and use in relation to a conventional packaging (CP). The results showed that the use of the AP packaging has a beneficial performance due to the reduction in the amount of food produced and therefore in the resources and energy consumed during the same period compared to the use of the conventional packaging.

Palabras clave: active packaging, environmental performance, fresh product packaging, LCA, sustainable production.

1. Introducción

Las emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas agroalimentarios comienzan durante la producción y son debidas a múltiples factores como el uso de combustibles fósiles en las maquinarías empleadas, el empleo de fertilizantes, la rotación de cultivos y la gestión de los residuos agrícolas. Posteriormente a la producción agrícola, el impacto ambiental está causado principalmente por los diversos procesos de la cadena de suministro, transporte, envasado, consumo doméstico y desperdicios. Entre 2000 y 2020, la aportación de los sistemas agroalimentarios en las emisiones totales de gases de efecto invernadero disminuyó del 39 % al 31 %, a nivel global. Europa mostró una tendencia creciente entre 2000 (28 %) y 2019 (32 %), pero la aportación disminuyó al 27 % en 2020 [1].

Las pérdidas y el desperdicio de alimentos (PDA) son señal del funcionamiento deficiente de los sistemas agroalimentarios. Únicamente entre las fases de la postcosecha y la venta minorista se pierde hasta el 14 % de los alimentos que se producen en todo el mundo, mientras que el 17% del total de la producción mundial de alimentos puede desperdiciarse en las etapas de la venta al por menor [2], por lo que la utilización de envases apropiados y más sostenibles

ayudarían a minimizar esas pérdidas. Además, las mejoras introducidas de cara a reducir las PDA pueden contribuir al logro de muchos otros Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el ODS 2 (Hambre cero); el ODS 6 (Gestión sostenible del agua); el ODS 8 (Trabajo decente y crecimiento económico); el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles); el ODS 12 (Consumo y producción responsables); el ODS 13 (Cambio climático); el ODS 14 (Recursos marinos) y el ODS 15 (Ecosistemas terrestres, bosques, tierras y biodiversidad) [3].

Según el Waste and Resources Action Programme (WRAP) [4], en el año de 2012 el porcentaje de residuo alimentario proveniente de lechuga y ensaladas fue de casi 9% considerando todos los vegetales frescos consumidos.

La huella de carbono a lo largo de la cadena de producción de alimentos se acumula a medida que los productos se mueven a lo largo de la misma. Como consecuencia, la etapa de consumo tiene mayor impacto. Cuando se analizan los desperdicios alimentarios, las verduras son un hot spot en la contribución de la Huella de carbono debido al alto porcentaje de producto perdido o desperdiciado [5]. En el mismo informe, se considera que el envasado de alimentos puede ayudar a evitar la pérdida de alimentos ya que puede alargar su vida útil reduciendo así su desperdicio. A pesar de que la producción y eliminación de envases también puede dañar el medio ambiente, el resultado de la compensación dependerá del impacto ambiental del alimento, así como los materiales de envase utilizados.

La tasa de reciclaje de los residuos de envases en 2020 en la Unión Europea (27) fue del 64% y en España del 68%, siendo que la tasa de reciclado de envases, que cuenta exclusivamente el material que se recicla en plástico (reciclado/generación de material), del 37,6 % en la Unión Europea (27) y del 51,4 % en España en el mismo año [6].

Plásticos y envases

Actualmente, los envases fabricados mayoritariamente con polímeros convencionales derivados del petróleo y la mala gestión de sus residuos ha derivado en un gran impacto medioambiental por lo que, en el mercado están emergiendo nuevos materiales biobasados y compostables capaces de lograr reducir el desperdicio alimentario y los desechos provenientes del propio envase [7,8], aunque sus propiedades mecánicas, barrera, y su higroscopicidad, no los hacen lo suficientemente eficientes para el envasado de todo tipo de productos. Por ello, se está trabajando en la utilización de materiales y combinaciones de materiales que permitan procesos de recogida, selección y reciclado más sostenible.

Otra de las tendencias actuales en las tecnologías de envasado de alimentos se dirige hacia el envasado activo e inteligente, que se caracterizan por sistemas de envasado que actúan para mejorar la estabilidad de los productos, o que actúan indicando cual es el estado del producto, respectivamente [9].

El PP y sus consecuencias ambientales y bondades envasadoras

Las poliolefinas se caracterizan por presentar buenas propiedades mecánicas para el envasado de alimentos, reducida permeabilidad al agua, buena termosoldabilidad y bajo coste. Dentro de éstas, el polipropileno biorientado (PP) presenta una mayor transparencia que el resto además de buena resistencia mecánica y elasticidad, un buen sellado, es barrera al agua y permeable a los gases [10], por lo que en el envasado de frutas y verduras frescas se evita la acumulación de CO_2 y permite la entrada de O_2 en el interior para mantener el metabolismo del producto [11]. Cuando se envasan frutas y verduras con una alta actividad de agua, ésta queda retenida en su interior lo que puede afectar a la vida útil [12].

En este trabajo se analiza el comportamiento medioambiental de un producto fresco mínimamente procesado, esto es, ligeramente higienizado, cortado y envasado. El producto lleva una carga microbiológica de partida que causa una vida útil corta. Los envases activos antimicrobianos actúan reduciendo el crecimiento de los microorganismos presentes en el

producto, con un posible incremento de la vida útil del producto. La evaluación ambiental se realiza utilizando la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparando un envase activo de PP con recubrimiento de un copolímero de etileno y de alcohol vinílico (EVOH) y aceite esencial de orégano (OEO), en relación con un envase tradicional de PP para ensaladas mínimamente procesadas.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción de envases y materiales

En este estudio se evaluó el envase para ensalada cuatro estaciones. Para el envasado convencional (CP), el material de los envases fue una película de PP y el envase activo (AP) además de la película de PP se incorporó un recubrimiento a partir del copolímero de etileno alcohol vinílico (EVOH) y aceite esencial de orégano OEO.

2.2. Preparación de la película activa y envasado de la ensalada

Para la elaboración del envase activo se disolvió el polímero EVOH en una mezcla 1:1 (v/v) de 1-propanol/agua a 50 °C, a la que se adicionó la concentración de 7.5% de OEO, posteriormente se fijó el recubrimiento de EVOH y OEO, sobre las películas de PP, las bolsas tenían un área de 1115,04 cm^2 en cada cara y un peso de 6,3 g. En cuanto a la proporción del recubrimiento se tenía 0,000133 g/cm^2 de EVOH + OEO y el recubrimiento cubría 761,6 cm^2 en cada cara.

El proceso de envasado de la ensalada se realizó en una linea industrial con 250g de producto por bolsa, a 60 unidades/minuto durante una jornada de 8 horas, lo que representan 144.000 bolsas para el AP y 230.400 bolsas para el CP.

2.3. Análisis de ciclo de vida (ACV)

Se utilizó el ACV para evaluar el impacto medioambiental de los envases empleados; siguiendo las directrices ISO 14040 y 14044 [13,14] . Se empleó el software SimaPro® (Versión 9.1.1.1 PhD, PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands) para el modelado del ACV y el cálculo de los impactos ambientales. Se empleó el método ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 para la evaluación de impactos.

El objetivo del ACV fue comparar el envase activo (AP) con el envase convencional (CP). La Unidad Funcional (UF) tiene como propósito proporcionar una unidad de referencia sobre la que se normalizan los datos del inventario [13] en este estudio fue "1 kg de material para envasar". El flujo de referencia se presenta en la Figura 48. Se incluyeron las principales entradas y salidas de masa y energía en el sistema de producción de los envases. Los procesos que se contemplaron alcanzan un nivel de corte del 1% en relación con la masa y la energía. En el envase activo el OEO constituye el 0.02% de masa total por lo que queda fuera de los límites del sistema [15].

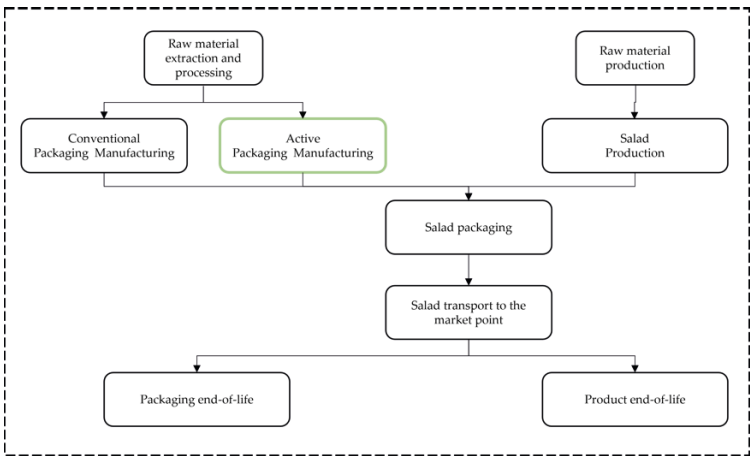


Figura 48. Límites del sistema del producto envasado con las dos opciones de envasado analizadas

Los límites del sistema incluyeron la producción del envase, su fin de vida, la producción de ensalada, el transporte de los materiales a los puntos de envasado y de venta como se muestra en la Figura 48. El proceso de producción y aplicación del recubrimiento sólo tiene lugar si se introduce el recubrimiento de EVOH. Todas las demás fases son comunes a los dos sistemas analizados, pero los flujos de referencia son diferentes porque dependen de la cantidad de que se produce. Así, que se tomó un tiempo de referencia común para los dos envases.

El principal factor que se tuvo en cuenta a la hora de realizar la valoración de los envases fue: el tiempo de preservación de la ensalada envasada mediante la medición de la actividad antimicrobiana de la película sobre la microflora de la ensalada, en relación con los consumos de energía y de masa en los principales procesos de fabricación y procesamiento de los envases.

Se aplicó un enfoque atribucional de ACV para comparar el comportamiento medioambiental de los envases, el cuál proporcionó una estimación de las implicaciones medioambientales de los procesos relativos a la producción y la eliminación de los envases. Esto permitió comparar los perfiles ecológicos de los distintos materiales de envasado, lo que da la posibilidad de extrapolar los resultados a la industria de alimentos frescos. El enfoque atribucional permitió analizar las ventajas medioambientales reales derivadas del uso de envases activos respecto a los convencionales, ya que uno de los principales atractivos de estos nuevos materiales es su capacidad para prolongar la vida útil del producto y, por tanto, reducir pérdidas de alimentos. De esta manera se consigue realizar una producción consciente y medida.

Los procesos modelados en este ACV atribucional conciernen a las operaciones relacionadas con la producción vegetal, pero principalmente a la producción del material para envasado.

2.4. Análisis de Inventario del ciclo de vida (LCIA)

2.4.1. Producción de materias primas

Para la fabricación de los envases se utilizó un proceso de producción de película en polipropileno tomado de la base de datos Industry Data 2.0. Teniendo en cuenta que no existen aún datos suficientes de la fabricación de EVOH en la literatura o en las bases de datos, para la producción del recubrimiento se tomaron los datos de producción de EVA como aproximación al EVOH [1,2] partiendo de que el EVA es un precursor del EVOH (Ecoinvent 3), de la misma base de datos se tomó el 1-Propanol para la disolución del polímero y se consideró también al agua de grifo y la producción de la ensalada. Por otra parte, se tuvo en cuenta el consumo eléctrico en el envasado de la ensalada y en la producción del recubrimiento.

2.4.2. Transporte

En la etapa de transporte se consideraron 100 km para la ensalada hasta el punto de envasado y 50 km una vez envasada la ensalada hasta el punto de venta (Ver Tabla 22). Además, es importante señalar que para el análisis se tuvo en cuenta el tiempo de uso de cada uno de los

envases puesto que según estudios previamente realizados [16] el envase activo permite que el producto fresco tenga un mayor tiempo de vida útil, de 7 días para el envase convencional a 10 días con el envase activo.

Tabla 22. Inventario del ciclo de vida

Processes	Inputs/Outputs	Flows	Amounts	Units
Conventional Packaging Production	Inputs	PP película	1	kg
		Electricity	0.4	MJ
	Output	CP packaging	1 159	kg pcs
Active Packaging Production	Inputs	PP película	0.968	kg
		(EVA) Ethylene vinyl acetate copolymer	0.032	kg
		1-propanol	0.14	kg
		Tap water	0.06	kg
		Electricity	1.2	MJ
	Output	AP packaging	1 159	kg pcs
Product Production	Input	Iceberg Lettuce	0.250	kg
		Transportation Product	100	km
	Output	Iceberg Lettuce for packaging	1	kg
Transportation to market point	Input	Transport	50	km
	Output	Packaged lettuce	1	Pcs

3. Resultados y discusión

Evaluación del impacto del ciclo de vida

En la Figura 49 se muestra el impacto global generado por el envasado de ensalada con las dos opciones de envase teniendo en cuenta todas las categorías de impacto del método ReciPe Midpoint (H). Se evidencia que la mayor participación se atribuye a la producción de ensalada y al transporte. Es posible apreciar que utilizando AP la proporción del proceso de producción de ensalada es inferior en relación con la utilización del CP, debido a que por la mayor conservación del producto en el AP se tiene que procesar menos ensalada en el periodo de tiempo analizado.

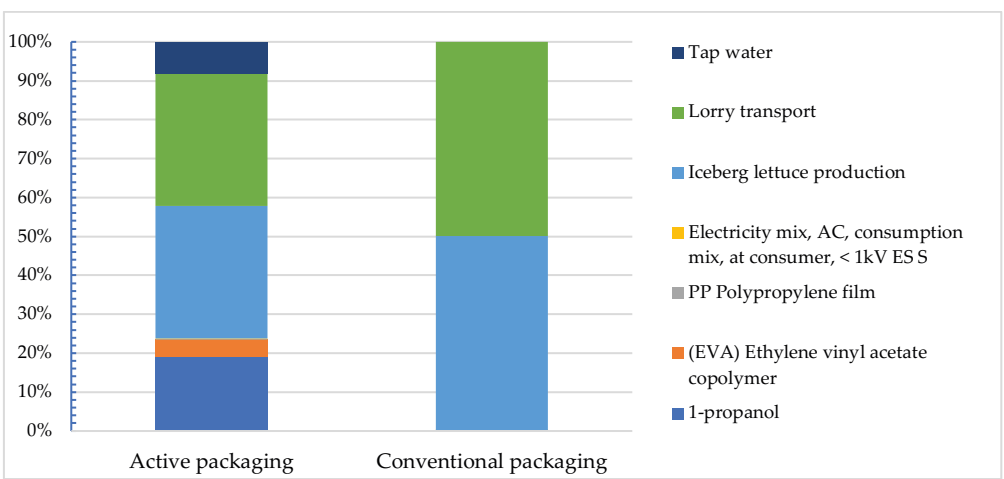


Figura 49. Envase activo (AP) y envase convencional (CP) en términos de los principales procesos para su fabricación (Normalización de los indicadores

En la comparación de los envases (Tabla 23), el AP a pesar de necesitar de más recursos para su producción presenta un mejor comportamiento ambiental debido al alargamiento de la vida

útil de la ensalada, resultado también encontrado por Settier-Ramirez, L, *et al* (2022) [17]. En este caso, la FRS y el WC son las categorías con una mayor relevancia dada su participación en los procesos evaluados, en el AP debido a los procesos de producción de la película de PP y en la fabricación del recubrimiento por la producción del 1-propanol, en el CP se atribuye completamente al proceso de fabricación de la película de PP.

En todas las categorías, el comportamiento medioambiental del envasado de ensalada con el envase activo tuvo un mejor resultado, como era de esperarse. La Tabla 23 resume la evaluación del impacto del ciclo de vida; la valoración de los indicadores muestra una reducción de los impactos entre un 10-30% aproximadamente. El uso del AP tiene un menor impacto ambiental porqué al requerirse menos unidades de envasado y menos producción de ensalada se requieren menos materia prima y se consumen menos recursos, además que al reducir la pérdida de alimentos se compensan las fases adicionales para la elaboración del envase activo similar al encontrado por Zhang *et al*. (2015) [18].

Tabla 23. Puntuación de los indicadores para las diferentes categorías de impacto

Categoría de impacto	Unidad	AP	CP
Global warming (GW)	kg CO^2 eq	4330,028	5570,427
Ozone formation, Human health (OF,HH)	kg NO_x eq	8,748	10,224
Fine particulate matter formation (FPMF)	kg PM2.5 eq	5,000	5,813
Ozone formation, Terrestrial ecosystems (OF,TE)	kg NO_x eq	9,228	10,245
Terrestrial acidification (TA)	kg SO_2 eq	15,500	19,792
Freshwater eutrophication (FE)	kg P eq	0,114	0,147
Fossil resource scarcity (FRS)	kg oil eq	2104,681	2923,533
Water consumption (WC)	m^3	244,721	385,405

La categoría que tuvo una mayor puntuación es la escasez de recursos fósiles FRS lo cual se asocia principalmente a la producción de 1-propanol (AP), producción de la película de PP (AP y CP) y producción de productos para la ensalada (AP y CP), tal como señala de la Caba et al.(2019) [19] sobre la importancia de ésta categoría en la extracción de materias primas para la elaboración de envases; de igual manera de la Caba et al. (2019) [19] indica dentro de su análisis que otra de las categorías que tienen mayor impacto en éste tipo de procesos es el consumo de agua WC, para éste caso, a pesar de que el proceso de elaboración del recubrimiento contiene la utilización de agua adicional, ésta no es significativa en comparación con otros procesos, lo que se corrobora con el resultado del ACV ya que es más el agua que se utiliza en la producción de los productos agrícolas para la ensalada. Sin embargo, cabe aclarar que esa reducción de WC se debe a la fase de uso del producto, con lo que para este indicador el resultado del impacto del AP es inferior por la disminución de cantidad de materiales e insumos empleados. La formación de ozono OF tiene implicaciones negativas tanto en la salud humana como en el medio ambiente, por lo que los indicadores OF y OF,HH tuvieron una valoración similar, en dónde los procesos más representativos fueron: para el AP, la producción del película de PP y el uso de 1-propanol en la elaboración del recubrimiento con un porcentaje de participación de aproximadamente el 60% y 27%, respectivamente; en el CP la contribución del PP fue del 90% aproximadamente. En el caso de GW, es interesante observar que a pesar de que en el AP la elaboración del recubrimiento es el segundo proceso que tiene mayor impacto, en el proceso global por la reducción de la cantidad de envases que se producen se reduce el impacto de esta adición de materiales y procesos. Además, para las dos alternativas de envase, tanto la utilización del PP como su disposición final son los procesos que tienen mayor relevancia. Europa es el cuarto

mayor productor de plásticos del mundo, su cuota de mercado es de cerca del 15%, dónde la producción de PP tiene la mayor participación (16.6%) y el uso en envases corresponde al 39.1%, además, la tasa de reciclaje apenas es del 9.9% [20]. La eliminación incorrecta de los envases representa efectos negativos en el calentamiento global y en la formación de material particulado. A pesar de que en los países desarrollados, los envases de plástico convencionales como el PP [21] pueden reciclarse de manera eficaz, la persistencia de plástico en el medio ambiente por su disposición en vertederos se destaca como un problema importante [19,21]. En la acidificación del suelo y la eutrofización del agua el proceso más relevante continúa siendo la elaboración de PP. Lo anterior demuestra que la incorporación del recubrimiento y la consecuente prolongación de la vida útil de los productos envasados contribuye de manera beneficiosa si se analiza el ciclo de vida completo del envase teniendo en cuenta la fase de uso, ya que, para las mismas categorías de impacto analizadas, si no se tiene en cuenta el factor de uso y la preservación de la ensalada, se evidencia el aumento de los impactos porque la preparación del recubrimiento implica gastos adicionales de energía, similar a lo que obtuvieron Stramarkou *et al.* (2022) [22]. Es por ello por lo que los beneficios del envase con el componente activo se encuentran en su fase de uso, ya que su principal objetivo es la prolongación de la vida útil del alimento envasado.

En resumen, en el proceso de fabricación de los envases, la mayor carga ambiental en la mayoría de las categorías de impacto se debe a la extracción o producción de materia prima (en este caso la película de PP) debido al consumo de recursos no renovables y finitos [23]. Una forma de reducir los impactos es reciclando este tipo de materiales sin embargo depende de las prácticas de disposición de los consumidores tal como mencionan Gómez y Escobar (2022) [24].

4. Conclusiones

La extensión de la vida útil es un factor fundamental a la hora de diseñar nuevos envases siendo el ACV una herramienta muy valiosa a la hora de evaluar la sostenibilidad de los nuevos envases, A pesar de añadir procesos y aumentar el consumo de energía en los envases activos, la prolongación de la vida útil de las ensaladas es beneficiosa ambientalmente disminuyendo su afección a diferentes indicadores como recursos fósiles, consumo de agua y llegando a reducir el calentamiento global en un 22%. El uso de envases activos en comparación con el uso de envases convencionales es mejor alternativa desde el punto de vista ambiental. Las prácticas de consumo, uso y disposición tanto de los envases como de los productos envasados son un factor clave a la hora de valorar los impactos ambientales. La introducción de reciclaje como escenario de fin de vida podría mejorar el rendimiento del sistema analizado. La reducción de las pérdidas alimentarias por uso de los envases activos es significativa y conduce a la gestión consciente y medida de la producción de alimentos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Generalitat Valenciana, Agencia Valenciana de Innovación, fondos FEDER, la financiación del proyecto INNVAL 2022/8.

Referencias

1. FAO. World food and agriculture—statistical yearbook 2020. *World Food and Agriculture-Statistical Yearbook* **2020**.
2. Programme, U.N.E. *Food Waste Index Report 2021*; Nairobi, 2021.
3. FAO. *Código de conducta voluntario para la reducción de las pérdidas y el desperdicio de alimentos*; Roma, 2022.
4. WRAP. *Household food waste: restated data for 2007-2015*; 2018.
5. FAO. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos*; Roma, 2019.

6. EUROSTAT. Recycling rate of packaging waste by type of packaging. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm020/default/table (accessed on 30/03/2023).
7. Bastioli, C. Global status of the production of biobased packaging materials. *Starch-Stärke* **2001**, *53*, 351-355.
8. Varžinskas, V.; Markevičiūtė, Z. Sustainable food packaging: materials and waste management solutions. *Environmental Research, Engineering and Management* **2020**, *76*, 154-164.
9. Sandhya. Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. *LWT-Food Science and Technology* **2010**, *43*, 381-392.
10. Mangaraj, S.; Yadav, A.; Bal, L.M.; Dash, S.K.; Mahanti, N.K. Application of Biodegradable Polymers in Food Packaging Industry: A Comprehensive Review. *Journal of Packaging Technology and Research* **2019**, *3*, 77-96, doi:10.1007/s41783-018-0049-y.
11. Artés, F.; Gómez, P.A.; Artés-Hernández, F. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. **2006**.
12. Lagaron, J.; Catalá, R.; Gavara, R. Structural characteristics defining high barrier properties in polymeric materials. *Materials science and technology* **2004**, *20*, 1-7.
13. International Organization of Standardization. Environmental Management - Life Cycle Assesment - Principles and Framework. *ISO 14040* **2006**.
14. International Organization of Standardization. Environmental Management - Life Cycle Assesment - Requirements and Guidelines. *ISO 14044* **2006**.
15. European Commission's Joint Research Centre. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. General guidance for life cycle assessment. . **2010**.
16. Muriel-Galet, V.; Cerisuelo, J.P.; López-Carballo, G.; Aucejo, S.; Gavara, R.; Hernández-Muñoz, P. Evaluation of EVOH-coated PP films with oregano essential oil and citral to improve the shelf-life of packaged salad. *Food Control* **2013**, *30*, 137-143.
17. Settier-Ramirez, L.; López-Carballo, G.; Hernandez-Muñoz, P.; Tinitana-Bayas, R.; Gavara, R.; Sanjuán, N. Assessing the environmental consequences of shelf life extension: Conventional versus active packaging for pastry cream. *Journal of Cleaner Production* **2022**, *333*, 130159.
18. Zhang, H.; Hortal, M.; Dobon, A.; Bermudez, J.M.; Lara-Lledo, M. The effect of active packaging on minimizing food losses: Life cycle assessment (LCA) of essential oil component-enabled packaging for fresh beef. *Packaging Technology and Science* **2015**, *28*, 761-774.
19. de la Caba, K.; Guerrero, P.; Trung, T.S.; Cruz-Romero, M.; Kerry, J.P.; Fluhr, J.; Maurer, M.; Kruijssen, F.; Albalat, A.; Bunting, S. From seafood waste to active seafood packaging: An emerging opportunity of the circular economy. *Journal of cleaner production* **2019**, *208*, 86-98.
20. Plastics Europe. Plastics – the Facts 2022. Available online: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022-2/ (accessed on 28/04/2023).
21. Humbert, S.; Rossi, V.; Margni, M.; Jolliet, O.; Loerincik, Y. Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2009**, *14*, 95-106.
22. Stramarkou, M.; Boukouvalas, C.; Koskinakis, S.E.; Serifi, O.; Bekiris, V.; Tsamis, C.; Krokida, M. Life Cycle Assessment and Preliminary Cost Evaluation of a Smart Packaging System. *Sustainability* **2022**, *14*, 7080.
23. Vidal, R.; Martínez, P.; Mulet, E.; González, R.; López-Mesa, B.; Fowler, P.; Fang, J. Environmental assessment of biodegradable multilayer film derived from carbohydrate polymers. *Journal of Polymers and the Environment* **2007**, *15*, 159-168.
24. Gómez, I.D.L.; Escobar, A.S. The dilemma of plastic bags and their substitutes: A review on LCA studies. *Sustainable Production and Consumption* **2022**, *30*, 107-116.

Encapsulación de extractos de *Uncaria tomentosa* en nanotransportadores para el control de *Botrytis cinerea* en fresa

E. Sánchez-Hernández[1], A. Santiago-Aliste[1], V. González-García[2], A. Correa-Guimaraes[1], J. Martín-Gil[1], y P. Martín-Ramos[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia; eva.sanchez.hernandez@uva.es (E.S.-H.); alberto.santiago@estudiantes.uva.es (A.S.-S.); adriana.correa@uva.es (A.C.-G.); mgil@iaf.uva.es (J.M.-G.); pmr@uva.es (P.M.-R.)

[2] Departamento de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medioambientales, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, Instituto Agroalimentario de Aragón—IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza; vgonzalezg@aragon.es (V.G.-G.)

Abstract: Given the risks to health and the environment associated with synthetic fungicides, it is necessary to explore safe, effective, and sustainable alternatives. One viable approach is the utilization of bioactive natural products (BNPs). However, BNPs face problems of lability, solubility, and lack of specificity. These issues can be overcome through the implementation of nanoencapsulation. This study focuses on the development of novel nanocarriers designed to encapsulate bioactive compounds, specifically a *Uncaria tomentosa* extract. Their applicability as a coating for postharvest protection of strawberry fruits against *Botrytis cinerea* Pers. was investigated at a laboratory scale, both *in vitro* and *ex-situ*. In *in vitro* inhibition tests, the nanocarrier loaded with the *U. tomentosa* extract demonstrated remarkable efficacy, exhibiting a minimum inhibitory concentration of 22.5 μg·mL^{-1}, better than that of the unencapsulated extract, and resulted in a significant reduction in the quantity of active substance required. As for the impact on prolonging shelf life and controlling rot during postharvest fruit storage, the treatment showed excellent protection of artificially inoculated strawberry fruits at a concentration of 45 μg·mL^{-1}. The findings suggest that nanocarriers containing extracts from cat's claw bark hold promise as biorational agents and, notably, as an alternative to conventional fungicides for managing strawberry phytopathogens.

Palabras clave: *Fragaria* × *ananassa*; moho gris; nanotecnología; protección postcosecha; uña de gato

1. Introducción

El cultivo de la fresa (*Fragaria* x *ananassa* (Duchesne ex Weston) Duchesne ex Rozier) es uno de los más demandados en todo el mundo. Desde el año 1990, la producción mundial de fresa casi se ha cuadruplicado, pasando de 2,5 millones de toneladas a 9,2 millones en 2021. Los principales productores son: Estados Unidos, Turquía, España, Egipto y Colombia; siendo España el líder en la exportación de fruta fresca y generando anualmente un valor superior a los 400 millones de euros. No obstante, la vida postcosecha de la fresa es corta debido a su elevada tasa de respiración, su sensibilidad a la temperatura, su textura blanda, y el alto grado de deterioro causado por diversos patógenos como *B. cinerea* [1].

El ascomiceto *B. cinerea* no sólo es el patógeno postcosecha más importante para la fresa [2], sino que también está considerado como el segundo fitopatógeno en términos de importancia a nivel mundial, puesto que infecta a más de 230 hospedadores pertenecientes a más de 170 familias de plantas de importancia agrícola y agroalimentaria [3]. Hasta la fecha, el enfoque más eficaz para controlarlo es la aplicación de fungicidas sintéticos convencionales. Sin embargo, se han impuesto estrictas normativas que limitan el uso de dichos productos químicos en vista de su facilidad de diseminación y de la aparición de resistencia de los hongos a los mismos, así como una mayor vigilancia de sus efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente [4].

Como alternativas se han propuesto estrategias de biocontrol del patógeno mayoritariamente centradas en el uso de antagonistas microbianos (tanto procariotas como eucariotas) o de extractos de plantas y sus aceites esenciales. Respecto a estos últimos, que incluyen las sustancias básicas contempladas en el Art. 23 del Reglamento (CE) nº 1107/2009, presentan problemas de estabilidad, solubilidad y falta de especificidad, que limitan su efectividad. Un enfoque para solventar estas limitaciones y maximizar la eficacia de estos productos es la micro/nanoencapsulación, ya que los nanotransportadores o *nanocarriers* facilitan la vehiculización de productos bioactivos de un modo eficaz [5].

En cuanto al uso de nanotransportadores contra *B. cinerea*, ensayos *in vitro* han demostrado que las nanopartículas de ácido poli(láctico-co-glicólico) son capaces de penetrar las paredes celulares de los conidios y las hifas somáticas de *B. cinerea*, y pueden utilizarse para el suministro de pterostilbeno, un compuesto natural, y fluopiram, un antifúngico sintético [6]. También se han observado cambios morfológicos significativos en el micelio fúngico tras el tratamiento con aceites esenciales de menta encapsulados en sílice mesoporoso SBA-15 [7]. La encapsulación de aceites esenciales de *Nepeta* spp. en microcápsulas de quitosano ha demostrado ser efectiva *in vitro* [8], y perlas de quitosano y alginato incorporadas con aceites esenciales de clavo y lavanda y vainillina han demostrado ser útiles para la protección postcosecha de uvas de mesa [9]. Además, los nanotransportadores de quitosano cargados con D-limoneno también se han utilizado para desencadenar una respuesta de defensa sistémica a demanda en las plantas, mejorando la resistencia a la enfermedad contra *B. cinerea* [10].

La presente comunicación aborda la síntesis y caracterización de un nuevo nanotransportador basado en el entrecruzamiento (*cross-linking*) de oligómeros de quitosano (COS), *g*-C_3N_4 e hidroxiapatito (HAp) y su ensayo para la vehiculización de un extracto hidroamoniacal de uña de gato (*Uncaria tomentosa* (Willd. ex Schult.) DC.). La eficacia de los nanotransportadores *g*-C_3N_4-COS-HAp-Ut contra *B. cinerea* se ha estudiado primero *in vitro*, y a continuación se ha explorado su efecto protector durante la fase de almacenamiento en fresas inoculadas artificialmente con *B. cinerea*.

2. Materiales y métodos

2.1. Reactivos, material vegetal y aislado fúngico

El quitosano de alto peso molecular, la enzima Neutrase™ 0,8 L y el agar de dextrosa de patata (PDA) empleados fueron suministrados por Hangzhou Simit Chem. and Tech. Co. (Hangzhou,

China), Novozymes A/S (Bagsværd, Dinamarca), y Becton Dickinson (Bergen County, NJ, EE.UU.), respectivamente.

El extracto hidroamoniacal de *U. tomentosa* seleccionado como biorracional a encapsular fue preparado a partir de una muestra compuesta de corteza de 25 especímenes de uña de gato de La Merced, Chanchamayo, Perú, según el procedimiento descrito en Sánchez-Hernández *et al.* [11].

Las fresas de la variedad "Fortuna" utilizadas en los estudios de protección postcosecha fueron suministradas por la Sociedad Cooperativa Andaluza Santa María de La Rábida (Palos de la Frontera, Huelva, España), y habían sido cultivadas según las normas de la agricultura ecológica, sin utilizar pesticidas sintéticos. Los frutos se recolectaron y se enviaron inmediatamente en transporte refrigerado para que los experimentos pudieran iniciarse en las 24 horas siguientes a la recolección. Los frutos se seleccionaron teniendo en cuenta aspectos como la uniformidad del tamaño, la ausencia de daños físicos e infecciones fúngicas, y >75% de la superficie de color rojo, de acuerdo con los criterios sugeridos por Romanazzi *et al.* [12].

El aislado fúngico de *B. cinerea* (CECT 20973) fue adquirido en la Colección Española de Cultivos Tipo (CECT, Valencia, España).

2.2. Preparación del extracto

Para disolver los polifenoles y otros compuestos bioactivos de interés contenidos en la corteza de *U. tomentosa*, se optó por la digestión en una solución acuosa de amoníaco, un medio de extracción empleado en trabajos previos de nuestro grupo con buenos resultados [13-15]. La muestra de polvo de corteza se digirió primero en una solución acuosa de amoníaco durante 2 h, después se sometió a sonicación en modo pulsado durante 10 min utilizando un ultrasonicador UIP1000hdT (Hielscher Ultrasonics, Teltow, Alemania), y después se dejó reposar durante 24 h. A continuación, se ajustó a pH neutro utilizando ácido acético. Por último, la solución se centrifugó a 9000 rpm durante 15 min, y el sobrenadante se filtró a través de papel Whatman n.º 1.

2.3. Síntesis de los nanotransportadores y encapsulación del extracto

La síntesis de oligómeros de quitosano (COS) se realizó según el procedimiento propuesto por Sánchez-Hernández *et al.* [16]. Todos los componentes del nanotransportador se metacrilaron empleando una solución de anhídrido metacrílico (AM) en tetrahidrofurano (THF). La solución de *g*-C_3N_4 metacrilada se añadió gota a gota a la solución de COS metacrilada, se adicionó a ésta la solución de HAp metacrilada, y se sometió a ultrasonicación para obtener una proporción en peso de *g*-C_3N_4:COS:HAp de 0,5:1:1 (el exceso de AM se eliminó mediante agitación y lavados sucesivos). La encapsulación de *U. tomentosa* (Ut) se realizó mediante la adición de 105 mg del extracto hidroamoniacal sobre la mezcla y sonicación. El producto resultante obedeció a la relación molar *g*-C_3N_4:COS:HAp:Ut de 0,5:1:1:0,25. La eficiencia de encapsulación del extracto fue superior al 95% (determinada por HPLC).

2.4. Caracterización del nanotransportador

El espectro vibracional de los nanotransportadores se registró utilizando un espectrómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) Nicolet iS50 de Thermo Scientific (Waltham, MA, EE.UU.) equipado con un sistema de reflectancia total atenuada (ATR), en el intervalo 400–4000 cm^{-1}, con una resolución espectral de 1 cm^{-1}.La caracterización por microscopía electrónica de transmisión (TEM) se llevó a cabo utilizando un microscopio JEOL (Akishima, Tokio, Japón) JEM 1011 HR. Las condiciones operativas fueron: 100 kV; 25.000–120.000× aumentos. Las micrografías se obtuvieron con una cámara CCD GATAN ES1000W (4000×2672 píxeles). Para la tinción negativa de las muestras se utilizó acetato de uranilo (2%).

2.5. Ensayos de actividad antifúngica in vitro

La actividad antifúngica de los nanotransportadores *g*-C_3N_4-COS-HAp vacíos (sin extracto de *U. tomentosa*) y cargados con el extracto de *U. tomentosa* se ensayó frente a *B. cinerea* utilizando el método de dilución en agar, según los procedimientos estandarizados del EUCAST. Se añadieron alícuotas de los nanotransportadores a un medio de PDA para obtener concentraciones finales en el rango de 5,62 a 22,5 $\mu g \cdot mL^{-1}$. Se transfirieron tapones de micelio de *B. cinerea* a placas con los diferentes tratamientos (3 placas por concentración, con 2 réplicas). Como control se utilizó el medio de PDA sin ninguna modificación. La inhibición del crecimiento se estimó tras la incubación en la oscuridad a 25 °C durante una semana, mediante la fórmula $((d_c - d_t)/d_c) \times 100$, donde d_c es el diámetro medio de la colonia en el control y d_t es el diámetro medio de la colonia tratada. Las concentraciones efectivas (CE_{50} y CE_{90}) se estimaron mediante el análisis PROBIT en SPSS Statistics v.25 (IBM; Armonk, NY, EE.UU.).

2.6. Ensayos de protección postcosecha en frutos de fresa

En condiciones controladas de laboratorio, se evaluó la eficacia de los nanotransportadores de *g*-C_3N_4-COS-HAp cargados con el extracto de *U. tomentosa* para la protección postcosecha de frutos de fresa de la variedad "Fortuna" inoculados artificialmente con el fitopatógeno. El protocolo se modificó ligeramente a partir del propuesto por Buzón-Durán *et al.* [17]. Las fresas se desinfectaron durante 2 min con una solución de NaOCl al 3%, después se lavaron tres veces con agua destilada estéril y se secaron en una campana de flujo laminar sobre papel absorbente estéril. Las fresas se distribuyeron aleatoriamente en cuatro grupos homogéneos de 60 frutos (es decir, tres repeticiones con 15 frutos por repetición y tratamiento), asegurándose de que todos los frutos estuvieran en el intervalo de 20-30 g/fruto y que fueran mayores de 25 mm de diámetro. Se trataron dos grupos con la formulación para la que se registró mayor actividad *in vitro* contra *B. cinerea*, es decir, con los nanotransportadores de *g*-C_3N_4-COS-HAp-Ut, a diferentes concentraciones mínimas inhibitorias (CMI y CMI×2, es decir, 22,5 y 45 $\mu g \cdot mL^{-1}$), mientras que los otros grupos sirvieron como control negativo (sin tratamiento y sin patógeno) y positivo (con patógeno y sin tratamiento). Se hicieron heridas superficiales ($\varnothing = 5$ mm) en la zona ecuatorial de cada fruto, y, a continuación, las fresas se sumergieron en los tratamientos durante 5 min minutos, para después secarse a temperatura ambiente en una campana de flujo laminar. En las heridas superficiales se colocó un tapón de un cultivo de *B. cinerea*, con el micelio orientado hacia la herida del fruto. Los frutos se colocaron en cajas de plástico tapadas y se almacenaron durante 7 días a 4 °C y 95-98% HR, y después se expusieron a un periodo de conservación de 4 días a 20 °C y 95-98% HR. Durante el almacenamiento, se analizó el porcentaje de frutos infectados y la gravedad de la enfermedad (según una escala empírica con seis grados: 0, fruta sana; 1, 1-20% de superficie de fruta infectada; 2, 21-40% de superficie de fruta infectada; 3, 41-60% de superficie de fruta infectada; 4, 61-80% de superficie de fruta infectada; 5, más del 81% de superficie infectada con esporulación).

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del nanotransportador

Los espectros infrarrojos del nanotransportador de *g*-C_3N_4-COS-HAp confirmaron el entrecruzamiento (mediado por AM) de los diferentes componentes, destacando la presencia de bandas a 806 y 890 cm^{-1} atribuibles al modo vibracional "breathing" de las unidades de tri-*s*-triazina y al modo de deformación de los enlaces N–H, respectivamente. Las bandas ubicadas entre 1100 y 1700 cm^{-1} se asignan a los modos de tensión típicos de los heterociclos CN, mientras

las bandas ubicadas entre 2200 y 2500 cm^{-1} se pueden asignar a la presencia de un triple o un doble enlace (C=N o C=C). Adicionalmente, las bandas a 2800 y 3300 cm^{-1} corresponden a la vibración de tensión N–H y/o C–H. Además de las bandas anteriores, atribuidas al *g*-C_3N_4, se observa una banda entre 900 y 1100 cm^{-1} correspondiente a los grupos PO_4^{3-} del hidroxiapatito, confirmando con ello su presencia en el material compuesto.

Las imágenes de microscopía TEM de los nanotransportadores (Figura 1) mostraron nanopartículas esféricas homogéneas con un tamaño promedio de 90 nm.

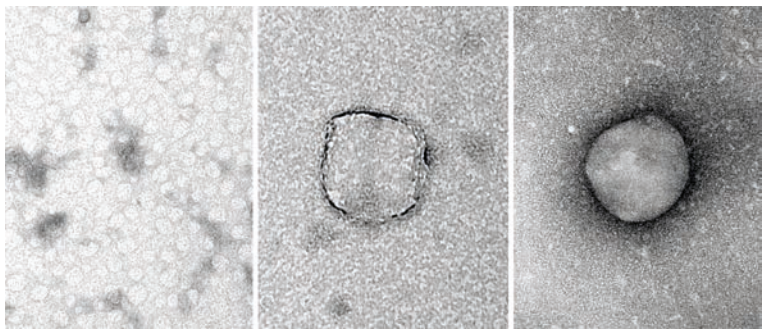


Figura 1. Micrografías TEM de los nanotransportadores g-C_3N_4-COS-HAp sin extracto encapsulado (izquierda y centro) y con extracto de *U. tomentosa* encapsulado (derecha). El tamaño medio de los nanotransportadores es de 90 nm.

3.2. Pruebas de inhibición del crecimiento in vitro y ex situ

Los resultados de las pruebas de inhibición del crecimiento micelial *in vitro* se resumen en la Figura 2. Los componentes del nanotransportador presentaron actividad antifúngica *per se*, inhibiendo al fitopatógeno a una concentración de 45 µg·mL^{-1}, pero dicha actividad fue mejorada al encapsular el extracto de *U. tomentosa,* logrando la completa inhibición del crecimiento micelial a una concentración de 22,5 µg·mL^{-1}. A efectos comparativos, las CMIs para el extracto amoniacal de *U. tomentosa* solo y en forma de complejos conjugados con COS, fueron de 375 y 93,75 µg·mL^{-1}, respectivamente. Las CMIs de los tratamientos basados en nanotransportadores también son inferiores a las de fungicidas convencionales como azoxystrobin, metalaxil, fosetil-Al o mancozeb (con CMIs de 625.000, 21.000, 2000 y 150 µg·mL^{-1}, respectivamente) [11].

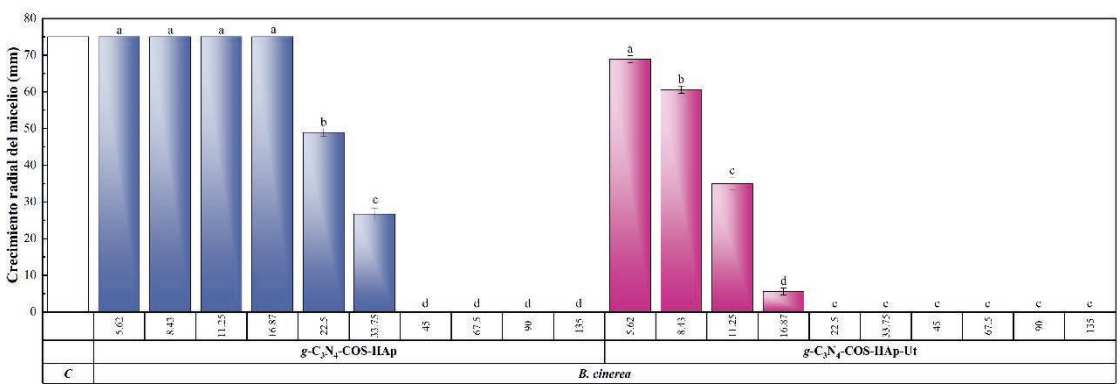


Figura 2. Inhibición del crecimiento radial del micelio de *B. cinerea* en los ensayos *in vitro* realizados con los nanotransportadores g-C_3N_4-COS-HAp vacíos (sin extracto de *U. tomentosa*) y cargados con el extracto de *U. tomentosa* (Ut). La barra blanca (C) representa los controles.

En cuanto a los resultados de protección postcosecha, se presentan en la Tabla 1 y la Figura 3. A una concentración de 22,5 µg·mL^{-1}, el tratamiento evitó el desarrollo de la enfermedad hasta el

séptimo día, y logró una reducción notable hasta el noveno día, pero la severidad el undécimo día fue notable. A la mayor concentración ensayada (45 μg·mL^{-1}), el control de podredumbre gris mejoró, logrando mantener el nivel de daño bajo hasta el undécimo día. A efectos comparativos, la eficacia del tratamiento con *g*-C_3N_4-COS-HAp-Ut fue notablemente superior que las referidas para otros recubrimientos a base de quitosano empleados para la protección de frutos de fresa: la severidad de la enfermedad al final de los experimentos fue menor que la registrada para dosis de 1% *p/v* de acetato de quitosano, cloruro de quitosano, glutamato de quitosano y formiato de quitosano [12]. El efecto protector del tratamiento también superior a los referidos para aceite esencial de *Zataria multiflora* Boiss. encapsulado en nanopartículas de quitosano (ensayado a 1500 μg·mL^{-1}) [18], complejos conjugados COS–*U. tomentosa* (1000 μg·mL^{-1}) [11], y complejos conugados de COS con *Silene uniflora* Roth (3750 μg·mL^{-1}) [17].

Tabla 1. Evolución de la severidad de ataque la podredumbre gris en frutos de fresa sin inocular (control negativo) e inoculados artificialmente con *B. cinerea* (no tratados, control positivo, y tratados con dos concentraciones del nanomaterial cargado con *U. tomentosa*) durante su almacenamiento postcosecha.

Tiempo (días)	Control negativo	Control positivo	CMI (22,5 μg·mL^{-1})	CMI×2 (45 μg·mL^{-1})
1	0	0	0	0
3	0	0,3	0	0
5	0	0,8	0	0
7	0	1,3	0	0
9	0	3,1	1	0,3
11	0	4,5	3,7	1,6

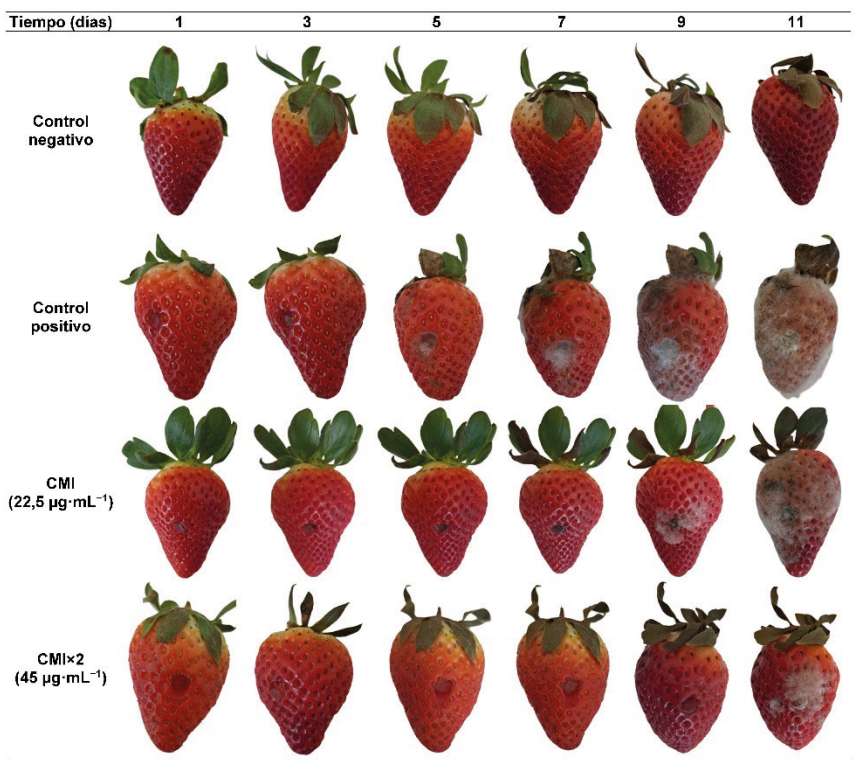


Figura 3. Visualización de la evolución de la podredumbre gris en frutos de fresa sin inocular (control negativo) e inoculados artificialmente con *B. cinerea* (no tratados, control positivo, y tratados con dos concentraciones del nanomaterial cargado con extracto de *U. tomentosa*) durante su almacenamiento postcosecha.

4. Conclusiones

La encapsulación de extracto de uña de gato en nanotransportadores *g*-C_3N_4-COS-HAp permitió la completa inhibición del crecimiento micelial de *Botrytis cinerea* en ensayos *in vitro* a una concentración de 22,5 $\mu g \cdot mL^{-1}$, notablemente inferior a la del extracto sin encapsular y a las referidas para antifúngicos de síntesis como azoxystrobin, metalaxil, fosetil-Al o mancozeb. La aplicación del tratamiento a una concentración de 45 $\mu g \cdot mL^{-1}$ sobre fresas variedad "Fortuna" inoculadas artificialmente logró mantener el nivel de daño causado por el moho gris a niveles bajos (1,6 sobre 5) hasta el undécimo día, mejorando la vida postcosecha de los frutos. Los resultados obtenidos para la protección de la fresa son susceptibles de aplicación a otros cultivos, como la vid, otras frutas y hortalizas.

Referencias

1. Dhital, R.; Joshi, P.; Becerra-Mora, N.; Umagiliyage, A.; Chai, T.; Kohli, P.; Choudhary, R. Integrity of edible nano-coatings and its effects on quality of strawberries subjected to simulated in-transit vibrations. *LWT* **2017**, *80*, 257-264, doi:10.1016/j.lwt.2017.02.033.
2. Petrasch, S.; Knapp, S.J.; van Kan, J.A.L.; Blanco-Ulate, B. Grey mould of strawberry, a devastating disease caused by the ubiquitous necrotrophic fungal pathogen *Botrytis cinerea*. *Molecular Plant Pathology* **2019**, *20*, 877-892, doi:10.1111/mpp.12794.
3. Dean, R.; Van Kan, J.A.L.; Pretorius, Z.A.; Hammond-Kosack, K.E.; Di Pietro, A.; Spanu, P.D.; Rudd, J.J.; Dickman, M.; Kahmann, R.; Ellis, J.; Foster, G.D. The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Mol. Plant Pathol.* **2012**, *13*, 414-430, doi:10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x.
4. Wisniewski, M.; Droby, S.; Norelli, J.; Liu, J.; Schena, L. Alternative management technologies for postharvest disease control: The journey from simplicity to complexity. *Postharvest Biol. Technol.* **2016**, *122*, 3-10, doi:10.1016/j.postharvbio.2016.05.012.
5. Vega-Vásquez, P.; Mosier, N.S.; Irudayaraj, J. Nanoscale Drug Delivery Systems: From Medicine to Agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* **2020**, *8*, doi:10.3389/fbioe.2020.00079.
6. De Angelis, G.; Simonetti, G.; Chronopoulou, L.; Orekhova, A.; Badiali, C.; Petruccelli, V.; Portoghesi, F.; D'Angeli, S.; Brasili, E.; Pasqua, G.; Palocci, C. A novel approach to control *Botrytis cinerea* fungal infections: uptake and biological activity of antifungals encapsulated in nanoparticle based vectors. *Scientific Reports* **2022**, *12*, 7989, doi:10.1038/s41598-022-11533-w.
7. Weisany, W.; Samadi, S.; Tahir, N.A.-r.; Amini, J.; Hossaini, S. Nano-encapsulated with mesoporous silica enhanced the antifungal activity of essential oil against *Botrytis cinerea* (Helotiales; Sclerotiniaceae) and *Colletotrichum nymphaeae* (Glomerellales; Glomerellaceae). *Physiological and Molecular Plant Pathology* **2022**, *122*, 101902, doi:10.1016/j.pmpp.2022.101902.
8. Amighi, M.; Zahedifar, M.; Alizadeh, H.; Payandeh, M. Encapsulation of *Nepeta hormozganica* and *Nepeta dschuprensis* essential oils in shrimp chitosan NPs: Enhanced antifungal activity. *Int J Biol Macromol* **2023**, *238*, 124112, doi:10.1016/j.ijbiomac.2023.124112.
9. Sangsuwan, J.; Sutthasupa, S. Effect of chitosan and alginate beads incorporated with lavender, clove essential oils, and vanillin against *Botrytis cinerea* and their application in fresh table grapes packaging system. *Packaging Technology and Science* **2019**, *32*, 595-605, doi:10.1002/pts.2476.

10. Vega-Vásquez, P.; Mosier, N.S.; Irudayaraj, J. Nanovaccine for Plants from Organic Waste: d-Limonene-Loaded Chitosan Nanocarriers Protect Plants against *Botrytis cinerea*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2021**, *9*, 9903-9914, doi:10.1021/acssuschemeng.1c02818.
11. Sánchez-Hernández, E.; Martín-Ramos, P.; Martín-Gil, J.; Santiago-Aliste, A.; Hernández-Navarro, S.; Oliveira, R.; González-García, V. Bark Extract of *Uncaria tomentosa* L. for the Control of Strawberry Phytopathogens. *Horticulturae* **2022**, *8*, 672-689, doi:10.3390/horticulturae8080672.
12. Romanazzi, G.; Feliziani, E.; Santini, M.; Landi, L. Effectiveness of postharvest treatment with chitosan and other resistance inducers in the control of storage decay of strawberry. *Postharvest Biol. Technol.* **2013**, *75*, 24-27, doi:10.1016/j.postharvbio.2012.07.007.
13. Sánchez-Hernández, E.; Balduque-Gil, J.; Barriuso-Vargas, J.J.; Casanova-Gascón, J.; González-García, V.; Cuchí-Oterino, J.A.; Lorenzo-Vidal, B.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Holm Oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) Bark Aqueous Ammonia Extract for the Control of Invasive Forest Pathogens. *International Journal of Molecular Sciences* **2022**, *23*, 11882, doi:10.3390/ijms231911882.
14. Sánchez-Hernández, E.; González-García, V.; Casanova-Gascón, J.; Barriuso-Vargas, J.J.; Balduque-Gil, J.; Lorenzo-Vidal, B.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Valorization of *Quercus suber* L. Bark as a Source of Phytochemicals with Antimicrobial Activity against Apple Tree Diseases. *Plants* **2022**, *11*, 3415-3433, doi:10.3390/plants11243415.
15. Sánchez-Hernández, E.; González-García, V.; Correa-Guimarães, A.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Phytochemical Profile and Activity against *Fusarium* Species of *Tamarix gallica* Bark Aqueous Ammonia Extract. *Agronomy* **2023**, *13*, 496-513, doi:10.3390/agronomy13020496.
16. Sánchez-Hernández, E.; Langa-Lomba, N.; González-García, V.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Santiago-Aliste, A.; Torres-Sánchez, S.; Martín-Ramos, P. Lignin–chitosan nanocarriers for the delivery of bioactive natural products against wood-decay phytopathogens. *Agronomy* **2022**, *12*, 461-477, doi:10.3390/agronomy12020461.
17. Buzón-Durán, L.; Sánchez-Hernández, E.; Martín-Ramos, P.; Navas-Gracia, L.M.; García-González, M.C.; Oliveira, R.; Martín-Gil, J. *Silene uniflora* Extracts for Strawberry Postharvest Protection. *Plants* **2023**, *12*, 1846-1860, doi:10.3390/plants12091846.
18. Mohammadi, A.; Hashemi, M.; Hosseini, S.M. Nanoencapsulation of *Zataria multiflora* essential oil preparation and characterization with enhanced antifungal activity for controlling *Botrytis cinerea*, the causal agent of gray mould disease. *Innov Food Sci Emerg Technol* **2015**, *28*, 73-80, doi:10.1016/j.ifset.2014.12.011.

Influencia de factores de cultivo y conservación en el contenido en azúcares reductores en patata

C. Jarén, C.M. Peraza-Alemán, T. Mangado, A. López-Maestresalas, S. Arazuri

Departamento de Ingeniería, IsFood, Universidad Pública de Navarra, cjaren@unavarra.es

Abstract: Potato is one of the most important foods in the world and one of the ways to consume it is as crisps. When fried at high temperatures, the reducing sugars and the asparagine in potatoes may contribute to the formation of acrylamide through the Maillard reaction. Acrylamide is classified as a substance that is probably carcinogenic to humans. It is therefore important that potatoes that are suitable for frying have a low content of reducing sugars. This content depends on genetic factors, environmental and cultural factors and storage conditions. Therefore, this work aims to analyse some of these factors in a variety rich in reducing sugars such as *Jaerla*. The factors analysed were water stress during cultivation, two storage temperatures (8 and 13ºC) and storage time at those temperatures, from 0 to 13 weeks. Potato samples from each of the treatments were freeze-dried and their sugar content was determined: glucose, fructose (reducing sugars) and sucrose. The data were analysed with R-Studio. Significant differences were found only in the storage temperature factor for the three sugars, where the highest values were obtained for potatoes stored at 8ºC.

Keywords: Acrylamide, Cold storage, Water stress, Glucose, Fructose.

Resumen: La patata es uno de los alimentos más importante del mundo y una de las formas más habituales de consumirla es como patatas fritas. Al freírla a altas temperaturas, los azúcares reductores y la asparagina de la patata pueden dar lugar a acrilamidas, por medio de la reacción de Maillard. La acrilamida está clasificada como sustancia probablemente cancerígena para el ser humano. Por eso es importante que las patatas destinadas a fritura tengan un bajo contenido en azúcares reductores. Este contenido depende de factores genéticos, medioambientales, culturales y condiciones de almacenamiento. Por ello, en este trabajo se pretende analizar algunos de esos factores en una variedad rica en azúcares reductores como es *Jaerla.* Los factores analizados fueron el estrés hídrico durante el cultivo, dos temperaturas de almacenamiento (8 y 13ºC) y tiempo de almacenamiento en las anteriores temperaturas, desde 0 hasta 13 semanas. Las muestras de patatas de cada uno de los tratamientos se liofilizaron y se determinó su contenido en azúcares: glucosa, fructosa y sacarosa. Los datos fueron analizados con R-Studio. Solo se encontraron diferencias significativas en el factor temperatura de conservación para los tres azúcares, obteniéndose los valores más altos en las patatas conservadas a 8ºC.

Palabras clave: Acrilamida, Conservación frigorífica, Estrés hídrico, Glucosa, Fructosa.

1. Introducción

La patata (*Solanum tuberosum* L.) es uno de los alimentos más importantes a nivel mundial, solo superados por el trigo, el arroz y el maíz. Su cultivo tiene una gran relevancia, tanto por su valor económico, como por su importancia nutricional. Es rica en carbohidratos, principalmente en forma de almidón, y también contiene otros compuestos como proteínas, vitaminas y minerales. Uno de los componentes más importantes de la patata es el contenido en azúcares reductores (glucosa y fructosa), los cuales tienen un impacto significativo en la calidad de los productos derivados de la patata, como las patatas fritas y los purés.

La mayoría de las patatas se consumen después de procesarlas a altas temperaturas como patatas fritas, también denominadas patatas chips o patatas francesas. Sin embargo, el consumo de patata fritas tiene un gran inconveniente, su contenido en acrilamida. La presencia de acrilamida en los alimentos incrementa el riesgo de desarrollar determinados tipos de cáncer. Por ello, las autoridades europeas han establecido regulaciones y medidas para controlar y reducir los niveles de acrilamida en los alimentos procesados, incluyendo las patatas y sus productos derivados. La Comisión Europea, a través del Reglamento (UE) 2017/2158, ha implementado medidas específicas para mitigar la presencia de acrilamida en los alimentos y proteger la salud de los consumidores [1]. Entre estas medidas se encuentran el establecimiento del valor límite de acrilamida para las patatas fritas y otros productos de patata frita, que se establece en 500 µg/kg (microgramos por kilogramo) de producto. Para las patatas preenvasadas destinadas a su consumo directo, ese valor límite de acrilamida se establece en 750 µg/kg de producto. Es importante tener en cuenta que estos son solo algunos de los valores límite establecidos para productos de patata específicos. El Reglamento también establece valores límite para otras categorías de alimentos como pan, cereales de desayuno y café, entre otros.

Las patatas, el pan o el café son algunas de las principales fuentes de exposición a este compuesto, pero no son los únicos. En concreto, en el caso de la patata fresca, la acrilamida se forma debido a los altos niveles de precursores (azúcares reductores y asparagina) presentes en la misma y a las elevadas temperaturas aplicadas durante la fritura. Esto es debido a la reacción de Maillard, una reacción entre el grupo amino libre de una proteína y un azúcar reductor [2]. Además, los niveles más altos de azúcares reductores (glucosa y fructosa), así como de sacarosa no reductora en los tubérculos de patata, pueden dar lugar a un pardeamiento desfavorable o incluso a un sabor amargo [3].

El contenido de azúcares reductores en la patata es un parámetro importante para determinar su calidad. Los azúcares reductores, como la glucosa y la fructosa, son los principales responsables del color oscuro y del sabor amargo de las patatas fritas, así como de la textura y sabor del puré de patata. Su contenido en el tubérculo es el factor crítico en la formación de acrilamida, ya que el contenido en asparagina libre es muy elevado y presenta poca variación [4]. El contenido de azúcar de las patatas viene determinado por varios factores tales como el tipo de cultivar, factores de cultivo y factores de conservación poscosecha [5]. Los principales factores de cultivo son la temperatura durante el crecimiento, la nutrición mineral, el riego (natural o artificial) y el estado de madurez en el momento de la recolección del cultivo. Por otra parte, entre los factores de conservación poscosecha están el estrés mecánico y las condiciones y el tiempo de almacenamiento. Cada genotipo requiere un tratamiento ideal antes y después de la cosecha para mantener bajos los niveles de azúcares; ya que cualquier tipo de estrés provoca su acumulación [3].

Es por ello por lo que una de las estrategias para mitigar la formación de acrilamida en patata es controlar los niveles de azúcares reductores en la patata fresca. El conocimiento de cómo estos factores afectan al contenido de azúcares reductores en la patata es esencial para la industria

alimentaria y para los agricultores, ya que les permite ajustar las prácticas de cultivo y conservación para mejorar la calidad y la vida útil de los productos de patata. Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar la influencia que tienen algunos factores de cultivo, como el estrés hídrico, y algunas condiciones de conservación, como son la temperatura y el tiempo, en el contenido en azúcares reductores (glucosa y fructosa) y sacarosa.

2. Materiales y métodos

2.1. Material vegetal

El material vegetal utilizado en este trabajo ha sido patata de la variedad *Jaerla.* Esta variedad se caracteriza por su poca aptitud para freír, por su alto contenido en precursores de acrilamida. Por el contrario, tiene buena aptitud para su consumo hervida ya que no se desintegra, mantiene una consistencia firme, no es harinosa, presenta una estructura fina o bastante fina, de sabor neutro o ligeramente pronunciado y sin oscurecer o ligero oscurecimiento [6].

Las patatas se cultivaron en la finca de prácticas y de experimentación agrícola de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y Biociencias de la Universidad Pública de Navarra. Se plantaron el 8 de abril y se recogieron el 4 de julio de 2022. El cultivo se hizo bajo túnel y con dos condiciones de riego, una la habitual en el cultivo en estas condiciones como control (C) y la otra con estrés hídrico (E) para analizar si estas condiciones contribuyen a un menor o mayor contenido de azúcares. De cada uno de los tratamientos se pusieron 100 plantas. La cantidad de agua aportada fue igual a todas las plantas hasta el 1 de junio. A partir de esa fecha, en la que empezaban a asomar las primeras flores, aunque sin abrirse, las aportaciones de riego para E fueron la mitad que para C. En total, la cantidad de agua aportada al grupo C fue de 214 L/m^2 y a E, de 173 L/m^2.

2.2. Condiciones de conservación y muestreo

El mismo día de la recolección, 10 patatas de cada uno de los tratamientos (C y E) se liofilizaron por separado. El resto de las patatas, se dividieron en dos lotes, la mitad de las C y de las E se introdujeron en una cámara frigorífica a 8ºC y la otra mitad a 13ºC, para diferenciar el desarrollo de los azúcares, especialmente los azúcares reductores. Se mantuvieron en conservación frigorífica durante un período variable: 3, 5, 8, 11 y 13 semanas. En cada una de esas fechas se sacaron de las cámaras 5 patatas de cada tratamiento y cada temperatura de conservación, es decir, 5 patatas x 2 sistemas de riego x 2 temperaturas de conservación = 20 patatas. Cada muestra se peló, se picó en pequeños trozos y se realizó una congelación rápida con nitrógeno líquido a -195ºC. Posteriormente las patatas se liofilizaron y se conservaron al vacío (95% vacío) en bolsas de poliamida/polietileno hasta su análisis. En total se analizaron 120 muestras.

2.3. Determinación de azúcares

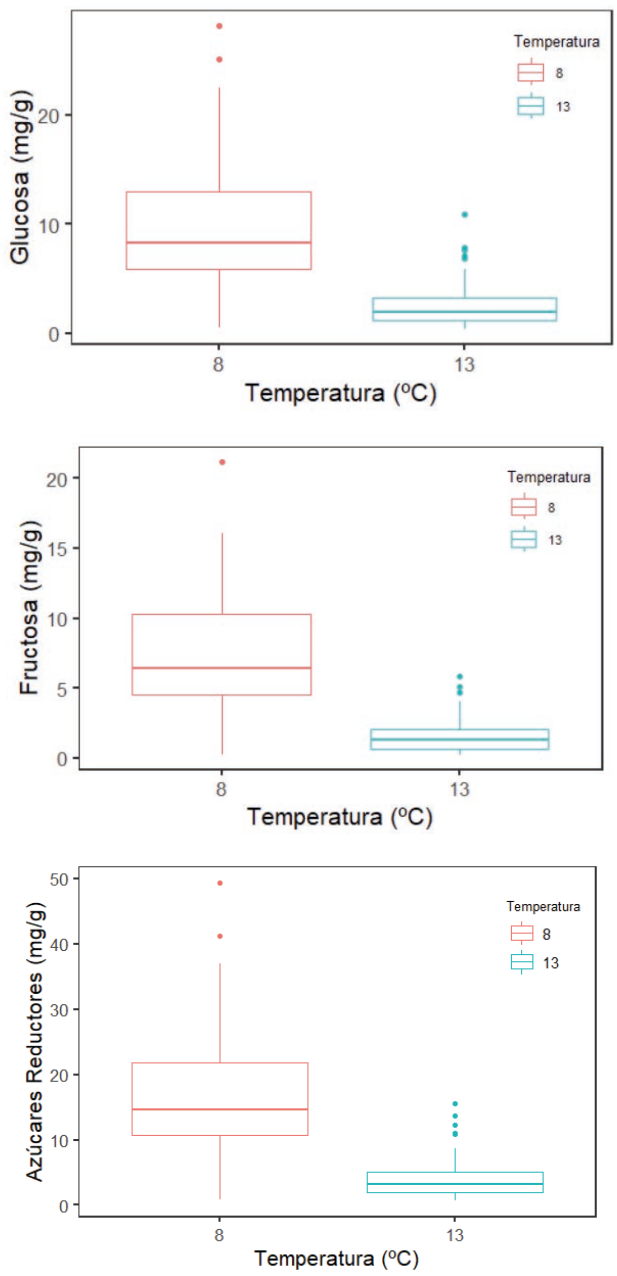
Las muestras de patatas de todos los tratamientos (5 x 2 x 2 x 6 = 120) fueron enviadas a los laboratorios del ICTAN-CSIC de Madrid para la determinación de azúcares. De cada una de las muestras liofilizadas y homogeneizadas se tomaron 200 mg en un tubo falcon de 15 mL, a los que se les añadió 9 mL de agua Milli-Q a 50 ºC y 1 mL de patrón interno de una solución de Sorbitol. El contenido de glucosa, fructosa y sacarosa en las muestras liofilizadas se determinó mediante un sistema de cromatografía iónica acoplado a detección amperométrica pulsada utilizando un HPLC. Los azúcares se cuantificaron mediante un método de patrón interno utilizando las respuestas de azúcar/sorbitol. El límite de cuantificación se fijó en 10 mg/kg.

2.4. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados con el programa R-Studio versión R4.0.5. Se calcularon los estadísticos básicos y los análisis de varianza de cada uno de los factores y de los factores cruzados con el fin de estudiar las posibles interacciones.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos mostraron que las variables no seguían una distribución normal, por lo que se realizó una ANOVA robusta [7]. Solo han aparecido diferencias significativas en las patatas que habían sido sometidas a diferentes temperaturas de conservación (Figura 1, Tabla 1) para una $p<0.05$, independientemente del agua aportada durante el cultivo y del tiempo conservado en las cámaras. Para el resto de factores, estrés hídrico y tiempo de conservación, no se han obtenido diferencias significativas ni tampoco se han observado interacciones entre los factores (Tablas 2 y 3).



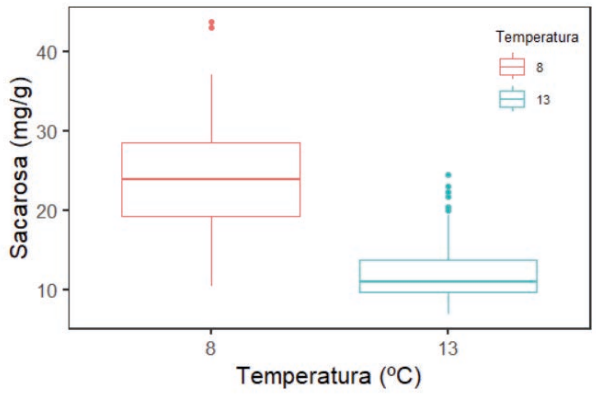


Figura 1. Contenido en glucosa, fructosa, azúcares reductores (glucosa + fructosa) y sacarosa (mg/g) en función de la temperatura de conservación (8 y 13ºC).

Tabla 1. Estadístico de los azúcares para las dos condiciones de temperatura ensayadas.

Variable	T (ºC)	Media (mg/g)	Máximo (mg/g)	Mínimo (mg/g)	Desviación (mg/g)	Intervalo confianza	t (p<0.05)
Glucosa	8	10.03*	28.22	0.54	6.07	5.14-7.48	10.72
	13	2.56*	10.86	0.39	2.20		
Fructosa	8	7.52*	21.19	0.23	4.29	3.66-5.39	10.39
	13	1.53*	5.86	0.24	1.26		
Azúcares Reductores	8	17.55*	49.41	0.77	10.15	8.83-12.85	10.71
	13	4.12*	15.59	0.62	3.40		
Sacarosa	8	24.58*	43.71	10.39	8.03	16.90-20.39	21.22
	13	12.70*	24.46	6.90	4.41		

** Diferencias significativas*

Tabla 2. Estadístico de los azúcares (en mg/g) para las dos condiciones de riego ensayadas.

Variable	Riego	Media	Máximo	Mínimo	Desviación
Glucosa	Control	6.49	28.23	0.39	5.67
	Estrés	6.12	25.19	0.54	6.15
Fructosa	Control	4.64	21.19	0.24	4.21
	Estrés	4.41	16.10	0.23	4.53
Azúcares Reductores	Control	11.14	49.42	0.62	9.79
	Estrés	10.53	41.30	0.77	10.51
Sacarosa	Control	17.32	35.20	6.90	7.13
	Estrés	19.97	43.72	8.15	10.07

Los valores más altos de azúcares se obtuvieron en las patatas conservadas a 8ªC, con una media 10.03 mg de glucosa, 7.52 mg de fructosa y 24.58 mg de sacarosa por gramo de liofilizado analizado. Además, la desviación típica para todos los azúcares fue más amplia en el tratamiento de 8ºC que en el de 13ºC.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por otros científicos que evidencian que aquellas patatas que se conservan a 8ºC o menos antes de ser procesadas, generan un mayor contenido de azúcares reductores porque, en esas condiciones, se incrementa la actividad enzimática del almidón. Posteriormente, será más fácil que se forme acrilamida durante el proceso de fritura [8]. Probablemente las diferencias entre las dos condiciones de riego aplicado

en este ensayo no fueron suficientes para que la variedad *Jaerla,* en las condiciones de cultivo, pudiera desarrollar diferencias en su composición.

4. Conclusiones

No se encontraron diferencias significativas en el contenido en azúcares en las patatas de la variedad *Jaerla* ni para las condiciones de estrés hídrico a las que fueron sometidas ni para un período de conservación frigorífica que varió entre 0 y 13 semanas.

Sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas en cuanto a su contenido en azúcares tanto en los azúcares reductores (glucosa y fructosa) como en sacarosa entre las dos temperaturas de conservación. Se han obtenido contenidos más bajos en aquellas patatas que fueron conservadas a 13ºC frente a las que se conservaros a 8ºC.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MICINN: PID2019-109790RR-C22. Los autores agradecemos a Francisco Javier Morales y Marta Mesías del ICTAN-CSIC de Madrid por su colaboración.

Tabla 3. Estadístico de los azúcares (en mg/g) para las seis fechas de ensayos (0: 04/07/22; 1: 19/06/22; 2: 09/08/22; 3: 30/08/22; 4: 20/09/22; 5: 11/10/22).

Variable	Fecha	Media	Máximo	Mínimo	Desviación
Glucosa	0	0.86	2.86	0.28	0.66
	1	4.39	11.37	0.69	3.31
	2	6.19	14.30	0.38	4.71
	3	8.21	25.19	0.54	7.86
	4	5.48	12.66	0.64	4.00
	5	7.28	28.22	0.60	7.74
Fructosa	0	0.23	0.72	0.09	0.17
	1	3.66	10.93	0.27	3.16
	2	4.75	12.73	0.23	4.17
	3	5.60	16.10	0.23	5.36
	4	3.58	7.90	0.44	2.54
	5	5.02	21.19	0.35	5.73
Azúcares Reductores	0	1.10	3.41	0.37	0.82
	1	8.05	22.30	0.96	6.44
	2	10.94	27.03	0.62	8.46
	3	13.81	41.30	0.77	13.21
	4	9.07	20.56	1.09	6.47
	5	12.30	49.41	0.96	13.43
Sacarosa	0	16.99	24.91	10.42	3.61
	1	24.34	42.95	15.54	7.27
	2	21.19	37.01	10.23	9.30
	3	17.57	43.71	9.55	9.22
	4	16.28	36.23	6.90	9.05
	5	13.82	21.97	8.42	4.80

Referencias

6. EC (European Commission). Commission Regulation (EU) 2017/2158 of 20 November 2017. OJEU 2017, L304, 24–44.

7. Zyzak, D.V., Sanders, R.A., Stojanovic, M., Tallmadge, D.H., Eberhart, B.L., Ewald, D.K., Gruber, D.C., Morsch, T.R., Strothers, M.A., Rizzi, G.P. Acrylamide formation mechanism in heated foods. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2003, 51, 4782–4787.
8. Kumar, D., Singh, B.P., Kumar, P. An overview of the factors affecting sugar content of potatoes. Annals of Applied Biology. 2004, 145, 247–256.
9. Arazuri, S., López-Maestresalas, A., Pérez, C., Morales. F.J., Mesias, M. & Jarén, C. (2019). Determinación de precursores de acrilamida en patata por NIRS. Proceedings of the 10th Iberian Agroengineering Congress, 1, 1176-1180.
10. Low, M.Y., Koutsidis, G., Parker, J.K., Elmore, J.S., Dodson, A.T. y Mottram, D.S. (2006). Effect of citric acid and glycine addition on acrylamide and flavor in a potato model system. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54, pp: 5976-5983.
11. Fueyo Olmo, M.A. El cultivo de la patata. Producción convencional, integrada y ecológica. 2007. Ediciones MADU S.A. 320 págs. ISBN 978-84-959998-93-4.
12. Mair P., y Wilcox R.R. (2020). Robust Statistical Methods in R Using the WRS2 Package. Behavior Research Methods, 52, 464–488.
13. AECOSAN (2017). Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Consumo, Seguridad Alimentaria y Nutrición sobre los criterios de seguridad que limiten la exposición a acrilamida producida por la fritura de patatas. Revista del Comité científico nº6, 29-55. Número de referencia: AECOSAN-2017-007.

Determinación de la textura en caqui 'Rojo brillante' mediante imagen hiperspectral Vis-NIR

Salvador Castillo-Gironés[1], Ángel González-Muelas[3], Sergio Cubero[1], Alejandro Rodríguez[4], Sandra Munera[3], Alejandra Salvador[2], Alberto Guirao[1,2], Juan Gómez-Sanchís[3], José Blasco*[1]

[1] Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), CV-315, km 10,7, 46113, Moncada (Valencia) Spain. castillo_salgirb@gva.es, guirao_albcar@gva.es, blasco_josiva@gva.es, cubero_ser@gva.es
[2] Centro de Poscosecha, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), CV-315, km 10,7, 46113, Moncada (Valencia) Spain. guirao_albcar@gva.es, salvador_ale@gva.es
[3] IDAL, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Valencia, Av. de la Universidad , S/N, 46100 Burjassot (Valencia) Spain. Juan.Gomez-Sanchis@uv.es
[4] Departamento de Ingeniería Gráfica. UniversitatPolitècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain. sanmupi@upv.es, alrodor@upv.es, naleixos@dig.upv.es, gonmuean@uv.es

Abstract: Quality of persimmon cv 'Rojo Brillante' fruits can be affected by changes in texture during postharvest storage if storage conditions are not appropriate, which can impact consumer acceptance. Therefore, developing accurate tools to predict texture before marketing is of great interest. Hyperspectral imaging is a non-destructive technology that has been proven effective for predicting internal attributes. This study aimed to evaluate the usefulness of hyperspectral images for predicting flesh firmness. A total of 3,340 persimmons were stored for three months under different temperature conditions (0°C, 1°C, and 5°C) to induce varying changes in flesh texture. Hyperspectral images were acquired at harvest and every month for each storage condition. Flesh firmness was measured using a texturometer immediately after image acquisition. Samples were clustered into three groups using *k*-Means based on their firmness data and mean spectra was extracted from each persimmon. Samples were randomly divided into training (70%) and test (30%) sets. Besides, wavelength reduction was performed

using Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS) coefficients. The training data was used to train PLS, Support Vector Machine, and Random Forest models using all spectra and selected wavelengths. All models achieved high accuracies, indicating that even using a few wavelengths, it is possible to accurately predict the flesh firmness of persimmon fruits.

Palabras clave: caqui, imagen espectral, espectro, aprendizaje supervisado

1. Introducción

La calidad del caqui 'Rojo Brillante' puede verse afectada por alteraciones en la textura durante el periodo de postcosecha cuando las condiciones de almacenamiento no son adecuadas. Por lo tanto, el desarrollo de herramientas precisas para determinar la textura de esta fruta antes de su comercialización es de gran interés para los productores. La imagen hiperespectral es una tecnología probada para predecir atributos de calidad internos de manera no destructiva [1] y puede ser utilizada para predecir la textura de la pulpa [2] utilizando métodos estadísticos quimiométricos.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la utilidad de la imagen hiperespectral Vis/NIR, analizada a través de tres modelos de aprendizaje automático diferentes: Máquina de Soporte Vectorial (SVM), Análisis Discriminante de Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-DA) y Random Forest (RF), para detectar cambios en la textura de la pulpa del caqui 'Rojo Brillante' durante el almacenamiento. Así mismo, dado que es importante reducir la complejidad computacional de la imagen hiperespectral, se realizó una selección de longitudes de onda para entrenar los modelos SVM, PLS-DA y RF.

2. Materiales y métodos

2.1. Material vegetal

Se almacenaron un total de 3340 frutas de caqui cv 'Rojo Brillante' durante un máximo de tres meses a tres temperaturas (0 °C, 1 °C y 5 °C) y 90% de humedad relativa para provocar diferentes tipos de cambios en la textura de la pulpa. En la cosecha y posteriormente cada mes, se adquirieron imágenes hiperespectrales de un conjunto aleatorio de frutas (250 frutas cada vez) de las tres condiciones de almacenamiento.

2.2. Caracterización de la textura

Para la caracterización de la textura se llevó a cabo un análisis destructivo de rotura de la pulpa del fruto, en el que se midió en cada momento la fuerza aplicada por el texturómetro hasta llegar al momento de rotura de la pulpa del fruto al que previamente se le había quitado la piel, donde la fuerza aplicada es máxima. La firmeza de la pulpa de estas frutas se midió con un texturómetro (Instron Corp., mod. 4301, Canton, MA, EE. UU.) utilizando un punzón de 8 mm de diámetro. Las curvas obtenidas de todas las frutas se procesaron utilizando *k*-Means, que es un algoritmo de clasificación basado en aprendizaje automático no supervisado para agrupar las frutas en diferentes grupos en función de la textura estimada a partir de las curvas. El número de clases en las que se dividió la fruta, se determinó mediante el método del codo (Elbow), que consiste en trazar una curva con la variación explicada en función del número de clústeres obtenidos por el algoritmo Kmeans y elegir el codo de la curva como el número de clústeres a utilizar [3].

2.3. Adquisición y procesado de imágenes

Se adquirieron imágenes hiperespectrales de todas las frutas utilizando una cámara hiperespectral (CoolSNAP ES, Photometrics, AZ, EE. UU.) y dos filtros sintonizables de cristal

líquido en el visible e IR cercano (Varispec VIS-07 y NIR-07, Cambridge Research and Instrumentation, Inc., Ma, EE. UU.), cubriendo un rango espectral de 420-1010 nm. Las imágenes, con una resolución espacial de 1392x1040 píxeles y 0,14 mm/píxel, se capturaron cada 10 nm para obtener un total de 60 longitudes de onda. Las frutas se colocaron dentro de una campana de iluminación semiesférica iluminado por doce lámparas halógenas de 37 W (Eurostar IR Halogen MR16, Ushio America, Inc., CA, EE. UU.) dispuestas de forma equidistante, ofreciendo luz indirecta. La reflectancia de las muestras se corrigió utilizando una referencia blanca (Spectralon, NH, EE. UU.) y negra (evitando la entrada de luz en la cámara).

Posteriormente, se eliminó el fondo de las imágenes y se extrajo el espectro medio de cada fruta. A continuación, se utilizaron tres métodos de aprendizaje supervisado para predecir las texturas a partir de las imágenes hiperespectrales. Los datos utilizados para crear los modelos fueron los espectros medios de las frutas, mientras que el bloque de predicción estaba compuesto por las clases obtenidas de las curvas utilizando *k*-Means. Las muestras se dividieron aleatoriamente en un conjunto de entrenamiento (70 %) y un conjunto de prueba externo (30 %).

2.4. Análisis de los datos

Para extraer los datos de las imágenes y crear los modelos predictivos, se utilizó la versión 3.9 del software Python con las bibliotecas Scikit-learn, Scikit-image, Pandas, Matplotlib y Numpy. Se utilizó el método RandomizedsearchCV de Scikit-learn para optimizar los parámetros del clasificador y distinguir entre los grupos de textura maximizando precisión y minimizando error cuadrático medio (RMSE). Se utilizaron tres modelos de aprendizaje automático diferentes basados en análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), máquinas de vector soporte (SVM) y r*andom forest* (RF), basado en árboles de decisión.

En el caso de PLS-DA, se obtuvo el RMSE más bajo de los parámetros de entrenamiento utilizando 20 variables latentes. Con SVM, los mejores parámetros fueron los siguientes: el kernel de función de base radial (RBF), peso de clase "equilibrado", gamma de 10 y C de 2. Y en el caso de RF, los mejores parámetros encontrados fueron: número de estimadores de 847, la división mínima de muestras de 2, número mínimo de hojas de 1, una profundidad máxima de 20, el parámetro max_features de 'sqrt' y puntuaciones oob y variables de arranque como Falsas.

2.5. Reducción de longitudes de onda

Las imágenes hiperespectrales generan una gran cantidad de datos, muchos de ellos correlacionados, que necesitan una elevada complejidad computacional para su procesamiento. Por ello, se ha procedido a seleccionar un conjunto menor de longitudes de onda que retenga la máxima información posible. El método utilizado fue el vector de los coeficientes de regresión PLS, que mide la asociación entre cada variable y la respuesta, y selecciona variables en dos pasos: (i) se ajusta el modelo PLS-DA a los datos, y (ii) aplica un umbral a los coeficientes de regresión y se seleccionan las longitudes de onda cuyo valor del coeficiente sea mayor a ese umbral. De este modo, se pueden seleccionar variables con un valor alto porque contribuyen más a la clasificación y se pueden ignorar aquellas con un valor absoluto pequeño.

Tras la reducción de las longitudes de onda, se utilizó el mismo procedimiento descrito en la sección anterior para entrenar los métodos PLS-DA, SVM y RF, utilizando solo las longitudes de onda seleccionadas. Para PLS-DA, se utilizaron el mismo número de componentes que las longitudes de onda. Con respecto a SVM, se eligieron los parámetros de entrenamiento: kernel RBF, gamma 10, peso de clase "ninguno" y un valor de C de 2,442. Para el clasificador RF, se eligieron los parámetros de número de estimadores de 1581, división mínima de muestras de 2, número mínimo de hojas de 1, características máximas como "log2", profundidad máxima de 30 y arranque como Falso.

3. Resultados y discusión

3.1. Utilizando todo el espectro

La curva de codo (Elbow) de la Figura 1, obtenida a partir de la utilización del modelo de aprendizaje no supervisado K-Means aplicado a todas las muestras, muestra que con 3 clusters la curva de inercias frente al número de clusters se empieza a aplanar, indicando wue 3 es el número óptimo de clústers. Por lo tanto, el número óptimo de clases obtenidas por el algoritmo a partir de las medidas destructivas del punto de rotura de la pulpa de la fruta fue de 3, que se asociaron con frutas con firmezas dura, media y suave. Las curvas promedio de ruptura de la pulpa para cada grupo se muestran en la Figura 2, donde es posible observar que existe una diferencia entre la fuerza máxima aplicada y el tiempo requerido hasta alcanzar el punto de rotura.

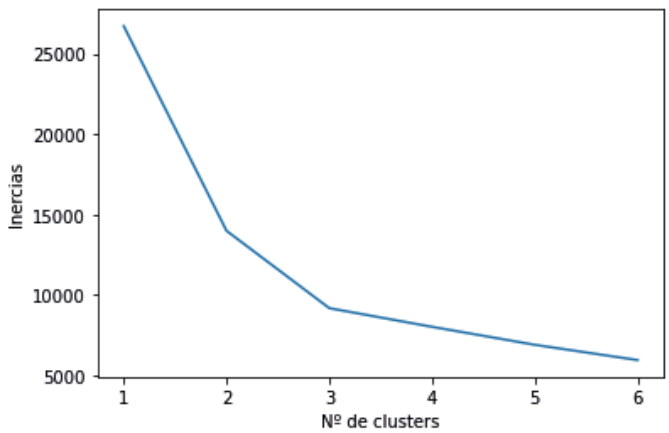


Figura 1. Curva de Elbow para determinar el número de clústeres

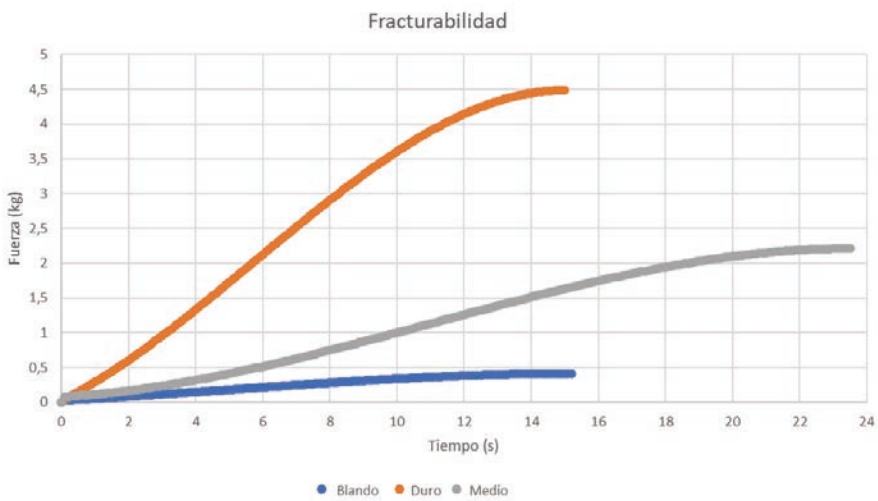


Figura 2. Curvas de rotura de pulpa para cada grupo de textura creado

Los espectros de las muestras después del tratamiento SNV para corrección de la dispersión de la luz se observan en la Figura 3. A lo largo del espectro se aprecian regiones donde hay un rango más amplio de reflectancia, mostrando que las diferencias entre muestras se centran en algunas longitudes de onda específicas. Esto se confirma al graficar los espectros promedio de cada uno de los clústeres previamente creados (Figura 4), donde se observaron diferencias

espectrales alrededor de los 960 nm, asociada con un pico de absorción de agua [4], y en las bandas de absorción asociadas con carotenoides y clorofila (alrededor de 500 nm y 680 nm) [5], que son pigmentos relacionados con la evolución de la fruta y los cambios en la estructura de la pulpa causados por el almacenamiento a diferentes temperaturas.

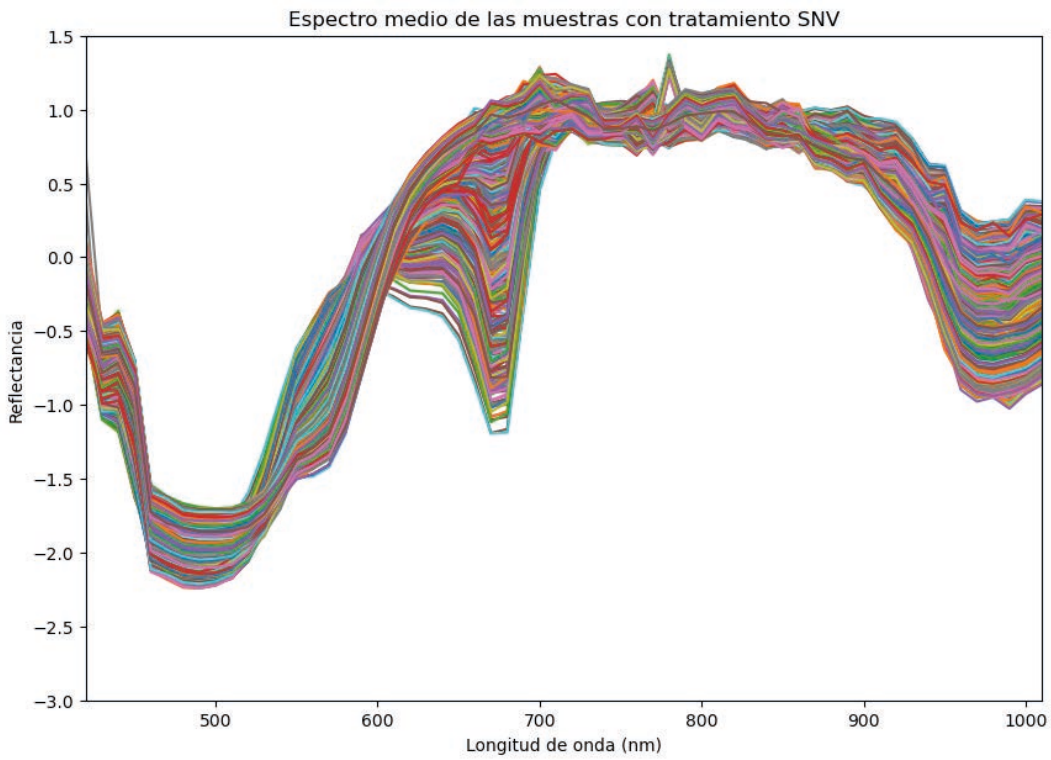


Figura 3. Espectros de cada una de las muestras tras el tratamiento con SNV

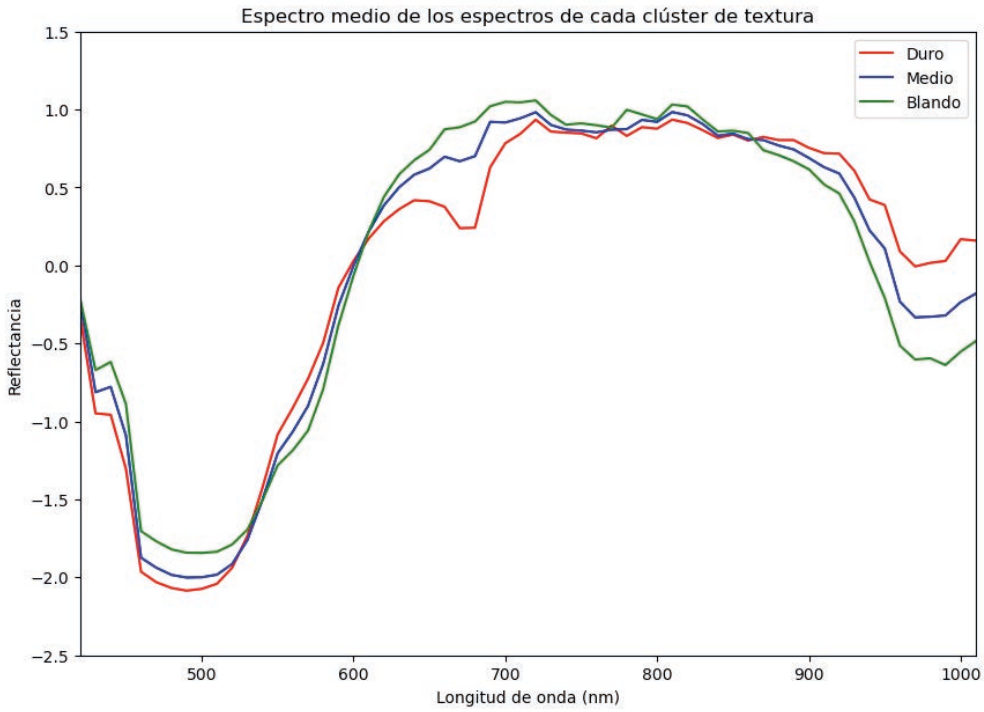


Figura 4. Espectro medio de cada grupo de clústers

Los resultados de la clasificación obtenidos por PLS-DA, RF y SVM se muestran en las matrices de confusión de las Tablas 1, 2 y 3, respectivamente. Con PLS-DA, se obtuvo una clasificación correcta del 98% utilizando 20 componentes (el número de componentes que obtuvo la mayor precisión) para el conjunto de prueba. Con RF, también se obtuvo una precisión del 98%. Sin embargo, como se muestra en las tablas de confusión, RF funciona ligeramente peor al clasificar con firmeza media y blandos. No obstante, los mejores resultados se obtuvieron utilizando SVM, donde se logró una precisión media del 99%.

Tabla 1. Matriz de confusión para los datos de test con PLS

	Predichos			
	Duro	**Medio**	**Blando**	**Precisión (%)**
Duro	250	3	0	98,81%
Medio	4	498	2	98,81%
Blando	0	8	233	96,68%

Tabla 2. Matriz de confusión para los datos de test con RF

	Predicted			
	Hard	**Medium**	**Soft**	**Precisión (%)**
Hard	253	0	0	100,00%

Medium	2	493	9	97,82%
Soft	0	10	231	95,85%

Tabla 3. Matriz de confusión para los datos de test con SVM

	Predichos			
	Hard	**Medium**	**Soft**	**Precisión (%)**
Hard	252	1	0	99,60%
Medium	1	500	3	99,21%
Soft	0	5	236	97,93%

3.1. Selección de longitudes de onda

La figura 5 muestra los coeficientes del modelo PLS obtenidos, para los cuales se estableció un límite de +0.45 y -0.45 a partir del cual se seleccionaron las longitudes de onda más importantes, que son las que se muestran en la Tabla 4 y que fueron 490, 590, 750, 810, 830 y 1000 nm.

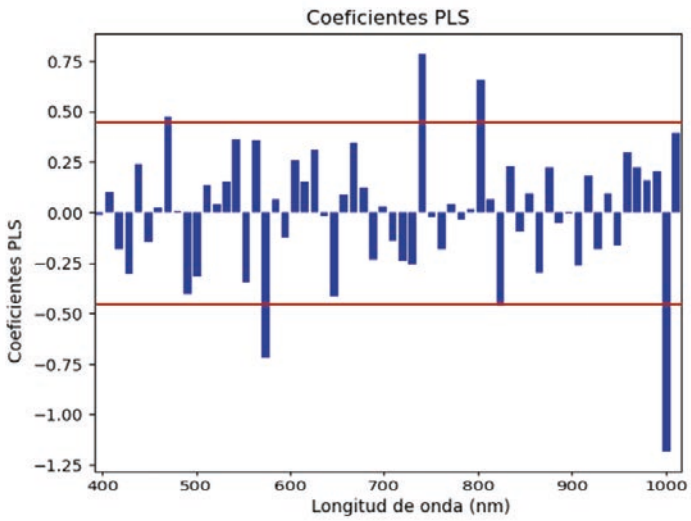


Figura 5. Coeficientes PLS para cada longitud de onda y punto de corte para la selección de las longitudes más importantes

Tabla 4. Coeficientes PLS y longitudes de onda seleccionadas

Longitudes seleccionadas	**Coeficientes PLS**
490	0.474
590	-0.724
750	0.786
810	0.656
830	-0.463
1000	-1.185

Una vez seleccionadas las longitudes de onda más importantes, se entrenaron los modelos con los nuevos datos. Los resultados de la clasificación obtenidos utilizando PLS-DA, RF y SVM se muestran en las matrices de confusión de las Tablas 5, 6 y 7, respectivamente. Con PLS-DA, se

obtuvo una precisión del 88% utilizando los 6 componentes para el conjunto de pruebas, obteniendo los peores resultados. Con RF, se obtuvo una precisión del 95%, mejor que con PLS-DA. Sin embargo, los mejores resultados se obtuvieron utilizando SVM, donde se logró una precisión del 97%, demostrando que, con tan solo 6 longitudes de onda, la clasificación correcta no disminuye considerablemente, y realmente se pueden obtener resultados muy buenos.

Tabla 5. Matriz de confusión para los datos de test con PLS

	Predicted			
	Hard	**Medium**	**Soft**	**Precisión (%)**
Hard	222	31	0	87,75%
Medium	12	455	37	90,28%
Soft	0	44	197	81,74%

Tabla 6. Matriz de confusión para los datos de test con RF

	Predicted			
	Hard	**Medium**	**Soft**	**Precisión (%)**
Hard	251	2	0	99,21%
Medium	5	478	21	94,84%
Soft	0	13	228	94,61%

Tabla 7. Matriz de confusión para los datos de test con SVM

	Predicted			
	Hard	**Medium**	**Soft**	**Precisión (%)**
Hard	250	3	0	98,81%
Medium	4	494	6	98,02%
Soft	0	16	225	93,36%

4. Conclusiones

Los frutos de caqui 'Rojo Brillante' experimentan cambios de textura dependiendo de las condiciones de almacenamiento. En este trabajo, a partir de diferentes condiciones de almacenamiento y de las curvas de fuerza obtenidas con un texturómetro, se obtuvieron tres grupos de textura de forma no supervisada utilizando *k*-Means. Posteriormente, se utilizó imagen hiperespectral Vis-NIR para clasificar la fruta de forma no destructiva según estos grupos. Los mejores resultados con las muestras del conjunto independiente de test se obtuvieron utilizando todas las longitudes de onda y SNV con una precisión del 99%. Con las 6 bandas seleccionadas, se obtuvo una precisión del 97% con SVM. Por lo tanto, los resultados indican que la imagen hiperespectral es efectiva para predecir los cambios en la textura de la pulpa de 'Rojo Brillante'.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado a través de los proyectos AEI PID2019-107347RR-C31, C32 y C33 y fondos FEDER, y GVA CIPROM/2021/014. Salvador Castillo agradece a INIA por la beca FPI-INIA PRE2020-094491, con el apoyo de fondos FSE de la Unión Europea. Los autores agradecen a la Cooperativa Agrícola Ntra. Sra. Del Oreto Coop. V. (CANSO) por

suministrar la fruta y por el apoyo técnico. Sandra Munera agradece el contrato postdoctoral Juan de la Cierva-Formación (FJC2021-047786-I) cofinanciado por el MICIN AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

Referencias

1. D. Lorente, N. Aleixos, J. Gómez-Sanchis, S. Cubero, O. L. García-Navarrete, and J. Blasco, "Recent Advances and Applications of Hyperspectral Imaging for Fruit and Vegetable Quality Assessment," Food Bioproc Tech, vol. 5, no. 4, pp. 1121–1142, 2012, doi: 10.1007/s11947-011-0725-1.
2. S. Munera, A. Rodríguez-Ortega, N. Aleixos, S. Cubero, J. Gómez-Sanchis, and J. Blasco, "Detection of Invisible Damages in 'Rojo Brillante' Persimmon Fruit at Different Stages Using Hyperspectral Imaging and Chemometrics," Foods, vol. 10, no. 9, 2021, doi: 10.3390/foods10092170.
3. T. S. Madhulatha, "An Overview on Clustering Methods," IOSR Journal of Engineering, vol. 02, no. 04, pp. 719–725, May 2012, doi: 10.9790/3021-0204719725.
4. H. Büning-Pfaue, "Analysis of water in food by near infrared spectroscopy," Food Chem, vol. 82, no. 1, pp. 107–115, 2003, doi: https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00583-6.
5. A. R. Wellburn, "The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution," J Plant Physiol, vol. 144, no. 3, pp. 307–313, 1994, doi: https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-6

14.



Uso de imagen hiperespectral para la discriminación en postcosecha de variedades similares de níspero

Salvador Castillo-Gironés[1], Sergio Cubero[1], Marina Lopez-Chulia[1], Sandra Munera[2], Alejandro Rodríguez[3], Nerea Martínez-Onandi[1], Juan Gómez-Sanchís[2], Nuria Aleixos[3], José Blasco*[1]

[1] Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), CV-315, km 10,7, 46113, Moncada (Valencia) Spain. castillo_salgirb@gva.es, lopez_marchua@gva.es, blasco_josiva@gva.es, cubero_ser@gva.es, martinez_nerona@gva.es
[2] IDAL, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Valencia, Av. de la Universidad , S/N, 46100 Burjassot (Valencia) Spain. Juan.Gomez-Sanchis@uv.es
[3] Departamento de Ingeniería Gráfica. UniversitatPolitècnica de València. Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain. sanmupi@upv.es, alrodor@upv.es, naleixos@dig.upv.es

Abstract: Food fraud is a serious concern for the food industry and consumers. A common fraud is mixing fruit cultivars with similar appearance but significant differences in quality and sensory characteristics, and, hence, different prices. Detecting these abnormalities by visual inspection is challenging when all fruits appear similarly. It is then required tools capable of separating the fruits by detecting some internal properties, such as those based on spectral information.

In this study, two loquat cultivars were used: 'Algerie', a traditional sweet cultivar, and 'Xirlero', a cultivar with good production but slightly astringent. Both are harvested during the same period and have similar external features but differ in sensory characteristics and price. Samples corresponding to 300 'Xirlero' and 259 'Algerie' loquats were selected. Hyperspectral images were acquired in the range 450 – 1000 nm, and the mean spectra of each loquat were extracted. The spectra collected were divided into a training set (70%) and an independent test set (30%). Three models were built to classify the two varieties: Partial Least Squares Discriminant Analysis, Support Vector Machine, and Extra Trees Classifier. All models achieved accuracy above 85%, indicating that hyperspectral imaging is a promising technology for distinguishing between very similar cultivars of fruits.

Palabras clave: Níspero, imagen hiperespectral, variedad, aprendizaje supervisado

1. Introducción

Algunas variedades de frutas recolectadas en el mismo periodo presentan una apariencia similar, aunque sus características sensoriales puedan diferir considerablemente y, por lo tanto, su precio ser muy diferente. Esto causa que se puedan mezclar durante las operaciones poscosecha, causando el rechazo de los consumidores. En este estudio se utilizaron dos variedades de níspero como son 'Algerie', que es una variedad tradicional y con un sabor dulce y 'Xirlero', que es una variedad reciente, con un buen tamaño y una producción en aumento, pero con menor acidez que Algerie y tiene cierta astringencia. Ambas variedades se cosechan al mismo tiempo y tienen características externas similares, pero diferente sabor y coste de producción.

Visualmente, resulta imposible distinguir ambas variedades, porlo que tampoco es posible hacerlo mediante cámaras de color estándar. Como alternativa, se considera viable utilizar la imagen hiperespectral, ya que se ha probado con éxito para diferenciar variedades de nectarina [1], lichi [2], maíz dulce [3] o semillas de okra [4]. Esta tecnología combina la información espacial y espectral y se ha mostrado efectiva para predecir de manera no destructiva propiedades físicoquímicas en frutas [5]. Este trabajo tiene como objetivo estudiar la aplicación de la imagen hiperespectral visible e infrarroja cercana para discriminar entre estas dos variedades de níspero con apariencia similar, pero características internas diferentes. Además, se ha llevado a cabo una reducción de la información espectral mediante la selección de un subconjunto de longitudes de onda, para determinar si es posible separar estas variedades utilizando un sistema multiespectral, con un menor coste y más fácilmente asumible por la industria.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras

Se obtuvieron un total de 259 nísperos 'Algerie' y 300 'Xirlero' de un cultivo comercial, sin defectos ni daños externos aparentes. Las frutas se recolectaron semanalmente durante cinco semanas, desde la segunda semana de abril hasta la primera de junio, para obtener diferentes estados de madurez.

2.2. Adquisición y procesado de imágenes.

Se adquirieron imágenes hiperespectrales de los 559 frutos utilizando un sistema de imágenes hiperespectrales de barrido (405-1000 nm) con una resolución espectral de 5 nm. El sistema estaba compuesto por una cámara (UI-3060CP-M-GL, IDS, Oberslum, Alemania) y un espectrógrafo (V10 Specim, Oulu, Finlandia). El sistema de iluminación estaba compuesto dos filas de 6 focos halógenos (25 W) situados a ambos lados de las muestras con una orientación de 45°. Las muestras se colocaron manualmente en una cinta transportadora que se desplazaba a una velocidad de 20 mm/s y se tomó una imagen por fruta.

La reflectancia de las imágenes se corrigió utilizando una referencia blanca (Spectralon, NH, EE. UU.) y una referencia oscura, tapando la lente de la cámara. Posteriormente, las imágenes se segmentaron para separar el fruto del fondo mediante binarización, y se extrajo el espectro medio de cada fruto en la imagen. los espectros se pretrataron con Standard Normal Variate (SNV) para corregir la dispersión, y luego se dividió el conjunto de datos al azar en conjuntos de entrenamiento (70 %) y prueba independiente (30%).

2.2. Creación de modelos predictivos

Para extraer los datos de las imágenes y crear los modelos predictivos, se utilizaron las librerías Matplotlib y Numpy. También se utilizó la librería RandomizedsearchCV de Scikit-learn

para buscar entre todos los parámetros posibles que permite scikitlearn para crear los modelos, y así optimizar al máximo el entrenamiento y distinguir entre las dos variedades con la mayor precisión y el menor error cuadrático medio (RMSE). Posteriormente, se utilizaron tres modelos de aprendizaje automático basados en análisis discriminante de mínimos cuadrados parciales (PLS-DA), máquina de vector soporte (SVM) y clasificador de árboles extra (ETC), basado en árboles de decisión.

En el caso de PLS-DA, se obtuvo el RMSE más bajo usando 20 variables latentes. Con el SVM, los mejores hiperparámetros obtenidos fueron el kernel de Función de Base Radial (RBF), el peso de clase equilibrado, gamma de 1 y C de 8,685. Y en el caso del ETC, los mejores parámetros encontrados fueron el número de estimadores de 952, la división mínima de muestras de 5, mínimo de hojas de 1, una profundidad máxima de 80, el parámetro max_features de 'sqrt' y las puntuaciones oob y variables de arranque como Falso.

2.2. Selección de longitudes de onda

Después de entrenar los modelos usando todas las longitudes de onda disponibles, se estudió la reducción de dimensionalidad comparando el enfoque de selección de longitudes de onda basado en el análisis de componentes principales (PCA) con el enfoque del vector de los coeficientes de regresión PLS para elegir las longitudes de onda más importantes. El enfoque del uso del PCA se llevó a cabo del mismo modo a lo realizado en otros trabajos similares sobre manzanas [6], [7], melocotones [8] o nísperos [9]: se seleccionan el número de componentes principales (CP), que explican el 99.5% de la varianza total (3 en este caso) y de esos componentes, se escogen las longitudes de onda con los loadings mayores.

Los resultados obtenidos con las longitudes de onda seleccionadas utilizando el enfoque del vector de los coeficientes de regresión PLS, se compararon con las longitudes de onda seleccionadas utilizando el enfoque del vector de los coeficientes de regresión PLS. Las variables fueron seleccionadas en dos pasos: (i) se ajusta el modelo PLS-DA a los datos, y (ii) la selección de variables se basa en un umbral aplicado a los coeficientes de regresión, donde se seleccionan las longitudes de onda cuyo valor del coeficiente sea mayor a ese umbral. Las variables con un valor absoluto alto pueden ser seleccionadas porque hacen la mayor contribución a la clasificación y aquellas con un valor absoluto pequeño pueden ser ignoradas porque apenas influyen. Finalmente, y dado que las longitudes de onda más importantes eran idénticas, se optó por utilizar el enfoque de PLS, principalmente utilizado en la bibliografía.

Para la creación de los modelos con lsolamente las longitudes de onda seleccionadas, se utilizó el mismo procedimiento descrito en la sección anterior para entrenar PLS-DA, SVM y ETC.

Para el PLS-DA, se utilizaron el mismo número de componentes que las longitudes de onda seleccionadas cuando se entrenó con todas las longitudes de onda. En cuanto al SVM, los parámetros de entrenamiento elegidos fueron kernel RBF, gamma 100, peso de clase Ninguno y un valor de C de 0.45. Para el clasificador ETC, los parámetros elegidos fueron una puntuación Oob verdadera, número de estimadores de 219, división de muestras mínimas de 2, número mínimo de hojas de 2, características máximas como "sqrt", profundidad máxima 110 y arranque como Verdadero.

3. Resultados y discusión

3.1. Utilizando todo el espectro

Se encontraron diferencias en el espectro promedio entre las variedades ‘Xirlero’ y ‘Algerie’, como se muestra en la Figura 1. Algunas diferencias aparecen en el pico asociado a la abosrción del agua (970 nm) [10], que fue más pronunciado en la variedad 'Xirlero', y en longitudes de onda relacionadas con pigmentos como clorofilas (en torno a 675 nm) [11].

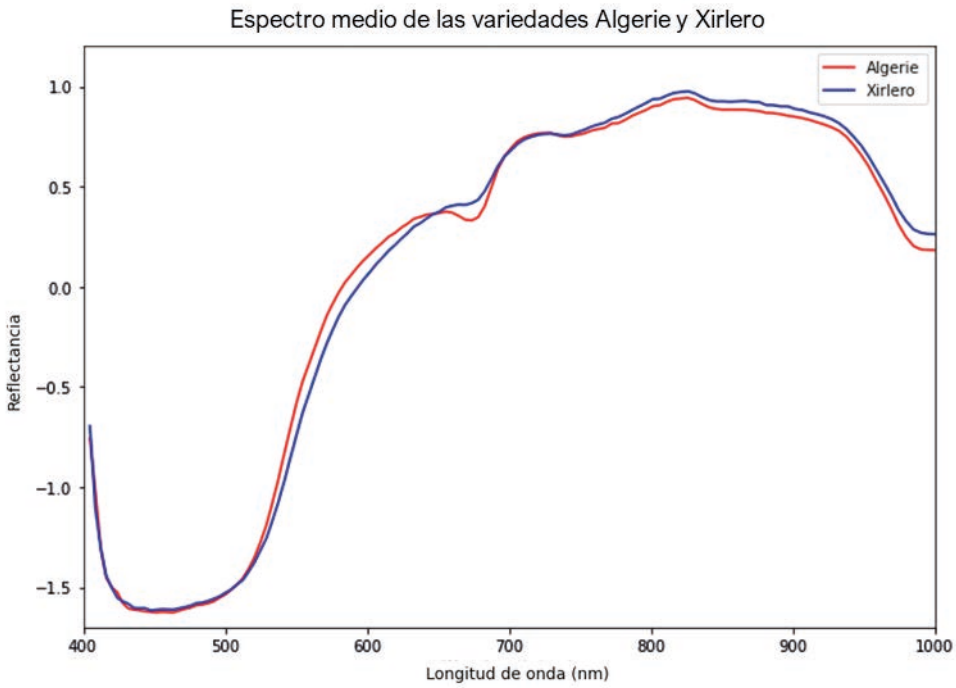


Figura 1. Espectro medio de las variedades Algerie y Xirlero

Tras la evaluación de los modelos con el conjunto de datos de validación independiente, se obtuvo una precisión superior al 85% con todos los modelos. En el caso del ETC, la clasificación correcta fue del 85% (Tabla 1). En cuanto al PLS-DA, se obtuvo una precisión del 93% (Tabla 2), y en el modelo SVM, la precisión fue del 86% (Tabla 3). Por lo tanto, el mejor método para discriminar ambas variedades fue PLS-DA.

Tabla 1. Matriz de confusión para los datos de test con ETC

	Predicho		
	'Algerie'	**'Xirlero'**	**Precisión (%)**
'Algerie'	65	12	84,42%
'Xirlero'	14	77	84,62%

Tabla 2. Matriz de confusión para los datos de test con PLS-DA

	Predicho		
	'Algerie'	**'Xirlero'**	**Precisión (%)**
'Algerie'	68	9	88,31%
'Xirlero'	2	89	97,80%

Tabla 3. Matriz de confusión para los datos de test con SVM

	Predicho		
	'Algerie'	**'Xirlero'**	**Precisión (%)**
'Algerie'	68	9	88,31%
'Xirlero'	15	76	83,52%

3.1. Selección de longitudes de onda

Tras comparar el enfoque de selección de longitudes de onda basado en el PCA con el enfoque del vector de los coeficientes de regresión PLS para elegir las longitudes de onda más importantes y tras ver que los resultados de ambos eran muy similares, se optó por utilizar el enfoque de PLS, mejor aceptado por la comunidad quimiométrica.

Con el enfoque de los coeficientes de regresión PLS obtenidos, se estableció un límite de +0.45 y -0.45 a partir del cual se seleccionaron las longitudes de onda más importantes, que correspondían a las longitudes de onda 995, 550, 678, 508 y 412 nm.

Después de la selección de las longitudes de onda se entrenaron nuevos modelos con las cinco longitudes de onda seleccionadas y se obtuvo una clasificación correcta superior al 84% en todos ellos, utilizando el conjunto de prueba. Con PLS-DA se obtuvo una precisión media del 84%, con ETC una precisión del 84% y con SVM una precisión del 85%, que fue la más alta. En todos los casos, la variedad 'Xirlero' fue la más difícil de clasificar por los modelos.

Comparando los resultados obtenidos utilizando las longitudes de onda seleccionadas con los obtenidos utilizando todo el espectro, se encontró que el rendimiento de los modelos fue similar en ambos casos, excepto en el caso de PLS-DA, donde la precisión utilizando todas las longitudes de onda fue del 93% en comparación con el 84% obtenido utilizando las seleccionadas. En el caso de ETC y SVM, la clasificación correcta solo disminuyó un 1% al utilizar 5 longitudes de onda.

Tabla 4. Matriz de confusión para los datos de test con ETC utilizando las 5 longitudes de onda más importantes

	Predicho		
	'Algerie'	**'Xirlero'**	**Precisión (%)**
'Algerie'	66	11	85,71%
'Xirlero'	16	75	82,42%

Tabla 5. Matriz de confusión para los datos de test con PLS-DA utilizando las 5 longitudes de onda más importantes

	Predicho		
	'Algerie'	**'Xirlero'**	**Precisión (%)**
'Algerie'	68	9	88,31%
'Xirlero'	19	72	79,12%

Tabla 6. Matriz de confusión para los datos de test con SVM utilizando las 5 longitudes de onda más importantes

	Predicho		
	'Algerie'	**'Xirlero'**	**Precisión (%)**
'Algerie'	66	11	85,71%
'Xirlero'	14	77	84,62%

Los resultados demuestran que es posible clasificar variedades similares de níspero, concretamente las variedades 'Xirlero' y 'Algerie' con alta precisión utilizando imágenes hiperespectrales.

4. Conclusiones

Se utilizó imagen hiperespectral en la región Vis-NIR (405-1000 nm) y tres modelos de aprendizaje automático (SNV, PLS-DA y ETC) para discriminar dos variedades de frutas de níspero similares: 'Algerie' y 'Xirlero'. Utilizando todas las longitudes de onda y PLS-DA con 20 variables, se obtuvo la mayor clasificación, discriminando correctamente el 93% de las frutas. Además, se realizó una selección de longitudes de onda más importantes, y se seleccionaron cinco, con las que se construyeron modelos que alcanzaron resultados similares, excepto para el caso de PLS-DA, donde la clasificación correcta disminuyó al 84%. Esto demuestra que las longitudes de onda seleccionadas se podrían usar para crear un sistema multispectral a medida para clasificar estas dos variedades similares de níspero.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado a través de los proyectos AEI PID2019-107347RR-C31, C32 y C33 y fondos FEDER, y GVA CIPROM/2021/014. Salvador Castillo agradece a INIA por la beca FPI-INIA PRE2020-094491, con el apoyo de fondos FSE de la Unión Europea. Los autores agradecen a la Cooperativa Agrícola Ruchey de Callosa d'En Sarrià por suministrar la fruta y por el apoyo técnico. Sandra Munera agradece el contrato postdoctoral Juan de la Cierva-Formación (FJC2021-047786-I) cofinanciado por MICIN AEI/10.13039/501100011033 y la UE NextGenerationEU/PRTR.

Referencias

15. S. Munera, J. M. Amigo, N. Aleixos, P. Talens, S. Cubero, and J. Blasco, "Potential of VIS-NIR hyperspectral imaging and chemometric methods to identify similar cultivars of nectarine," Food Control, vol. 86, pp. 1–10, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.10.037.
16. Y. Osako, H. Yamane, S.-Y. Lin, P.-A. Chen, and R. Tao, "Cultivar discrimination of litchi fruit images using deep learning," Sci Hortic, vol. 269, p. 109360, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109360.
17. Y. Wang and S. Song, "Variety identification of sweet maize seeds based on hyperspectral imaging combined with deep learning," Infrared Phys Technol, p. 104611, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104611.
18. Z. Yu, H. Fang, Q. Zhangjin, C. Mi, X. Feng, and Y. He, "Hyperspectral imaging technology combined with deep learning for hybrid okra seed identification," Biosyst Eng, vol. 212, pp. 46–61, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.010.

19. S. Munera, A. Rodríguez-Ortega, N. Aleixos, S. Cubero, J. Gómez-Sanchis, and J. Blasco, "Detection of Invisible Damages in 'Rojo Brillante' Persimmon Fruit at Different Stages Using Hyperspectral Imaging and Chemometrics," Foods, vol. 10, no. 9, 2021, doi: 10.3390/foods10092170.
20. P. Baranowski, W. Mazurek, J. Wozniak, and U. Majewska, "Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging," J Food Eng, vol. 110, no. 3, pp. 345–355, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.038.
21. W. Che et al., "Pixel based bruise region extraction of apple using Vis-NIR hyperspectral imaging," Comput Electron Agric, vol. 146, pp. 12–21, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.013.
22. B. Li, F. Zhang, Y. Liu, H. Yin, J. Zou, and A. Ou-yang, "Quantitative study on impact damage of yellow peach based on hyperspectral image information combined with spectral information," J Mol Struct, vol. 1272, p. 134176, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134176.
23. H. Yin, B. Li, Y. Liu, F. Zhang, C. Su, and A. Ou-yang, "Detection of early bruises on loquat using hyperspectral imaging technology coupled with band ratio and improved Otsu method," Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, vol. 283, p. 121775, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121775.
24. H. Büning-Pfaue, "Analysis of water in food by near infrared spectroscopy," Food Chem, vol. 82, no. 1, pp. 107–115, 2003, doi: https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00583-6.
25. A. R. Wellburn, "The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution," J Plant Physiol, vol. 144, no. 3, pp. 307–313, 1994, doi: https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2.



Tecnología de Invernadero / Tecnologia de estufas



Constituyentes fitoquímicos y actividad antimicrobiana de extractos de *Euphorbia serrata* L. para la protección de cultivos de *Borago officinalis* L.

E. Sánchez-Hernández[1], V. González-García[2], A. Palacio-Bielsa[2], J. Casanova-Gascón[3], L.M. Navas-Gracia[1], J. Martín-Gil[1], y P. Martín-Ramos[1]

[1] Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal, ETSIIAA, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia; eva.sanchez.hernandez@uva.es (E.S.-H.); luismanuel.navas@uva.es (L.M.N.-G.); mgil@iaf.uva.es (J.M.-G.); pmr@uva.es (P.M.-R.)

[2] Departamento de Sistemas Agrícolas, Forestales y Medioambientales, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, Instituto Agroalimentario de Aragón—IA2 (CITA-Universidad de Zaragoza), Avda. Montañana 930, 50059 Zaragoza; vgonzalezg@aragon.es (V.G.-G.); apalaciob@aragon.es (A.P.-B.)

[3] Instituto Agroalimentario de Aragón-IA2 (Universidad de Zaragoza-CITA), EPS, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte s/n 22071, Huesca; jcasan@unizar.es (J.C.-G.)

Abstract: The genus *Euphorbia* is widespread and possesses medicinal uses. However, there is no available phytochemical information on *Euphorbia serrata* L. This study investigates the composition of the hydromethanolic extract of its aerial parts and proposes its utilization for crop protection purposes, following integrated pest management guidelines. Gas chromatography-mass spectrometry results indicate that the primary phytocompounds include 3-methylbutyl formate, quinic acid, N1-(4-hydroxybutyl)-N3-methylguanidine acetate, and 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4H-pyran-4-one, which have antimicrobial activity. Such activity was tested against four diseases of borage (*Borago officinalis* L.), namely *Pseudomonas cichorii*, *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum*, and *Sclerotinia sclerotiorum*. *In vitro* tests revealed minimum inhibitory concentrations (MICs) of 750 and 1000 μg·mL^{-1} against the bacterium and the three fungal taxa, respectively. The antimicrobial activity was further enhanced by combining the extract with chitosan oligomers (COS), forming conjugate complexes, for which MIC values of 187.5, 750, 500, and 500 μg·mL^{-1} for *P. cichorii*, *B. cinerea*, *F. oxysporum*, and *S. sclerotiorum*, respectively, were obtained. Subsequently, these COS–*E. serrata* extract conjugate complexes were tested in *in vivo* assays against two of the pathogens, demonstrating a strong protective action on artificially inoculated plants at concentrations of 375 and 1000 μg·mL^{-1} for *P. cichorii* and *F. oxysporum*, respectively. These findings suggest that sawtooth spurge is a rich source of biorationals for crop protection applications.

Palabras clave: borraja; fitoquímicos; lechetrezna; protección de cultivos.

1. Introducción

Euphorbia serrata L. es una planta arvense anual que puede alcanzar los 0,7 m de altura. Se conoce como lechetrezna o tártago de hoja serrada por la forma dentada del borde de sus hojas. Al igual que otros miembros de la familia *Euphorbiaceae*, se considera tóxico y venenoso [1] porque exuda un látex irritante e inflamatorio cuando se rompen sus tallos u hojas. Sin embargo, según Alves *et al.* [2], su uso medicinal está documentado en el tratamiento de enfermedades de la piel, migrañas, parásitos intestinales, gonorrea, verrugas, asma, bronquitis y disentería.

Las revisiones del estado de conocimiento sobre el género *Euphorbia*, como las de Ernst *et al.* [3] y Jassbi [4], han puesto de relieve la necesidad de investigar los usos medicinales de estas plantas y su potencial como fuente de productos naturales bioactivos.

En consecuencia, el objetivo de este estudio es proporcionar información sobre los fitoquímicos de *E. serrata* y explorar posibles usos. En particular, teniendo en cuenta que los fitoquímicos presentes en otros miembros de la familia *Euphorbiaceae* han demostrado una fuerte actividad contra ciertos fitopatógenos [5], se ha investigado su aplicación para el control de cuatro patógenos de la borraja (*Borago officinalis* L.).

La importancia de este cultivo está aumentando en Aragón gracias a su promoción como parte de la cocina de vanguardia en restaurantes de alto nivel, tanto en España como en otros países. Sin embargo, su producción en el Valle del Ebro se ve amenazada por enfermedades como la marchitez y la podredumbre radicular causadas por *Fusarium oxysporum* Schltdl., un fitopatógeno que ha llegado a destruir el 70% de la cosecha en 2019 [6] y para el que aún no se dispone de métodos de control efectivos. Otros dos hongos patógenos polífagos, *Botrytis cinerea* Pers. (moho gris) y *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary (podredumbre blanda algodonosa) también afectan a este cultivo [7]. En cuanto a los patógenos bacterianos, *Pseudomonas cichorii* (Swingle) Stapp también supone una seria amenaza para la borraja, especialmente en condiciones de alta humedad como las del cultivo en invernadero [8].

El uso de biorracionales a partir de extractos de *E. serrata* para hacer frente a estas enfermedades puede ofrecer a los cultivadores de borraja una solución basada en productos naturales, que cumpla con los requisitos del artículo 14 de la Directiva Europea 2009/128/CE, susceptible también de aplicación a otros cultivos hortícolas que sufren el ataque de estos fitopatógenos.

2. Materiales y métodos

2.1. Muestras de plantas y reactivos

Las partes aéreas de plantas de *E. serrata* se recolectaron en mayo de 2022 en la Vía Verde del Canfranero, cerca de la ciudad de Huesca (42°08'38.7" N 0°26'54.0" O), durante la fase de plena floración. Se mezclaron muestras de 20 ejemplares para obtener muestras representativas. Las muestras compuestas se secaron a la sombra, se redujeron a polvo con una trituradora mecánica, se homogeneizaron y se tamizaron (malla de 1 mm).

Las plantas de borraja cv. "Movera" utilizadas en los experimentos *in vivo* fueron suministradas por Viveros Laraflor (Zaragoza).

El agar de triptona de soja (TSA) y el caldo de triptona de soja (TSB) se adquirieron de Sigma-Aldrich Química (Madrid), mientras que el caldo de dextrosa de patata (PDB) y el agar de dextrosa de patata (PDA) fueron suministrados por Becton Dickinson (Bergen County, NJ, EE.UU.). El quitosano de alto peso molecular se compró de Hangzhou Simit Chem. y Tech. Co. (Hangzhou, China). La enzima Neutrase™ 0,8 L se obtuvo de Novozymes A/S (Bagsværd, Dinamarca).

2.2. Fitopatógenos

Las cuatro cepas de *P. cichorii* (CITA Pci-2, CITA Pci-3, CITA Pci-4 y CITA Pci-5), obtenidas de plantas de borraja enfermas de la provincia de Zaragoza, fueron suministradas por el Laboratorio de Bacteriología del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA, Zaragoza) como subcultivos en TSA. El aislado fúngico de *B. cinerea* (CECT 20973) se obtuvo de la Colección Española de Cultivos Tipo (CECT, Valencia). Los aislados fúngicos de *F. oxysporum* (MYC−1593) (aislado de plantas de borraja enfermas) y *S. sclerotiorum* (MYC-799) fueron facilitados por el Laboratorio de Micología del CITA como subcultivos en PDA.

2.3. Preparación del extracto de E. serrata, de los oligómeros de quitosano y de su complejo conjugado

Una muestra de la parte aérea seca (11,4 g) se mezcló con 90 mL de una solución de metanol/agua (5 mL de metanol y 85 mL de agua) y se calentó en un baño de agua a 50 °C durante

30 min, seguido de sonicación usando un ultrasonicador tipo sonda modelo UIP1000 hdT de Hielscher Ultrasonics (Teltow, Alemania). A continuación, la solución se centrifugó a 9000 rpm durante 15 minutos y el sobrenadante se filtró a través de papel Whatman nº 1, seguido de liofilización para obtener el residuo sólido. El rendimiento de la extracción fue del 52,6% (6 g). Para el análisis por cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS), se disolvieron 25 mg del extracto liofilizado en 5 mL de metanol de grado HPLC para obtener una solución de 5 $mg \cdot mL^{-1}$, que se filtró de nuevo.

Los oligómeros de quitosano (COS) se prepararon siguiendo el método descrito en [9], obteniéndose oligómeros con un peso molecular < 2.000 Da en una solución con un pH de 4,5. Se mezclaron soluciones de COS y extracto de *E. serrata* (150 mL de cada solución, ambas a una concentración de 3000 $\mu g \cdot mL^{-1}$) en una proporción 1:1 (*v*/*v*) y se ultrasonicaron durante 15 minutos para formar los complejos conjugados.

2.4. Caracterización del extracto

Para elucidar los constituyentes del extracto hidrometanólico de partes aéreas de *E. serrata* se utilizó un cromatógrafo de gases modelo 7890A acoplado a un espectrómetro de masas cuadrupolar modelo 5975C (ambos de Agilent Technologies, Santa Clara, CA, EE.UU.). Esta caracterización fue realizada en los Servicios de Apoyo a la Investigación (STI) de la Universidad de Alicante. Las condiciones cromatográficas fueron las siguientes: volumen de inyección = 1 µL; temperatura del inyector = 280 °C, en modo *splitless*; temperatura inicial del horno = 60 °C, mantenida durante 2 min, seguida de una rampa de 10 $°C \cdot min^{-1}$ hasta una temperatura final de 300 °C, mantenida durante 15 min. Para la separación de los compuestos se empleó una columna cromatográfica HP-5MS UI (30 m de longitud, 0,250 mm de diámetro, película de 0,25 µm), también de Agilent Technologies. Las condiciones del espectrómetro de masas fueron: temperatura de la fuente de impacto de electrones del espectrómetro de masas = 230 °C, temperatura del cuadrupolo = 150 °C, y energía de ionización = 70 eV. La identificación de los componentes se basó en la comparación de sus espectros de masas y tiempos de retención con los de los compuestos auténticos y en el cotejo informático con la base de datos del National Institute of Standards and Technology (NIST11).

2.5. Evaluación de la actividad antimicrobiana in vitro

La actividad antibacteriana se evaluó según la norma M07−11 del Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI), utilizando el método de dilución en agar para determinar la concentración mínima inhibitoria (CMI). Inicialmente, las colonias de *P. cichorii* se incubaron a 28 °C durante 24 h en TSB. Posteriormente, se realizaron diluciones seriadas, partiendo de una concentración de 10^8 $UFC \cdot mL^{-1}$, hasta alcanzar un inóculo final de 10^4 $UFC \cdot mL^{-1}$. La suspensión bacteriana se extendió sobre la superficie de placas de TSA a las que se había añadido previamente el extracto, a concentraciones de entre 62,5 y 1.500 $\mu g \cdot mL^{-1}$. A continuación, las placas se incubaron a 28 °C durante 24 h. La CMI se determinó como la concentración más baja del extracto en la que no se observó crecimiento bacteriano. Todos los experimentos se repitieron tres veces, con tres placas por tratamiento y concentración.

La actividad antifúngica se determinó mediante el método de dilución en agar, de acuerdo con los procedimientos estándar de las pruebas de susceptibilidad antifúngica EUCAST. Se incorporaron alícuotas de solución madre al medio PDA para obtener concentraciones finales de entre 62,5 y 1500 $\mu g \cdot mL^{-1}$. Se transfirieron tapones de micelio (⌀ = 5 mm), procedentes del margen de cultivos de 1 semana de edad de *B. cinerea*, *S. sclerotiorum* y *F. oxysporum*, al centro de placas de PDA con las concentraciones mencionadas de extracto (tres placas por tratamiento y concentración, con dos duplicados). Las placas se incubaron a 25 °C en la oscuridad durante una semana. El control consistió en sustituir el extracto por el disolvente utilizado para la extracción

(es decir, metanol:agua, 5:85 *v/v*) en el medio PDA. La inhibición del crecimiento micelial se estimó según la fórmula $((d_c - d_t) / d_c) \times 100$, donde d_c y d_t representan los diámetros medios de las colonias fúngicas de control y tratadas, respectivamente. Las concentraciones eficaces (CE_{50} y CE_{90}) se determinaron mediante análisis PROBIT en SPSS Statistics v.25 (IBM, Nueva York, NY, EE.UU.). El factor de sinergia (FS), que mide el grado de interacción, se estimó mediante el método de Wadley.

2.6. Ensayos in vivo

En los experimentos *in vivo* se utilizaron plantas de borraja cv. "Movera" para evaluar la eficacia del tratamiento más potente según los resultados de los ensayos *in vitro* (COS-*E. serrata*) contra *P. cichorii* y *F. oxysporum*. Los patógenos fueron inoculados artificialmente siguiendo los métodos descritos en [10] y [6], respectivamente. Se utilizaron múltiples macetas de 4 × 4 cm para cultivar las plantas de borraja empleando turba estéril como sustrato, con 5 plantas por tratamiento y patógeno; se realizaron dos repeticiones independientes. El tratamiento se aplicó a dos concentraciones (CMI y CMI×2, es decir, 187,5 y 375 $\mu g \cdot mL^{-1}$ para *P. cichorii*, y 500 y 1000 $\mu g \cdot mL^{-1}$ para *F. oxysporum*). En el caso de *P. cichorii*, se aplicó mediante pulverización (3 mL por planta). Transcurridas 2 h, se inoculó una colonia aislada de *P. cichorii* en los foliolos más jóvenes, realizando 3-4 punciones con un alfiler entomológico estéril. Para el ensayo con *F. oxysporum*, el hongo se cultivó previamente en PDB en matraces de 250 mL durante 3 días a 25 °C en la oscuridad con agitación constante. A continuación, las raíces de borraja se sumergieron en una suspensión de 6×10^6 conidios$\cdot mL^{-1}$ durante 2 min, y las plantas se transfirieron a las macetas de plástico con el sustrato esterilizado. Las plantas no inoculadas, rociadas con agua esterilizada o sumergidas en agua esterilizada, se utilizaron como controles negativos. Todas las plantas se incubaron en una cámara de crecimiento (25 °C, fotoperiodo de 16/8 h) durante 10 días.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del extracto por GC-MS

Entre los cincuenta y tres fitocompuestos identificados en el extracto de partes aéreas de *E. serrata*, los más abundantes fueron: 3-metilbutil-formiato (15,5%); ácido quínico (14,4%), acetato de N1-(4-hidroxibutil)-N3-metilguanidina (5,3%), y 2,3-dihidro-3,5-dihidroxi-6-metil-4H-piran-4-ona (o DDMP) (4%).

Análogos del 3-metilbutil-formiato han demostrado ser útiles para el manejo de enfermedades postcosecha. Por lo tanto, es previsible que los ésteres 3-metilbutilados de *E. serrata* puedan inducir la acumulación intracelular de ROS e inhibir el crecimiento del micelio y la esporulación conidial, como se ha demostrado para otros ésteres 3-metilbutilados contra *Penicillium expansum* Link, *Curvularia lunata* (Wakker) Boedijn, *B. cinerea*, y *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl. [11]. En cuanto al ácido quínico, se ha sugerido su empleo como agente antibacteriano en la conservación de alimentos [12]. Su efecto antibacteriano se atribuye a la modulación de las funciones de los ribosomas y de la síntesis de aminoacil-ARNt, la modificación de los niveles de glicerofosfolípidos y ácidos grasos, y la interrupción de la vía de fosforilación oxidativa, causando interferencias en la fluidez de la membrana [13]. El DDMP o 2,3-dihidro-3,5-dihidroxi-6-metil-4H-piran-4-ona ha demostrado actividad antibacteriana contra *Erwinia amylovora* (Burrill) Winslow et al.) y *Xylophilus ampelinus* (Panagopoulos) Willems et al. [14], y actividad antifúngica contra *Verticillium dahliae* Kleb., *Diaporthe amygdali* (Delacr.) Udayanga, Crous y K.D. Hyde, y *Phytophthora megasperma* Drechsler [15].

3.3. Actividad antimicrobiana in vitro

En cuanto a la actividad antibacteriana del extracto, se observaron algunas diferencias en cuanto a la sensibilidad al COS entre las cuatro cepas de *P. cichorii*, con valores de CMI que oscilaron entre 500 y 750 μg·mL^{-1}. Sin embargo, los valores de CMI obtenidos para el extracto de *E. serrata* (comparables/ligeramente superiores a los de COS) y el complejo conjugado COS–*E. serrata* (notablemente inferiores a los de COS y *E. serrata*, con valores de FS de entre 1,97 y 2,47) fueron los mismos para las cuatro cepas: 750 y 187,5 μg·mL^{-1}, respectivamente.

La Figura 1 resume los resultados de las pruebas de capacidad antifúngica. Los oligómeros de quitosano inhibieron el crecimiento micelial de *B. cinerea* y *S. sclerotiorum* a 1500 μg·mL^{-1}, y el de *F. oxysporum* a 1000 μg·mL^{-1}. El extracto de *E. serrata* fue más eficaz, logrando la completa inhibición de los tres patógenos a 1000 μg·mL^{-1}. Sin embargo, la actividad antifúngica mejoró sustancialmente al ensayar el complejo conjugado COS–*E. serrata*, para el cual la inhibición completa se produjo a dosis de entre 500 y 750 μg·mL^{-1}. Esta mejora de la actividad se cuantificó utilizando los valores de concentración efectiva (CE) de los productos bioactivos por separado y los de los complejos conjugados, obteniéndose los FS que se resumen en la Tabla 1. Dado que se obtuvieron valores próximos a 2 frente a los tres fitopatógenos, puede inferirse una clara acción sinérgica entre COS y el extracto también en términos de actividad antifúngica.

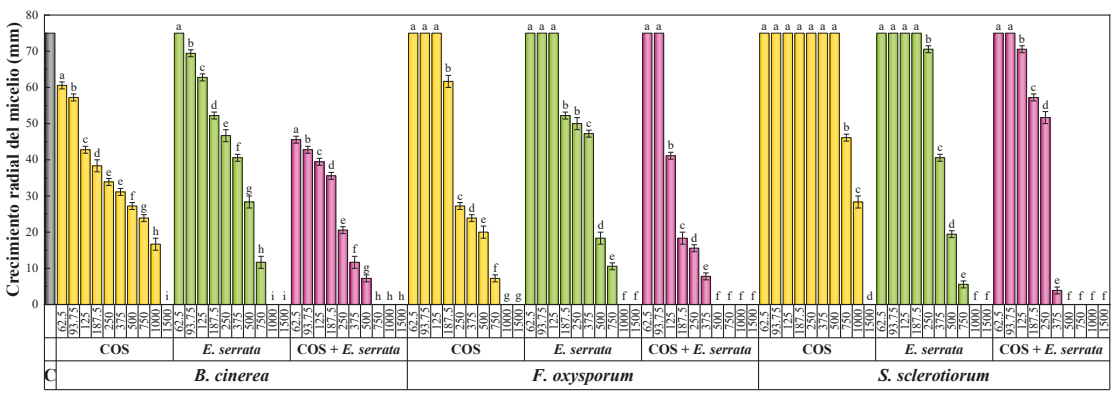


Figura 1. Inhibición del crecimiento radial del micelio de *B. cinerea*, *F. oxysporum* y *S. sclerotiorum* en los ensayos *in vitro* realizados con oligómeros de quitosano (COS), extracto de parte aérea de *E. serrata* y su complejo conjugado (COS–*E. serrata*). La barra gris (C) representa los controles.

Tabla 1. Concentraciones efectivas (CE, expresadas en μg·mL^{-1}) de los oligómeros de quitosano (COS), el extracto de parte aérea de *E. serrata* y su complejo conjugado (COS-*E. serrata*) frente *B. cinerea*, *F. oxysporum*, y *S. sclerotiorum*. Los factores de sinergia (FS) para el conjugado COS-*E. serrata* se estimaron según el método de Wadley.

Patógeno	Tratamiento							
	COS		*E. serrata*		COS–*E. serrata*			
	CE_{50}	CE_{90}	CE_{50}	CE_{90}	CE_{50}	FS	CE_{90}	FS
B. cinerea	236,2	1426,3	402,2	832,4	140,0	2,13	500,6	2,10
F. oxysporum	233,2	743,4	402,1	796,2	142,4	2,07	378,4	2,03
S. sclerotiorum	864,3	1344,8	408,7	673,4	282,0	1,97	363,7	2,47

Estudios previos sobre la actividad antimicrobiana de *E. serrata* se han limitado a patógenos humanos, por lo que no es posible establecer comparaciones directas en términos de actividad. En cuanto a la actividad antimicrobiana de otros extractos de otras especies de *Euphorbia* contra patógenos vegetales, la actividad antibacteriana del extracto no conjugado de *E. serrata* sería comparable a la de *Euphorbia cotinifolia* L. [16]. En cuanto a su actividad antifúngica, sería sustancialmente superior a la de *Euphorbia hirta* L. y *Euphorbia tirucalli* L. frente a *F. oxysporum* [17-19]; superior a la de *Euphorbia guyoniana* Boiss. & Reut. y *Euphorbia royleana* Boiss. frente a otras

especies de *Fusarium* [20,21]; y comparable a la de *Euphorbia macroclada* Boiss. (para la cual se reportó una inhibición completa de *F. oxysporum* a 1000 μg·mL^{-1} para extractos en cloroformo, éter de petróleo y butanol) [22]. Por otra parte, las CMIs obtenidas para el complejo conjugado son mejores que las de fungicidas convencionales como el Fosetyl-Al (≥2000 μg·mL^{-1}) y el Azoxystrobin (>62500 μg·mL^{-1}).

3.4. Actividad antimicrobiana in vivo

3.4.1. Actividad antibacteriana *in vivo* frente a *P. cichorii*

Habida cuenta de que el complejo conjugado COS–*E. serrata* fue el más activo en los ensayos *in vitro*, se ensayó también *in vivo* como tratamiento preventivo contra el tizón bacteriano en plantas de borraja cv. "Movera" inoculadas artificialmente. Diez días tras la inoculación, las plantas de control positivo mostraron lesiones necróticas que cubrían toda la hoja (Figura 2b). Las plantas rociadas con el complejo conjugado COS–*E. serrata* a una concentración igual a la CMI (187,5 μg·mL^{-1}) presentaron lesiones necróticas en la zona donde se inoculó el patógeno, que no se extendieron a toda la hoja, aunque se observó cierta decoloración (Figura 2c). Las plantas tratadas con una dosis el doble de la CMI (375 μg·mL^{-1}) apenas mostraron signos de ataque de la enfermedad (Figura 2d), demostrando la efectividad del tratamiento.

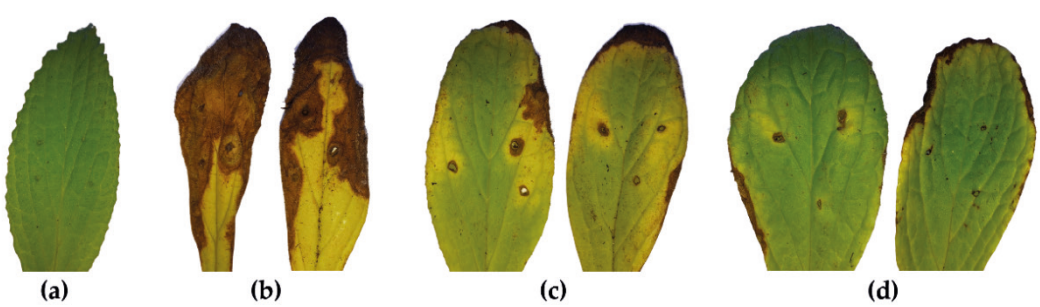


Figura 2. Síntomas del tizón bacteriano en plantas de borraja 10 días después de la inoculación en (**a**) plantas de control negativo; (**b**) plantas de control positivo; (**c**) plantas tratadas con el complejo conjugado COS–*E. serrata* a 187,5 μg·mL^{-1}; y (**d**) plantas tratadas con el complejo conjugado COS–*E. serrata* a 375 μg·mL^{-1}.

3.4.2. Actividad antifúngica *in vivo* contra *F. oxysporum*

La Figura 3 muestra los resultados de los ensayos *in vivo* realizados con el complejo conjugado COS–*E. serrata* en plantas de borraja cv. "Movera" para evaluar la actividad protectora (fungistática) contra la marchitez por *Fusarium*. Todas las plantas del control positivo mostraron los síntomas característicos de marchitez severa y amarillamiento, acompañados de necrosis de las venas centrales de algunas hojas, seguida de la muerte de la planta (Figura 3b). La incidencia de la enfermedad entre las plantas tratadas con el extracto a una concentración igual a la CMI (500 μg·mL^{-1}) fue alta (80%), pero la gravedad de la enfermedad fue menor (Figura 3c). Para lograr una protección completa, fue necesario aumentar la dosis a 1000 μg·mL^{-1} (Figura 3d). Cabe señalar que a la concentración más alta probada (1000 μg·mL^{-1}), las plantas de borraja no mostraron síntomas de fitotoxicidad, sin diferencias visuales respecto al control negativo (Figura 3a).



Figura 3. Síntomas de marchitez, pudrición del tallo y de la raíz producidos por *F. oxysporum* en plantas de borraja 10 días después de la inoculación en (**a**) plantas de control negativo; (**b**) plantas de control positivo; (**c**) plantas tratadas con el complejo conjugado COS–*E. serrata* a 500 μg·mL^{-1}; y (**d**) plantas tratadas con el complejo conjugado COS–*E. serrata* a 1000 μg·mL^{-1}.

4. Conclusiones

La caracterización por GC–MS del extracto hidrometanólico de *E. serrata* mostró que los principales constituyentes son el 3-metilbutil-formiato (15,5%), el ácido quínico (11,8%), el acetato de N1-(4-hidroxibutil)-N3-metilguanidina (5,3%) y la 2,3-dihidro-3,5-dihidroxi-6-metil-4H-piran-4-ona (o DDMP) (4%). Con vistas a su valorización para la protección de cultivos de borraja, se ensayó *in vitro* la actividad antimicrobiana del extracto frente a cuatro cepas de *P. cichorii*, y tres aislados de *B. cinerea*, *F. oxysporum* y *S. sclerotiorum*. Se obtuvieron CMIs de 750 y 1000 μg·mL^{-1} contra las bacterias y los tres hongos, respectivamente. Al conjugar el extracto con COS, la actividad antimicrobiana mejoró, obteniéndose CMIs de 187,5, 750, 500 y 500 μg·mL^{-1} para *P. cichorii*, *B. cinerea*, *F. oxysporum* y *S. sclerotiorum*, respectivamente. El tratamiento más efectivo (es decir, el complejo conjugado de extracto de COS–*E. serrata*) se probó además en ensayos *in vivo* contra los dos patógenos que actualmente tienen un mayor impacto en las principales zonas de cultivo de borraja en Aragón, confirmando una fuerte acción protectora frente a *P. cichorii* y *F. oxysporum* a dosis de 375 y 1000 μg·mL^{-1}, respectivamente. Por tanto, el extracto de *E. serrata* puede considerarse un bioracional para la gestión integrada de plagas de la borraja y otros cultivos hortícolas.

5. Agradecimientos

A P. Blasco y P. Candela, de los Servicio Técnicos de Investigación de la Universidad de Alicante, por la realización de los análisis de GC–MS. Esta investigación ha sido financiada por la Unión Europea a través del Programa Horizonte Europa (HORIZON-CL6-2022-FARM2FORK-01), con el proyecto '*Agro-ecological strategies for resilient farming in West Africa* (CIRAWA)', ID 101084398.

Referencias

1. Lewis, R.J. *Euphorbia serrata* latex. In *Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials*, 11th ed.; John Wiley & Sons, Inc: Hoboken, NJ, USA, 2004; 10.1002/0471701343.sdp12200p. 1737.
2. Alves, A.L.V.; da Silva, L.S.; Faleiros, C.A.; Silva, V.A.O.; Reis, R.M. The role of ingenane diterpenes in cancer therapy: From bioactive secondary compounds to small molecules. *Natural Product Communications* **2022**, *17*, 1-30, doi:10.1177/1934578x221105691.

3. Ernst, M.; Grace, O.M.; Saslis-Lagoudakis, C.H.; Nilsson, N.; Simonsen, H.T.; Rønsted, N. Global medicinal uses of *Euphorbia* L. (Euphorbiaceae). *J. Ethnopharmacol.* **2015**, *176*, 90-101, doi:10.1016/j.jep.2015.10.025.
4. Jassbi, A.R. Chemistry and biological activity of secondary metabolites in *Euphorbia* from Iran. *Phytochemistry* **2006**, *67*, 1977-1984, doi:10.1016/j.phytochem.2006.06.030.
5. Zahid, K. Evaluation of antifungal activity of nine members of family Euphorbiaceae of Lahore Region against *Aspergillus niger, Rhizopus oryzae* & *Alternaria solani*. *American Journal of Biomedical Science & Research* **2019**, *6*, 216-220, doi:10.34297/ajbsr.2019.06.001032.
6. González, V.; Aguado, A.M.; Garcés-Claver, A. First report of *Fusarium oxysporum* causing wilt and root rot in common borage (*Borago officinalis*) in Spain. *Plant Disease* **2019**, *103*, 1774-1774, doi:10.1094/pdis-02-19-0259-pdn.
7. Garibaldi, A.; Pensa, P.; Bertetti, D.; Gullino, M.L. First report of white mold caused by *Sclerotinia sclerotiorum* on *Borago officinalis* in Italy. *Plant Dis.* **2008**, *92*, 1711-1711, doi:10.1094/PDIS-92-12-1711A.
8. Cambra, M.A.; Palacio-Bielsa, A.; López, M.M. Borage (*Borago officinalis*) is a new host of *Pseudomonas cichorii* in the Ebro Valley of Spain. *Plant Dis.* **2004**, *88*, 769-769, doi:10.1094/pdis.2004.88.7.769a.
9. Ruano-Rosa, D.; Sánchez-Hernández, E.; Baquero-Foz, R.; Martín-Ramos, P.; Martín-Gil, J.; Torres-Sánchez, S.; Casanova-Gascón, J. Chitosan-based bioactive formulations for the control of powdery mildew in viticulture. *Agronomy* **2022**, *12*, 495, doi:10.3390/agronomy12020495.
10. Sánchez-Hernández, E.; González-García, V.; Palacio-Bielsa, A.; Lorenzo-Vidal, B.; Buzón-Durán, L.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Antibacterial Activity of *Ginkgo biloba* Extracts against *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*, *Pseudomonas* spp., and *Xanthomonas vesicatoria*. *Horticulturae* **2023**, *9*, 461-474.
11. Arrarte, E.; Garmendia, G.; Rossini, C.; Wisniewski, M.; Vero, S. Volatile organic compounds produced by Antarctic strains of *Candida sake* play a role in the control of postharvest pathogens of apples. *Biological Control* **2017**, *109*, 14-20, doi:10.1016/j.biocontrol.2017.03.002.
12. Bai, J.; Wu, Y.; Zhong, K.; Xiao, K.; Liu, L.; Huang, Y.; Wang, Z.; Gao, H. A comparative study on the effects of quinic acid and shikimic acid on cellular functions of *Staphylococcus aureus*. *J. Food Prot.* **2018**, *81*, 1187-1192, doi:10.4315/0362-028x.Jfp-18-014.
13. Benali, T.; Bakrim, S.; Ghchime, R.; Benkhaira, N.; El Omari, N.; Balahbib, A.; Taha, D.; Zengin, G.; Hasan, M.M.; Bibi, S.; Bouyahya, A. Pharmacological insights into the multifaceted biological properties of quinic acid. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews* **2022**, 10.1080/02648725.2022.2122303, 1-30, doi:10.1080/02648725.2022.2122303.
14. Sánchez-Hernández, E.; Buzón-Durán, L.; Cuchí-Oterino, J.A.; Martín-Gil, J.; Lorenzo-Vidal, B.; Martín-Ramos, P. Dwarf pomegranate (*Punica granatum* L. var. *nana*): Source of 5-HMF and bioactive compounds with applications in the protection of woody crops. *Plants* **2022**, *11*, 550-564, doi:10.3390/plants11040550.
15. Sánchez-Hernández, E.; Balduque-Gil, J.; González-García, V.; Barriuso-Vargas, J.J.; Casanova-Gascón, J.; Martín-Gil, J.; Martín-Ramos, P. Phytochemical Profiling of *Sambucus nigra* L. Flower and Leaf Extracts and Their Antimicrobial Potential against Almond Tree Pathogens. *International Journal of Molecular Sciences* **2023**, *24*, 1154-1171, doi:10.3390/ijms24021154.

16. Jayalakshmi, B.; Raveesha, K.; Amruthesh, K. Phytochemical analysis and antibacterial activity of *Euphorbia cotinifolia* Linn. leaf extracts against phytopathogenic bacteria. *Journal of Pharmacy Research* **2011**, *4*, 3759-3762.
17. Mekam, P.N.; Martini, S.; Nguefack, J.; Tagliazucchi, D.; Stefani, E. Phenolic compounds profile of water and ethanol extracts of *Euphorbia hirta* L. leaves showing antioxidant and antifungal properties. *South African Journal of Botany* **2019**, *127*, 319-332, doi:10.1016/j.sajb.2019.11.001.
18. Shirazi, M.; Abid, M.; Hussain, F.; Abbas, A.; Sitara, U. Antifungal activity of some medicinal plant extracts against soil-borne phytopathogens. *Pakistan J Bot* **2020**, *52*, 679-685.
19. Upadhyay, R.R.; Ansarin, M.; Zarintan, M.H.; Shakui, P. Tumor promoting constituent of *Euphorbia serrata* L. latex. *Experientia* **1976**, *32*, 1196-1197, doi:10.1007/bf01927623.
20. Ashraf, A.; Sarfraz, R.A.; Rashid, M.A.; Shahid, M. Antioxidant, antimicrobial, antitumor, and cytotoxic activities of an important medicinal plant (*Euphorbia royleana*) from Pakistan. *Journal of Food and Drug Analysis* **2015**, *23*, 109-115, doi:10.1016/j.jfda.2014.05.007.
21. Salhi, N.; Mohammed Saghir, S.A.; Terzi, V.; Brahmi, I.; Ghedairi, N.; Bissati, S. Antifungal activity of aqueous extracts of some dominant Algerian medicinal plants. *BioMed research international* **2017**, *2017*.
22. Al-Mughrabi, K. Antimicrobial Activity of Extracts from Leaves, Stems and Flowers of" Euphorbia macroclada" against plant pathogenic fungi. *Antimicrobial Activity of Extracts from Leaves, Stems and Flowers of" Euphorbia macroclada" against plant pathogenic fungi* 2003, 1000-1006.



Análisis de sistema de enfriamiento evaporativo en invernadero con sistema de distribución de aire

J.M. Cámara-Zapata[1], J. Muñoz-Acero[1], S. Pardo[1], F.J. Ferrández[2]

[1] Instituto Universitario de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental, de la Universidad Miguel Hernández de Elche (CIAGRO-UMH); jm.camara@umh.es
[2] Grupo de Investigación de Informática Industrial y Redes de Computadores (I2RC). Universidad de Alicante

Abstract: The impact of the increase in temperature on plant production has turned protected crops and greenhouse refrigeration techniques into adaptation strategies to climate change. To improve the efficiency of these production systems, semi-closed greenhouses are used that reduce mass and energy transfers from the greenhouse. In this type of structure, evaporative cooling facilities are often used to reduce the temperature inside the greenhouse. The operation of these facilities depends to a large extent, both on the temperature and on the relative humidity of the outside air. An innovative design includes an evaporative pad and a perforated inflatable duct distribution system. Both evaporative cooling and air distribution to the greenhouse are regulated by fans installed at the beginning of the distribution ducts. To advance in the improvement of the control of this type of facilities, in this work its behavior has been modeled. The results show how the outside climate conditions the values of temperature and relative humidity inside the greenhouse.

Palabras clave: Eficiencia en el uso del agua y la energía, ahorro energético, adaptación al cambio climático

1. Introducción

La sostenibilidad de la producción agrícola y la resiliencia de las empresas agroalimentarias se encuentran amenazadas por las condiciones climáticas extremas, la reducción de la cantidad y la calidad de los recursos disponibles y el encarecimiento de las materias primas [1]. Los invernaderos se utilizan para mitigar las duras condiciones climáticas y permitir la producción fuera de temporada. En condiciones climáticas extremas, con elevada temperatura y baja humedad relativa, es imprescindible desacoplar el clima en el interior del invernadero del clima en el exterior mediante la reducción de la ventilación y el empleo de técnicas de enfriamiento evaporativo [2]. Para mejorar la sostenibilidad de la producción agrícola son necesarios el ahorro energético y la reducción de emisiones. Los invernaderos semicerrados permiten reducir las pérdidas energéticas debido a una disminución de la ventilación con el exterior [3].

Las instalaciones de enfriamiento evaporativo son las más eficientes en climas cálidos y áridos [4]. Entre ellas se incluyen los sistemas panel evaporativo y nebulización. El sistema fan-pad permite una mayor reducción de la temperatura, debido a una mejor eficiencia de saturación del aire, aunque con menor homogeneidad en la distribución de temperaturas [5]. Su potencial refrigerante está limitado por la humedad ambiental del aire exterior. Cuanto mayor es la humedad ambiental del aire exterior, menor es su potencial evaporativo [4]. [6] evaluaron una instalación de enfriamiento evaporativo equipada con una pre-cámara lateral y un sistema de distribución de aire mediante conductos inflables perforados en un invernadero situado en Almería. Entre las líneas de cultivo dobles se instaló un conducto para la distribución del aire refrigerado. El experimento se realizó durante el mes de agosto en Almería. Los resultados mostraron una reducción homogénea de la temperatura en el invernadero y un considerable efecto del clima exterior sobre la eficiencia del sistema. Con el objetivo de mejorar las prestaciones del sistema de enfriamiento evaporativo con pre-cámara y distribución de aire por conductos inflables perforados, en este trabajo se realiza el modelado de la instalación. Se emplean condiciones climáticas extremas, típicas del verano en áreas cálidas y con diferentes valores de la humedad ambiental.

2. Materiales y métodos

Se considera la instalación empleada en [6]. Se trata de un invernadero de pimiento de 360 m2 formado por dos módulos de 8.0 x 22.5 m2, con cubierta gótica, una altura a la canal de 4.0 m y hasta cumbrera de 5.5 m. El cultivo se realiza sobre arena con seis filas pareadas de 17 m de longitud. La separación entre filas es de 1.60 m y dentro de la misma fila, de 0.75 m. El invernadero está situado en Almería (36º 54’ 19’’ N 2º 21’ 29’’ W).

El sistema de enfriamiento se dimensiona a partir del clima de la zona, las características del invernadero y el cultivo y tomando en consideración las recomendaciones encontradas en el estado del arte [7]. El valor de la presión atmosférica se supone conocido y constante. El análisis del proceso de enfriamiento permite obtener el valor de la temperatura y la humedad relativa del aire después de atravesar el panel (T,p y ω,p). Además, se determina el punto óptimo de funcionamiento de la instalación, definido por los valores del caudal y la presión necesaria para hacer circular el aire a través del panel y del sistema de distribución. Es necesario elegir un ventilador comercial con condiciones nominales (caudal y pérdida de carga correspondientes al máximo valor de su rendimiento) lo más similares posible al punto óptimo de funcionamiento de la instalación. Finalmente, se determina el caudal y la presión de operación del ventilador.

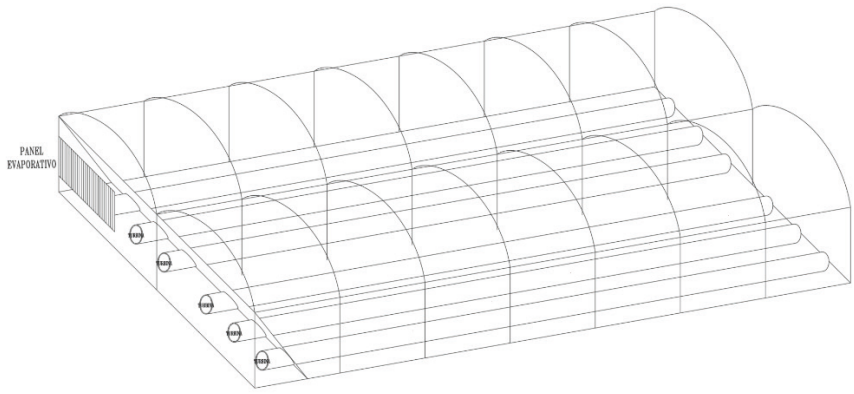


Figura 1. Esquema del sistema de enfriamiento evaporativo y de distribución de aire

2.1. Dimensionado del sistema

El aire se considera incompresible, por lo que el estado final del aire, después del enfriamiento evaporativo, únicamente es función del espesor del panel y de su velocidad de circulación. Además, se supone que la transferencia de calor experimentada por el aire durante su enfriamiento evaporativo es debida únicamente al cambio de fase.

2.1.1. Punto óptimo de funcionamiento de la instalación

Los valores del área del panel (S,p) y de la velocidad del aire a su paso por él (ve), esto es, el caudal de aire tratado, F, se adoptan de acuerdo con las recomendaciones de la literatura científica especializada (Ghoulem et al., 2019). A partir de las expresiones del calor sensible (Qse) y el latente (Qla) transferidos entre el aire y el panel, y puesto que se conoce el estado del aire en el exterior, se pueden determinar la temperatura y la humedad específica del aire a la salida del panel (T,p y ω,p, respectivamente).

$$T,p=T,e-(T,e-T,w)\cdot(1-\exp[-\beta\cdot\delta/(ve^{1-n})]) \quad (1)$$

$$\omega,p=\omega,s-(T,o-T,w)\cdot(cp,a/\lambda,v)\cdot\exp[-\beta\cdot\delta/(ve^{1-n})] \quad (2)$$

El valor del F se emplea para realizar una estimación inicial de la presión que debe mantener el ventilador. Para ello, es preciso establecer un valor inicial de su diámetro, D, que además, coincide con el de los conductos inflables perforados. La distribución del aire hacia el invernadero tiene lugar mediante un número "j" de perforaciones situadas en "N" líneas a lo largo de la manguera, equidistantes entre sí una longitud "L" (m) sobre la longitud total del conducto, "M" (m). Si se denomina genéricamente "i" e "i+1" a dos líneas contiguas, siendo i<N, el valor de la presión total necesaria para mantener el flujo de aire en el conducto, resulta:

$$p=(1/2)\varrho\cdot(v/N)^2\cdot(f\cdot(L/D)+C)\cdot\Sigma_{i,0}^{i,N-1}(N-i)^2 \quad (3)$$

La presión necesaria para el funcionamiento de la instalación es igual a la suma de las pérdidas de carga en el panel y el conducto. La pérdida de carga en el panel se puede expresar en función de la ve mediante una relación polinómica de segundo grado obtenida a partir del manual del fabricante (CELdek 7060-15, Munters, Stockholm, Sweden) (Suoying et al., 2013):

$$\Delta p=-0.9813+1.0957\cdot ve+3.7024\cdot ve^2;\ R^2=0.9992 \quad (4)$$

2.1.2. Sistema de distribución

Se determina el F que el ventilador puede proporcionar garantizando la presión necesaria en la instalación y se calcula la ve teniendo en cuenta la diferencia entre el estado del aire en el sistema y el empleado por el fabricante para caracterizar el ventilador. Con este valor, se corrigen los de la eficiencia evaporativa y el estado del aire en la salida del panel. A continuación, se determina el estado del aire a la salida de los conductos, teniendo en cuenta el flujo de energía transferido al aire desde su salida del panel (energía consumida por el ventilador y transferencias de energía por radiación y conducción-convección sobre el conducto).

3. Resultados y discusión

3.1. Sistema de enfriamiento y distribución del aire

Para cumplir las especificaciones técnicas de esta instalación, se supone una velocidad del aire a su paso por el pad de 0.5 m s^{-1}, resultando un caudal unitario de 6,350 m^3 h^{-1} y una pérdida de carga estática de 180 Pa. Para satisfacer las necesidades de la instalación, se selecciona un ventilador con el punto óptimo de funcionamiento apropiado, siendo los valores de las propiedades los que se indican en la Tabla 1.

La elección del ventilador ha de garantizar el funcionamiento de la instalación en las condiciones más desfavorables. Para regular el caudal en la instalación la opción más indicada es que su valor varíe entre el 85 y el 105 % del caudal nominal del ventilador. De este modo, el rendimiento es similar a su valor máximo, cumpliéndose la normativa específica, que recomienda que el rendimiento del ventilador sea máximo. Para optimizar el funcionamiento de la instalación, no solo se debe atender a que el rendimiento del ventilador sea máximo. Además, es preciso reducir el consumo energético para lo cual se recomienda limitar el valor de la pérdida de carga en el circuito. Así, por ejemplo, la normativa específica limita la pérdida de carga debido a los elementos de difusión de aire a un valor comprendido entre 40 y 200 Pa. Es necesario garantizar un valor considerable de la pérdida de carga para asegurar una distribución homogénea del aire enfriado y, en definitiva, de la temperatura en el interior del invernadero. El empleo de conductos de sección creciente a medida que se aleja del ventilador puede contribuir a reducir las pérdidas de energía y mejorar la eficiencia del sistema.

Tabla 1. Características técnicas del sistema de enfriamiento (área y espesor del pad, caudal unitario y total, potencia unitaria y total, rendimiento y velocidad angular del ventilador, velocidad del aire en el pad y de descarga al conducto).

Características y punto óptimo de funcionamiento de la instalación	Valores
Área del fan-panel (m2), S	21,0
Espesor del fan-panel (m), δ	0,1
Caudal de aire unitario y total (m3 h-1), F	6.580/39.480
Potencia de impulsión unitaria y total (W), W	740/4.440
Rendimiento de los ventiladores (%), μ	45,1
Velocidad angular (rpm), Ω	1.450

Velocidad del aire en el panel (m s^{-1}), ve, (T,e=35 ºC; HR,e=45 %)	0,54
Velocidad del aire en la salida del ventilador hacia el conducto (m s^{-1})	5,90

3.2. Análisis del enfriamiento evaporativo

La Figura 2 muestra la representación de los procesos de enfriamiento evaporativo en función del estado del aire exterior. El ángulo entre los ejes de T y ω es 90º. Las líneas curvilíneas inclinadas tienen el mismo valor de la HR y las rectilíneas inclinadas tienen el mismo valor de la h.

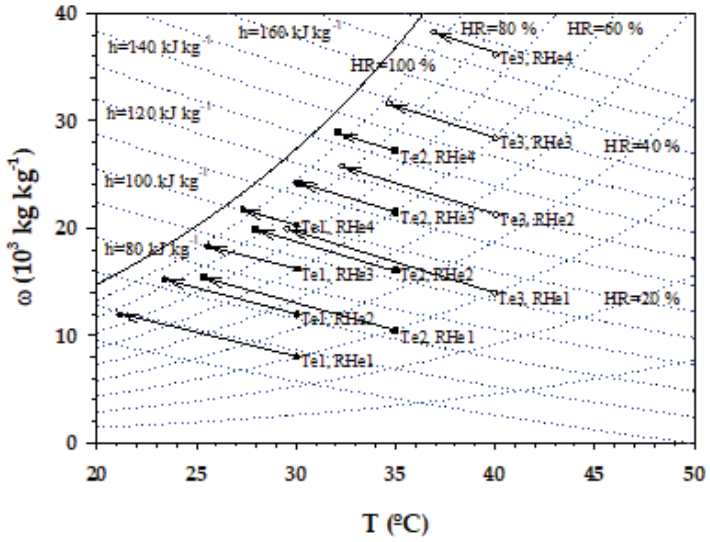


Figura 2. Diagrama sicrométrico. Los segmentos orientados indican el enfriamiento evaporativo en el panel para aire exterior a diferente temperatura (T,e1=30 ºC, círculos negros; T,e2=35 ºC, cuadrados negros; T,e3=40 ºC, círculos blancos) y humedad relativa (HR,e1=30, HR,e2=45, HR,e3=60 y HR,e4=75 %).

Cuando la temperatura inicial del aire es moderada (por ejemplo, T,e=30 ºC), los procesos son prácticamente isoentálpicos (h=cte). Sin embargo, al aumentar la T,e y la HR,e hacia valores extremos (entre 35 y 40 ºC, o bien de 60 a 75 %), la entalpía, h, tiende a incrementarse a lo largo del proceso. Tiene lugar una reducción de la capacidad de enfriamiento por unidad de masa de agua evaporada de un 20 %, aproximadamente, al aumentar la T,e, si se mantiene constante la HR,e, o al aumenta la HR,e si se mantiene constante la T,e. Se trata de un efecto aditivo, de modo que si aumenta la T,e y la HR,e, la reducción de la capacidad de enfriamiento se reduce un 35 %, con los valores empleados en este trabajo. A pesar de las diferencias entre los procesos representados, en todos los casos, la eficiencia evaporativa del panel, η, apenas varía entre 75 y 76 %.

3.3. Temperatura del aire a la salida del panel

La Figura 3 representa el valor de la temperatura del aire a la salida del panel (T,p, ºC) en función del estado inicial del aire a tratar, dado por T,e y HR,e. El resultado es un aumento lineal de los valores de la T,p, a medida que aumentan la T,e y la HR,e.

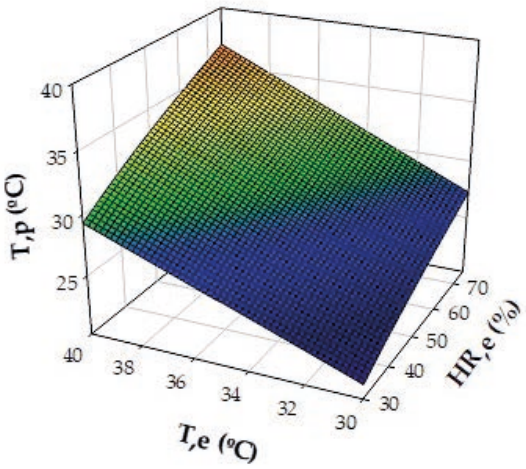


Figura 3. Evolución de los valores de la temperatura del aire a su salida del panel en función de su estado inicial.

Los valores de la Tp estimados en este trabajo se correlacionan linealmente con los determinados experimentalmente por [6]. La Figura 4 muestra la correlación existente entre los valores de la T,p medidos y calculados. Los valores de los índices estadísticos empleados para evaluar el ajuste se indican en la Tabla 2.

En las condiciones del ensayo, el valor de la temperatura del aire a la salida del panel, T,p, varía entre 21.2 y 36.9 ºC, cuando T,e=30 ºC y HR,e=75 %, y para Te=40 ºC y HR,e=30 %, respectivamente. El valor de la T,p aumenta con la T,e y con la HR,e. Los valores de la T,p se aproximan a los de T,e a medida que la HR,e se incrementa (la relación es 0.81 a 30 % y 0.96 a 75 %). Por su parte, el aumento de la T,p, cuando la HR,e varía y la T,e es constante, es menor y apenas se incrementa con el valor de la T,e (Figura 3).

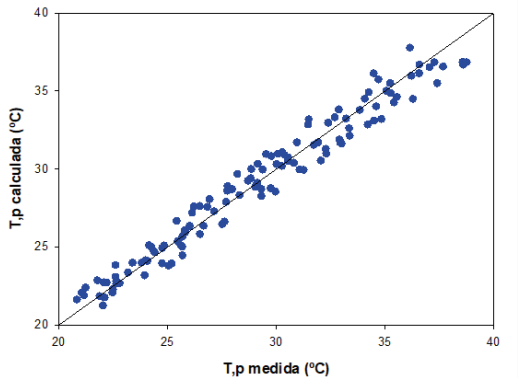


Figura 4. Regresión de la T,p calculada a partir de balances de masa y energía frente al valor medido experimentalmente.

Los valores de la T,p determinados en este trabajo son similares a los encontrados en [6] a partir de los valores de la ω,p obtenidos experimentalmente y suponiendo un enfriamiento evaporativo sin transferencias de calor sensible (Figura 4).

Tabla 2. Índices estadísticos para evaluar la bondad del ajuste del modelo de cálculo de la T,p.

Índices estadísticos	Variable (T,p)
MAE (ºC)	0.7
ME (ºC)	1.6

RMSE (ºC)	0.8
CRM (-)	0
EF (-)	1
IA (-)	1

La comparación entre los valores de la T,p obtenidos en ambos casos no difieren más de un 10 % (Figura 4). Las mayores diferencias se encuentran en los valores de la T,p correspondientes a valores elevados de la T,e, esto es, cuando la radiación solar es más elevada e interfiere en mayor medida sobre los resultados experimentales. Los indicadores estadísticos empleados muestran una elevada correlación entre los valores de la T,p obtenidos por ambos métodos.

4. Conclusiones

El estado inicial del aire exterior influye sobre el funcionamiento de una instalación de enfriamiento evaporativo para refrigeración de invernaderos. Aunque la eficiencia evaporativa apenas varía, la temperatura del aire tratado en el panel y la temperatura en el invernadero varían considerablemente en función del estado inicial del aire. La temperatura del aire tratado en el panel y la del aire en el interior del invernadero aumentan con la temperatura y la humedad inicial del aire. Es necesario continuar analizando este tipo de sistemas de refrigeración de invernaderos que contribuyen a adaptar los cultivos a los efectos del cambio climático.

5. Agradecimientos

Este estudio forma parte del programa AGROALNEXT (AGROALNEXT/2022/048) y ha sido apoyado por MCIN con financiación de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y de la Generalitat Valenciana. También ha sido realizado gracias al proyecto AGCOOP_A/2022/004 financiado por la Agencia Valenciana de fomento y garantía agraria, con fondos de la Unión Europea, el Ministerio de agricultura, pesca y alimentación y la Generalitat Valenciana.

Referencias

26. Tawalbeh, M., Aljaghoub, H., Alami, A.H., Olabi, A.G., Selection criteria of cooling technologies for sustainable greenhouses: A comprehensive review. Thermal Science and Engineering Progress. 2023, 38, 101666
27. Hegazy, A., Farid, M., Subiantoro, A., Norris, S. Sustainable cooling strategies to minimize water consumption in a greenhouse in a hot arid region. Agricultural Water Management. 2022, 274 107960.
28. Quillec, S.L.; Albert, B.; Lesourd, D.; Loda, D.; Barette, R.; Brajeul, E. Benefits of a semi-closed greenhouse for tomato production in the West of France. Acta Hortic. 2017, 1170, 883–888.
29. Kumar, K.S., Tiwari, K.N., Jha, M.K. Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: a review. Energy Build. 2009, 41, 1269–1275.
30. Misra, D., Ghosh, S. Evaporative cooling technologies for greenhouses: a comprehensive review. Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 2018, 20(1): 1–15.
31. Cámara-Zapata, J.M., Sánchez-Molina, J.A., Wang, H., Carreño-Ortega, A., Rodríguez, F. Evaluation of an Adapted Greenhouse Cooling System with Pre-Chamber and Inflatable Air Ducts for Semi-Arid Regions in Warm Conditions. Agronomy. 2020, 10, 752.
32. Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., Calautit, J.K. Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. Biosyst. Eng. 2019, 183, 121-150.

Ajuste y validación de un modelo dinámico de balance de energía para estimar la temperatura en un invernadero colombiano de cubierta plástica.

Edwin. Villagran[1], Gloria. Ortiz Rocha[2], Adrian. Chamorro[3], Jhon.Acuña[4], Irineo.Lopez[5], Maria. Pichimata[1].

[1] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. Sede central. Km. 14 vía Mosquera - Bogotá, Mosquera - Cundinamarca, Colombia: evillagran@agrosavia.co, mapichimata@agrosavia.co.
[2] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitata. Km. 14 vía Mosquera - Bogotá, Mosquera - Cundinamarca, Colombia: glaortizro@unal.edu.co.
[3] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitata. Km. 14 vía Mosquera - Bogotá, Mosquera - Cundinamarca, Colombia: achamorro@agrosavia.co.
[4] Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá – Colombia: jfacunac@unal.edu.co.

Abstract: Modelling and simulation techniques are increasingly used as a tool to develop micro-climatic analysis of different greenhouse structures under different climatic conditions. Models are implemented to perform optimal control of the climate management inside the structures or to characterize and optimize the behavior of a greenhouse under any climatic condition. In Colombia there are few studies where energy balance models adapted and validated for the greenhouse typology and the local climate have been developed. Therefore, there are currently no such tools available for decision making, either for technical assistants or for the growers themselves. Accordingly, the main objective of this work was to adjust and validate a dynamic energy balance model to determine by prediction the thermal behavior of a new Colombian plastic cover greenhouse. The selected model describes the main heat and mass transfer processes by means of a series of mathematical models. The model also includes parameters dependent on the architecture of each structure, which facilitates its adaptation to Colombian conditions. The results of the model validation after the calibration process allowed obtaining a temperature prediction efficiency close to 92 %, which guarantees that the model is an adequate predictor of the thermal behavior of the greenhouse evaluated, and the model is also capable of predicting characteristic phenomena of Colombian greenhouses such as thermal inversion.

Palabras clave: modelado y simulación, microclima, eficiencia de predicción.

1. Introducción

El uso de invernaderos o estructuras de agricultura protegida de diferente nivel tecnológico en la producción de plantas ornamentales, hortícolas, aromáticas y medicinales se ha extendido ampliamente a nivel mundial desde los años 80 [1,2]. Es importante mencionar que tanto el rendimiento y la calidad final de estos cultivos está muy influenciada por el comportamiento de las condiciones ambientales que se generan en el interior del invernadero, dentro de estas condiciones una de las más relevantes es la temperatura la cual influye en los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas, pero también es la principal fuente de consumo de energía [3].

Uno de los primeros modelos matemáticos usados para determinar el comportamiento energético de un entorno de invernadero fue documentado por Businger [4], posteriormente hasta la década del 2000 el modelado micro climático de estructuras de agricultura protegida se convirtió en un área del conocimiento con bastante interés investigativo y didáctico para comprender el funcionamiento físico de estos ambientes de producción agrícola [5]. Así mismo ya se iba implementando esta técnica de análisis como una herramienta básica para la toma de decisiones de control, gestión microclimatica del invernadero y para el diseño de algunos prototipos o equipos de acondicionamiento climático [6]. En la actualidad la agricultura protegida o bajo invernadero es una de las herramientas de producción agrícola, más usadas para intensificar de forma sostenible la producción de alimentos y a su vez como mecanismo de producción para promover mejores niveles de seguridad alimentaria en diversas regiones del mundo [7]. Sin embargo, esta industria o alternativa de producción también tiene retos importantes orientados a la optimización y uso eficientes de recursos naturales y energéticos usados en los invernaderos u otro tipo de estructura, buscando la sostenibilidad de estos sistemas productivos [8].

A nivel mundial existen diversos estudios donde se implementan modelos para predecir las condiciones de microclima de invernadero, incluso algunos de ellos sirven como metodología de diseño para diferentes tipologías de invernadero y diferentes condiciones climáticas, aplicados adicionalmente al cultivo de tomate, como el propuesto por Vanthoor et al. [9] , modelo que fue validado exitosamente en varios invernaderos de Italia y España. Así mismo este tipo de modelos de balance para predecir la temperatura han sido usados para generar un control optimo sobre el consumo energético de un invernadero tratando de optimizar las prácticas de enfriamiento y calefacción conjuntamente con el manejo de la ventilación [10]. En términos energéticos mediante modelado y pruebas experiméntales se logró demostrar que el intercambio entre el suelo del invernadero y el ambiente exterior afecta fuertemente el comportamiento de la temperatura, así mismo se encontró que capas por debajo de los 50 cm del suelo son la mejor zona para instalar elemento de almacenamiento térmico destinados a la climatización del invernadero [11]. A nivel regional está el estudio desarrollado por Salazar-Moreno et al. [12], quienes ajustaron un modelo dinámico de balance de energía para predecir la temperatura en un invernadero mexicano, obteniendo una eficiencia de predicción del modelo superior al 89%. De acuerdo con lo anterior el objetivo de este trabajo consistió en ajustar y validar un modelo de balance de energía, para determinar el comportamiento dinámico de la temperatura en el interior de un nuevo modelo de invernadero de cubierta plástica, diseñado para las condiciones climáticas del trópico alto colombiano.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripcion del inverandero.

El invernadero analizado está ubicado en el municipio de Mosquera Cundinamarca, en el centro de investigación Tibaitata de la Corporación Colombiana de Investigacion Agropecuaria – Agrosavia, en la sabana de Bogota, con las siguientes coordenadas GPS: 4°41′43.89″ N 74°12′12.87″ W y 2546 msnm. El invernadero tiene un área cubierta de 20 m², proyectados en una longitud lateral y frontal de 4 y 5 m respectivamente, la altura sobre canal es de 2.7 m y la altura sobre la cumbrera de la ventilación de techo es de 5.8 m (Figura 50).

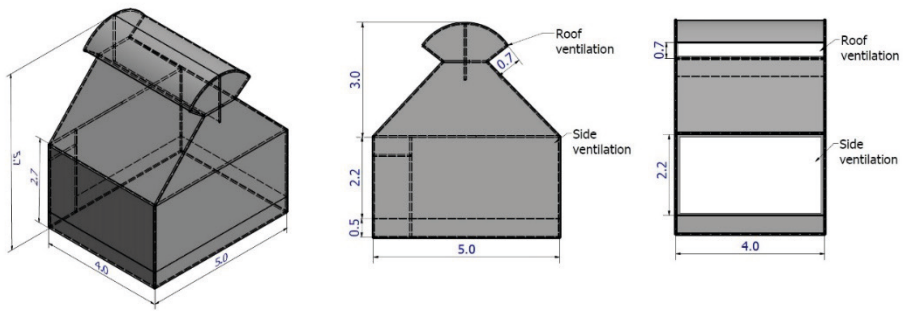


Figura 50. Esquema geométrico del invernadero analizado.

El invernadero está equipado con una cubierta plástica de polietileno Agroclear calibre 8, tanto en la region del techo, como en las áreas laterales y frontales, el sistema de ventilación natural está compuesto por dos áreas laterales con cierre a traves de malacate mecánico de operación manual (3.6 m de largo y 2 m de ancho) y por una doble ventilación de techo (4 m de largo y 0.705 de ancho). Para la validación del modelo dinámico no se contempló ningún tipo de acondicionamiento climático a través de calefacción o enfriamiento, así como ningún tipo de cultivo.

2.2. Modelo dinamico de balance de energia.

El modelo dinámico usado en esta investigación sin presencia de cultivo, se estructuro sobre el modelo de balance de energía por diversos investigadores en diferentes regiones del mundo. Este modelo se describe mediante la siguiente ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{\frac{V}{A_s} c_p \rho} (Q_s - Q_c - Q_v - Q_{sl} + Q_{co})$$

Donde T_a, es la temperatura del aire interno en °C, dt es la unidad de cambio del tiempo en (s), V es el volumen del invernadero en m3, A_s área de superficie cubierta por el invernadero m², c_p es el calor especifico del aire J kg^{-1} °C^{-1}, ρ densidad del aire kg m^{-3}, Q_s ganancia de calor debida a la radiación solar, Q_c perdida de calor a traves de la cubierta, Q_v perdida de calor debida a la ventilación, Q_{sl} perdida de calor a traves del suelo y Q_{co} es la ganancia de calor debido a la condensación debido todos estos flujos de ganancia o pérdida de calor están expresado Wm^{-2}.

2.3. Recopilación de datos climáticos y micro climáticos.

Para la medida y registro de los datos climáticos exteriores se usó una estación meteorológica automática con transmisión remota WSC11-Thies. La descripción técnica de cada uno de los sensores de medición se resume en la Tabla 24.

Tabla 24. Descripción técnica de los sensores de medición climática exterior.

Variable	Datos técnicos de sensor.
Velocidad del viento.	Tipo: Anemómetro térmico, rango de medición: 0 a 40 ms-1, resolución: 0.1 ms-1, precisión: 0.1 ms-1.
Direccion del viento.	Tipo: Anemómetro térmico, rango de medición: 1 a 360°, resolución: 1°, precisión: ± 10°.
Radiación solar.	Tipo: Sensor de silicio, rango de medición: 1 a 1300 Wm-2, resolución: 1 Wm-2, precisión: ± 10%.
Temperatura.	Tipo: PT1000, rango de medición: -30 a +60 °C, resolución: 0.1 °C, precisión: ± 1 °C.
Humedad relativa.	Tipo: CMOS capacitivo, rango de medición: 0 a 100%, resolución: 0.1 %, precisión: ± 10 %.

En el interior del invernadero para el registro de datos de temperatura del aire ambiente se usó un sensor y una estación registradora de datos Aranet. Mientras que para la medición y registro de datos de temperatura se usaron dos sensores y los datos se registraron en una aplicación creada mediante la plataforma de creación de prototipos electrónicos de código abierto- Arduino, las especificaciones técnicas de estos sensores se incluyen en la Tabla 25.

Tabla 25. Descripción técnica de los sensores de medición microclimatica.

Variable	Datos técnicos de sensor.
Estación registradora de datos.	Aranet PRO licence versions select, Aranet PRO 50.

Temperatura del aire.	Tipo: Grado de protección IP67 inalámbrico y alimentado por pilas, Aranet IP 67, rango de medición: -40 a +60 °C y 0 a 100%, resolución: 0.1 °C y 0.1 %, precisión: ± 0.3 °C y ± 2 %.
Temperatura de la cubierta.	Tipo: sensor de temperatura por IR, MLX90614ESF, rango de medición: -40 a 125 °C, resolución: 0.02 °C, precisión: ± 0.5 °C.
Temperatura del suelo.	Tipo: termocupla tipo K MAX6675, rango de medición: 0 a 800 °C, resolución: 0.25 °C, precisión: ± 1 °C.

Los datos en el exterior e interior del invernadero experimental fueron recopilados entre el periodo comprendido del 27 de marzo al 01 de abril de 2023, le frecuencia de registro de datos fue cada minuto, con lo cual se obtuvieron un total de 8637 datos para cada variable, este set de datos se usará para la calibración, validación y prueba numérica del modelo de balance de energía planteado.

3. Resultados y discusión

3.1. Calibracion y validacion del modelo.

Como resultado del proceso de calibración, se lograron mejorar los parámetros de bondad de ajuste, en el caso de MAE y MSE se obtuvieron valores de 1.13 y 1.83 °C, respectivamente, se debe recordar que estos valores entre más cerca del 0 absoluto se encuentren el modelo ofrece una mayor capacidad de predicción, esto valores además están dentro de los rangos reportados para un trabajo similar en un invernadero de cubierta plástica desarrollado por Ghosal & Mishra. [13]. En el caso de MAPE se obtuvo un valor de 9.1%, que ya es un valor que está por debajo del límite máximo de 10% recomendado para este parámetro este parámetro de ajuste en el caso de modelos de predicción microclimatica de invernaderos [14,15] Por último, en el caso de la eficiencia de predicción del modelo se logró mejorar en un 13%, obteniendo un valor final de 0.92 que es un valor cercano a 1, lo que garantizara que los datos simulados son muy similares a los datos reales, por lo tanto, el modelo es un buen predictor de proceso simulado.

Tabla 26. Parámetros de bondad de ajuste obtenidos para el modelo matemático.

Medida de ajuste	Antes de la calibración	Después de la calibración
MAE	1.55	1.13
MSE	3.05	1.83
MAPE	17.2	9.1
EF	0.79	0.92

3.2. Simulación del comportamiento de la temperatura.

En la Figura 51, se muestra la variación temporal de la temperatura en el interior del invernadero para los seis días de medición experimental. En general se puede observar que el modelo de balance de energía planteado tiene una alta capacidad para predecir el comportamiento y la tendencia de la temperatura en el interior del invernadero, el modelo predice de forma aceptable los picos de alta temperatura que ocurre durante las horas de alta radiación y el enfriamiento que ocurre durante las horas de la noche. Así mismo es importante

mencionar que el modelo de balance de energía planteado responde de manera adecuada al cambio de variables climáticas externas, las cuales son considerada como variables rápidas que en climas tropicales cambian de valor en escala temporales pequeñas incluso de segundo o minutos, lo que a su vez genera cambio en el microclima del invernadero [16]. Es importante que el modelo sobreestima el valor de la temperatura en las horas nocturnas, lo cual puede mejorarse con estudios futuros donde se logre modelar y cuantificar de una manera más adecuada la perdida de radiación infrarroja lejana que ocurre durante la noche en este tipo de invernaderos de cubierta platica y que es la causante de la reducción drástica de la temperatura en el interior del invernadero [17]. Así mismo esto puede ser complementado con modelos donde se incluya un análisis multicapa del comportamiento térmico del suelo [6].

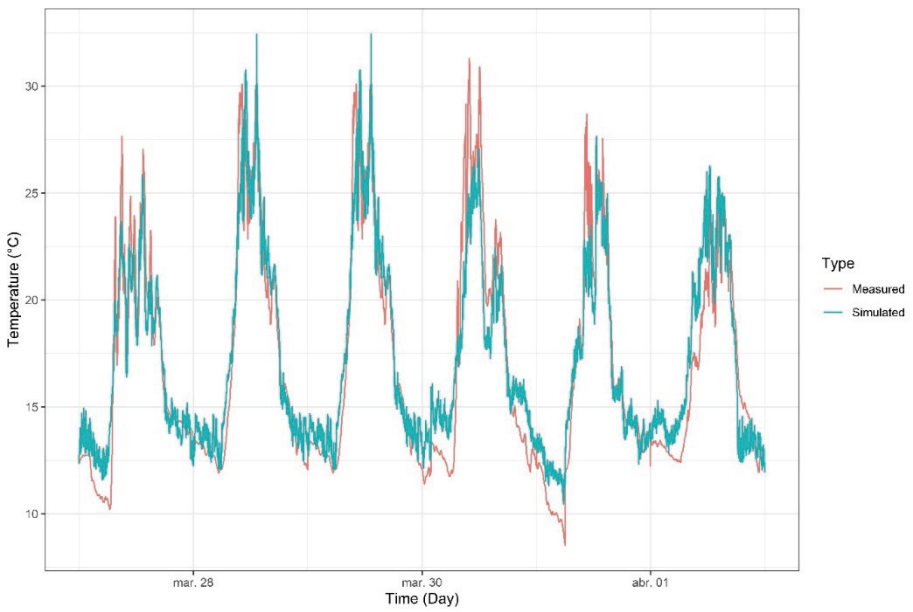


Figura 51. Comportamiento temporal para la temperatura simulada y medida en el interior del invernadero.

En cuanto al comportamiento de la temperatura en las condiciones diurnas (6:00 a 18:00 horas) se encontró que la temperatura media para los seis días fue de 20.7 ± 3.4 °C y este valor oscilo entre 19.1 ± 3.5 °C y 22.2 ± 4.1 °C (Tabla 27). De otro lado la temperatura máxima presento un valor medio de 28.7 °C con valores que oscilaron entre 25.9 y 32.4 °C, mientras que la temperatura mínima media presento un valor de 13.2 °C y sus valores oscilaron entre 11.4 y 14 °C, respectivamente. En el caso del periodo nocturno (18:00 a 6:00 horas) la temperatura media fue de 13.7 ± 0.9 °C, con valores que oscilaron entre 12.9 y 14.3 °C, así mismo, la temperatura máxima media fue de 16.8 °C con valores que oscilaron entre 14.9 y 18.5 °C, respectivamente. Po ultimo la temperatura mínima presento un valor medio fue de 11.3 °C, con valores que oscilaron entre 10.3°C y 12.2 °C. Estos valores predichos mediante el modelo matemático, tanto para el periodo nocturno y diurno, están dentro de los rangos reportados en diversos trabajos experimentales realizados en invernaderos de cubierta plástica establecidos en la sabana de Bogota [18,19,20].

Tabla 27. Valores de temperatura simulados obtenidos al interior del invernadero durante los periodos diurnos y nocturnos.

Fecha	Periodo	Temperatura simulada (°C)

Dia/mes/año	Hora	T_{media}	T_{maxima}	T_{minima}
27/03/2023	Desde 00:00 hasta 06:00	12.9 ± 0.6	14.9	11.6
27/03/2023	Desde 6:00 hasta 18:00	19.6 ± 2.6	25.9	12.4
27/03/2023	Desde 18:00 hasta 06:00	13.7 ± 0.7	15.9	12.1
28/03/2023	Desde 6:00 hasta 18:00	22.1 ± 4.1	32.2	13.9
28/03/2023	Desde 18:00 hasta 06:00	13.9 ± 1.0	18.5	12.1
29/03/2023	Desde 6:00 hasta 18:00	22.2 ± 4.2	32.4	13.9
29/03/2023	Desde 18:00 hasta 06:00	14.3 ± 0.9	18.4	12.1
30/03/2023	Desde 6:00 hasta 18:00	20.3 ± 3.1	27.1	13.8
30/03/2023	Desde 18:00 hasta 06:00	13.6 ± 1.7	16.5	10.4
31/03/2023	Desde 6:00 hasta 18:00	19.1 ± 3.5	27.6	11.1
31/03/2023	Desde 18:00 hasta 06:00	13.9 ± 0.6	16.7	12.3
1/04/2023	Desde 6:00 hasta 18:00	20.6 ± 3.1	26.2	14.0
1/04/2023	Desde 18:00 hasta 00:00	13.3 ± 0.8	16.7	10.3

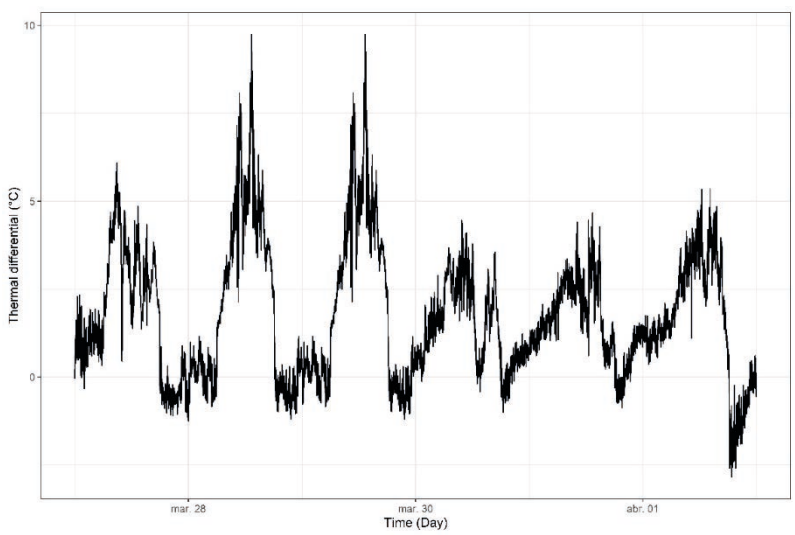


Figura 52. Diferencial térmico entre el ambiente interior y exterior del invernadero obtenido mediante simulación.

En cuanto al diferencial térmico que representa la diferencia que existe entre la temperatura del ambiente interior menos la temperatura del ambiente exterior, este comportamiento se puede observar en la Figura 52. En general se observa que el valor de este parámetro muestra la ganancia térmica efecto de la radiación solar incidente al interior del invernadero durante las horas diurnas (6:00 a 18:00 horas), con un valor medio de 3.2 ± 1.4 °C y un valor máximo y mínimo de 9.8 y 1.2 °C, respectivamente. Mientras que en las horas de la noche (18:00 a 6:00 horas) el valor medio del diferencial fue 0.3 ± 0.6 °C, con valores máximo y mínimo de 2.9 y -2.8

°C, respectivamente. Es importante resaltar que durante el periodo nocturno es común ver que durante los seis noches hay horas, donde se presenta el fenómeno de inversión térmica, lo que se traduce que el aire interno del invernadero esta más frio que el aire del ambiente exterior, este es un fenómeno característico de los invernaderos colombianos de cubierta plástica y que se presenta debido a la poca capacidad del plástico para retener la radiación térmica generada desde el suelo del invernadero [21,22,23]. Por lo tanto, estos resultados siguen demostrado la alta capacidad de predicción del modelo matemático para simular el comportamiento térmico de un invernadero colombiano. Por último, es importante mencionar que el modelo implementado en esta investigación es un modelo simple que entrega resultados precisos, lo cual puede también ayudar a que los agricultores comprendan de manera más optima los procesos que intervienen en el comportamiento térmico de un invernadero de cubierta plástica [24].

4. Conclusiones

En este trabajo se ajustó y valido un modelo dinámico simple de balance de energía que permite, entender los procesos físicos que intervienen en el calentamiento y enfriamiento de un invernadero de cubierta plástica construido en un clima tropical de alta montaña.

El modelo incluye parámetros dependientes de la arquitectura y geometría propia del invernadero, lo cual permite su adaptación a cualquier tipología de invernadero. En general se encontró que la temperatura del suelo y de la cubierta, así como la tasa de ventilación influyen fuertemente en la predicción de la temperatura del interior del invernadero. Por lo tanto, algunos parámetros relacionados con estos procesos fueron modificados en un proceso de calibración que permitió mejorar la eficiencia de predicción del modelo hasta el 92 % con un error porcentual absoluto medio (MAPE) inferior al 10%.

El modelo implementado fue capaz de predecir los procesos de inversión térmica característicos de los invernaderos colombianos y predijo los valores de temperatura entre rangos 10.3 y 32.4 °C, valores que ya se han comprobado es estudios experimentales previos desarrollado en diferentes tipos de invernadero, bajo la condición climática analizada.

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser la base para trabajos futuros donde se requiera cuantificar y optimizar el consumo energético de este invernadero con fines aplicables a actividades de climatización como lo son calefacción y enfriamiento.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA por el apoyo técnico en la realización de esta investigación. Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia - MINCIENCIAS a través del proyecto denominado “Fortalecimiento de las capacidades de I + D + i del centro de investigación Tibaitata para la generación, apropiación y divulgación de nuevo conocimiento como estrategia de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola ubicados en las zonas agroclimáticas del trópico alto colombiano”.

6. Referencias

[1] M. Akrami *et al.*, “Towards a Sustainable Greenhouse: Review of Trends and Emerging Practices in Analysing Greenhouse Ventilation Requirements to Sustain Maximum Agricultural Yield,” *Sustainability*, 2020, doi: 10.3390/su12072794.

[2] G. A. O. Rocha, M. A. Pichimata, and E. Villagran, “Research on the Microclimate of Protected Agriculture Structures Using Numerical Simulation Tools: A Technical and Bibliometric Analysis as a Contribution to the Sustainability of Under-Cover Cropping in Tropical and Subtropical Countries,” *Sustain. 2021, Vol. 13, Page 10433*, vol. 13, no. 18, p. 10433, Sep. 2021, doi: 10.3390/SU131810433.

[3] W. Cai, R. Wei, L. Xu, and X. Ding, "A method for modelling greenhouse temperature using gradient boost decision tree," *Inf. Process. Agric.*, vol. 9, no. 3, pp. 343–354, 2022.

[4] J. A. Businger, "The glasshouse (greenhouse) climate," *Phys. Plant Environ. WR Van Wijk, Ed.(North Holl. Publ. Co., Amsterdam, 1963)*, 1963.

[5] C. Gary, J. W. Jones, and M. Tchamitchian, "Crop modelling in horticulture: state of the art," *Sci. Hortic. (Amsterdam).*, vol. 74, no. 1–2, pp. 3–20, 1998.

[6] D. Katzin, E. J. van Henten, and S. van Mourik, "Process-based greenhouse climate models: Genealogy, current status, and future directions," *Agric. Syst.*, vol. 198, p. 103388, 2022.

[7] D. A. Salinas-Velandia, F. Romero-Perdomo, S. Numa-Vergel, E. Villagrán, P. Donado-Godoy, and J. R. Galindo-Pacheco, "Insights into Circular Horticulture: Knowledge Diffusion, Resource Circulation, One Health Approach, and Greenhouse Technologies," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 19. 2022, doi: 10.3390/ijerph191912053.

[8] L. F. M. Marcelis, J. M. Costa, and E. Heuvelink, "Achieving sustainable greenhouse production: Present status, recent advances and future developments," *Achiev. Sustain. Greenh. Cultiv.*, pp. 1–14, 2019.

[9] B. H. E. Vanthoor, C. Stanghellini, E. J. van Henten, and P. H. B. de Visser, "A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates," *Biosyst. Eng.*, vol. 110, no. 4, pp. 363–377, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001.

[10] P. J. M. Van Beveren, J. Bontsema, G. Van Straten, and E. J. Van Henten, "Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 97–109, 2015.

[11] K. A. Joudi and A. A. Farhan, "A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse," *Energy Convers. Manag.*, vol. 91, pp. 76–82, 2015.

[12] R. Salazar-Moreno, I. L. López-Cruz, and A. C. S. Cruz, "Dynamic energy balance model in a greenhouse with tomato cultivation: Simulation, calibration and evaluation," *Rev. Chapingo, Ser. Hortic.*, 2018, doi: 10.5154/r.rchsh.2018.07.014.

[13] M. K. Ghosal and J. N. Mishra, "Formulation and validation of a mathematical model for a naturally ventilated greenhouse with shading nets in warm and humid climate of India," *Int. J. Ambient Energy*, 2014, doi: 10.1080/01430750.2013.770798.

[14] F. J. Baptista, B. J. Bailey, and J. F. Meneses, "Comparison of humidity conditions in unheated tomato greenhouses with different natural ventilation management and implications for climate and Botrytis cinerea control," in *Acta Horticulturae*, 2008, vol. 801 PART 2, pp. 1013–1019.

[15] E. Villagran, "Two-dimensional numerical study of the microclimate generated in three screenhouses for the climatic conditions of the colombian caribbean," *Int. J. Heat Technol.*, 2021, doi: 10.18280/ijht.390215.

[16] P. J. M. Van Beveren, J. Bontsema, G. Van Straten, and E. J. Van Henten, "Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds," *Appl. Energy*, vol. 159, pp. 509–519, 2015.

[17] L. Evangelisti, C. Guattari, and F. Asdrubali, "On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review," *Energy Build.*, vol. 183, pp. 607–625, 2019.

[18] C. R. Bojacá, R. Gil, and A. Cooman, "Use of geostatistical and crop growth modelling to assess the variability of greenhouse tomato yield caused by spatial temperature variations," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 65, no. 2, pp. 219–227, 2009, doi: 10.1016/j.compag.2008.10.001.

[19] X. Reynafarje, E. A. Villagrán, C. R. Bojacá, R. Gil, and E. Schrevens, "Simulation and validation of the airflow inside a naturally ventilated greenhouse designed for tropical conditions," *Acta Hortic.*, no. 1271, pp. 55–62, Feb. 2020, doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1271.8.

[20] E. A. Villagrán-Munar and C. R. Bojacá-Aldana, "CFD simulation of the increase of the roof ventilation area in a traditional Colombian greenhouse: Effect on air flow patterns and thermal behavior," *Int. J. Heat Technol.*, vol.

37, no. 3, pp. 881–892, 2019, doi: 10.18280/ijht.370326.

[21] D. Piscia, J. I. Montero, B. Bailey, P. Muñoz, and A. Oliva, "A new optimisation methodology used to study the effect of cover properties on night-time greenhouse climate," *Biosyst. Eng.*, vol. 116, no. 2, pp. 130–143, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2013.07.005.

[22] E. A. Villagrán-Munar and C. R. Bojacá-Aldana, "Numerical evaluation of passive strategies for nocturnal climate optimization in a greenhouse designed for rose production (Rosa spp.)," *Ornam. Hortic.*, vol. 25, no. 4, pp. 351–364, 2019, doi: 10.1590/2447-536X.v25i4.2087.

[23] E. A. Villagrán-Munar and C. R. Bojacá-Aldana, "Study using a CFD approach of the efficiency of a roof ventilation closure system in a multi-tunnel greenhouse for nighttime microclimate optimization," *Rev. Ceres*, vol. 67, no. 5, pp. 345–356, 2020, doi: 10.1590/0034-737x202067050002.

[24] J. B. Passioura, "Simulation models: science, snake oil, education, or engineering?," *Agron. J.*, vol. 88, no. 5, pp. 690–694, 1996.

Evaluación experimental de un sistema de calefacción pasiva adaptado a un invernadero de cubierta plástica.

Edwin. Villagran[1], Gloria. Ortiz Rocha[2], Jhon. Espitia[2], Fabian.Velasquez[2], Henry. Hernandez[2], Linda.Gomez[1].

[1] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. Sede central. Km. 14 vía Mosquera - Bogotá, Mosquera - Cundinamarca, Colombia: evillagran@agrosavia.co, lygomez@agrosavia.co.
[2] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia. Centro de Investigación Tibaitata. Km. 14 vía Mosquera - Bogotá, Mosquera - Cundinamarca, Colombia: glaortizro@unal.edu.co, jespitia@agrosavia.co, fvelasquez@agrosavia.co, hhernandez@agrosavia.co.

Abstract: En Colombia los invernaderos usados para la producción agrícola tienen algunos limitantes debido a las condiciones subóptimas de temperatura y humedad relativa que se presentan en las condiciones de clima nocturno, lo que genera fenómenos de inversión térmica y condensación de agua en el interior de estas estructuras, afectando el nivel productivo y la sanidad de las plantas y de los productos cosechados. Así mismo el contexto técnico y económico actual del país no permite que se implemente sistemas de calefacción activa que puedan regular u optimizar estas variables micro climáticas. Por lo tanto, en esta investigación se propuso evaluar experimentalmente un sistema de calefacción pasiva alimentado por energía solar, el cual fue construido en el interior de un invernadero de cubierta plástica ubicado en la sabana de Bogota Colombia. Los resultados experimentales mostraron que el sistema de climatización propuesto permite optimizar las condiciones de temperatura y humedad relativa en el interior del invernadero analizado. Por lo tanto, este tipo de sistemas pueden ser una alternativa sostenible que permitirá mejorar las condiciones micro climáticas de los invernaderos Colombianos, sin embargo también se debe mencionar que es necesario realizar más investigaciones que permitan optimizar la eficiencia del sistema de calefacción propuesto.

Palabras clave: energía solar, piso radiante, microclima, optimización.

1. Introducción.

Desde la década de 1960 el crecimiento de la población mundial ha sido acelerado, por lo cual, el suministro mundial de alimentos per cápita tuvo un incremento de 2200 kcal día-1 (1960) a 2800 kcal día^{-1} en 2009 [1]. Además, se estima que actualmente el 12,5 % de la población mundial se encuentra en estado de desnutrición FAO [2] y que para el año 2050 se puede alcanzar una cifra aproximada a los 9,8 billones de personas [3]. Ante este panorama mundial, la seguridad alimentaria se ha consolidado como un factor crítico para garantizar la sostenibilidad alimentaria en el mundo, dónde la inversión en agricultura es un componente crucial para superar las problemáticas mencionadas anteriormente. En el contexto de seguridad alimentaria, los invernaderos son una alternativa para intensificar la demanda continua de alimentos consolidándose como un sector agrícola altamente competitivo a nivel mundial [4]. El objetivo de un invernadero es proporcionar condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento de las plantas y una alta productividad. Sin embargo, estas condiciones ambientales son afectadas por los factores climáticos externos, como en el caso de los periodos de invierno o los descensos drásticos de temperatura en la noche [5]. Por lo tanto, se deben recurrir a diferentes fuentes de energía para mantener la favorabilidad de las condiciones climáticas al interior del invernadero.

La calefacción al interior del invernadero es la principal demanda de energía, la cual, se suministra generalmente quemando combustibles fósiles [1]. Esta práctica genera un incremento de los costos de energía y una preocupación ambiental asociada a la emisión de gases de efecto invernadero, por lo cual, es necesario disminuir la demanda externa de energía. En este sentido, las soluciones están orientadas hacia el aprovechamiento de las fuentes de energías renovables para mejorar la eficiencia energética del invernadero. La energía solar es una fuente de energía segura, limpia y disponible abundantemente, la cual es una alternativa para las aplicaciones de calefacción en invernaderos. El principio de funcionamiento consiste en la recolección y almacenamiento del exceso de energía solar térmica durante el día para ser utilizado en la noche con el objetivo de suplir las necesidades de calefacción [6], [7]. En los últimos han años se han realizado diversas investigaciones donde se implementan algunas estrategias para realizar labores de calefacción en invernaderos, como por ejemplo el uso de lechos rocosos, uso de materiales de cambio de fase, implementación de mangas de polietileno con agua, aislamiento de las paredes del invernadero y almacenamiento de energía térmica [6], [8]–[10]. Cabe resaltar que, de acuerdo con los resultados de algunas de estas investigaciones, se logra optimizar la temperatura nocturna de los invernaderos en rangos que van desde 2 a 9 °C, respecto al invernadero testigo y se puede suplir mínimo el 30 % de la demanda de calefacción del invernadero analizado [11]. De acuerdo con lo anterior el objetivo de este trabajo consistió en evaluar el aporte al microclima que genera un sistema de calefacción pasivo, adaptado a un invernadero de cubierta plástica construido en la sabana de Bogota Colombia.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripcion del invernadero.

El sistema de calefacción pasiva está compuesto por un panel solar fotovoltaico hibrido monocristalino de 320 W, para la generación de energía eléctrica, complementado con un colector solar térmico SNP15 con un tanque de almacenamiento de agua de 150 litros de capacidad y un potencial de calentamiento de agua hasta 80 °C. Así mismo para la recirculación de agua caliente a través de un piso radiantes construido en el interior del invernadero mediante tubería de PVC de 2" de diámetro se usó una electrobomba de 0.24 kW de potencia, el control de la recirculación de agua en hora y frecuencia se realizó mediante un programador PLC estructurado para este sistema de calefacción, con lo cual durante el ensayo experimental el sistema de calefacción se encendía automáticamente cada 30 minutos desde las 22:30 horas hasta las 5:30 horas del día siguiente. De otro lado el invernadero experimental utilizado en esta investigación está ubicado en el municipio de Mosquera Cundinamarca, en el centro de investigación Tibaitata de la Corporación Colombiana de Investigacion Agropecuaria – Agrosavia, con las siguientes coordenadas geográficas 4°41'43.89" N 74°12'12.87" W y 2546 msnm.

El invernadero de cubierta platica tiene un área de suelo cubierta de 40 m^2, proyectados en una longitud lateral y frontal de 8 y 5 m respectivamente, la altura sobre canal es de 2.7 m y la altura sobre la cumbrera de la ventilación de techo es de 5.8, cuenta con ventilaciones laterales y doble ventialcion tipo mariposa en el techo. Para la finalidad del experimento el invernadero fue divido en dos módulos de igual área cubierta (20 m^2), esto se logró mediante una doble división de una pared plástica en la zona central del invernadero, con lo cual se tienen dos módulos, uno equipado con el sistema de calefacción (IC) y el otro no, este último hace el papel del invernadero testigo (ISC) (Figura 1).

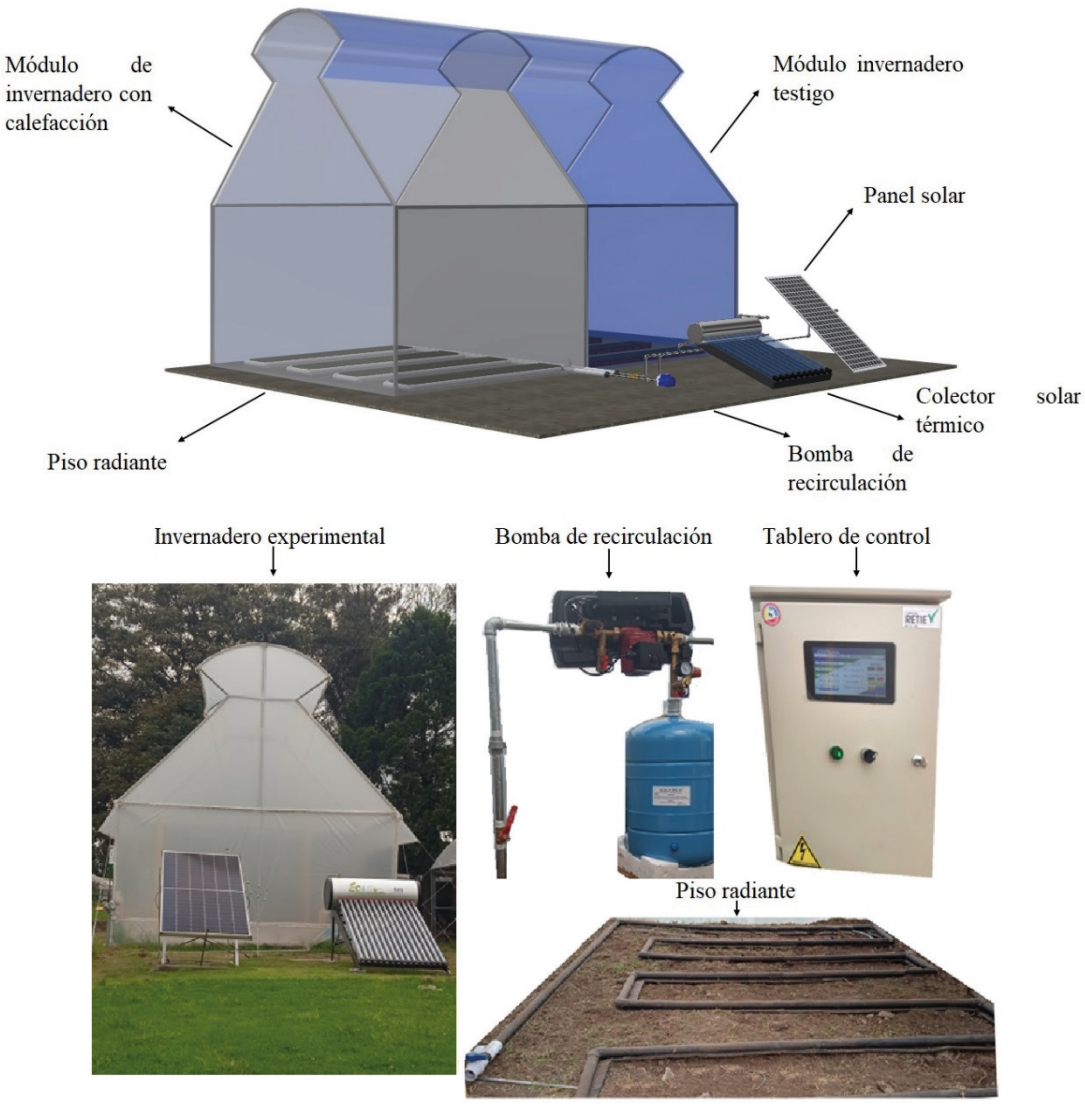


Figura 53. Esquema geométrico del invernadero experimental.

2.2. Recopilación de datos climáticos y micro climáticos.

Para la medida y registro de los datos climáticos exteriores se usó una estación meteorológica automática con transmisión remota WSC11-Thies. La descripción técnica de cada uno de los sensores de medición se resume en la Tabla 24.

Tabla 28. Descripción técnica de los sensores de medición climática exterior.

Variable	Datos técnicos de sensor.
Velocidad del viento.	Tipo: Anemómetro térmico, rango de medición: 0 a 40 ms-1, resolución: 0.1 ms-1, precisión: 0.1 ms-1.
Direccion del viento.	Tipo: Anemómetro térmico, rango de medición: 1 a 360°, resolución: 1°, precisión: ± 10°.
Radiación solar.	Tipo: Sensor de silicio, rango de medición: 1 a 1300 Wm-2, resolución: 1 Wm-2, precisión: ± 10%.
Temperatura.	Tipo: PT1000, rango de medición: -30 a +60 °C, resolución: 0.1 °C, precisión: ± 1 °C.
Humedad relativa.	Tipo: CMOS capacitivo, rango de medición: 0 a 100%, resolución: 0.1 %, precisión: ± 10 %.

En el interior de cada módulo de invernadero para el registro de datos de temperatura y humedad del aire ambiente se usaron dos sensores por modulo y una estación registradora de datos Aranet, las especificaciones técnicas de estos sensores se incluyen en la Tabla 25.

Tabla 29. Descripción técnica de los sensores de medición microclimatica.

Variable	Datos técnicos de sensor.
Estación registradora de datos.	Aranet PRO licence versions select, Aranet PRO 50.
Temperatura del aire.	Tipo: Grado de protección IP67 inalámbrico y alimentado por pilas, Aranet IP 67, rango de medición: -40 a +60 °C y 0 a 100%, resolución: 0.1 °C y 0.1 %, precisión: ± 0.3 °C y ± 2 %.

Los datos en el exterior e interior del invernadero experimental fueron recopilados entre el periodo comprendido de las 6:00 horas del 10 de abril a las 23:59 horas del 30 de abril de 2023, la frecuencia de registro de datos fue cada cinco minutos.

3. Resultados y discusión

3.1. Comportamiento de la temperatura.

En la Figura 2, se puede observar el comportamiento de la temperatura en el ambiente exterior y en los invernaderos IC y ISC. En terminos generales esta variable muestra un comprtamiento donde en los 3 ambientes evaluados la temperatura alcanza su mayor magnitud sobre las horas del medio dia y su menor magnitud en cada amanecer, como es tipico en los invernaderos estableciodos en la sabana de Bogota [12]. En cuanto a la temperatura del invernadero IC se puede observar graficamente que alcanza mayores valores tanto para el periodo diurno, como para el periodo nocturno, respecto a los ambientes exterior y del invernadero ISC. En terminos numericos los resultados obtenidos mostraron que para el periodo diurno la temperatura media alcanzo un valor de 17.3 ± 2.6 °C con valores maximos y minimos de 26.2 y 7.5 °C respectivamente, en el ambiente exterior. Asi mismo estos valores fueron de 18.8 ± 3.8 °C, 29.6 y 10.8 °C en el invernadero ISC, mientras que en el invernadero IC fueron de 20.4 ± 3.7 °C, 31.5 y 11.9 °C. De acuerdo con lo anterior se puede concluir que el sistema de calefaccion permite alcanzar una mayor temperatura en el invernadero IC en un 8.5, 6.2 y 10.1% para la temperatura media, maxima y minima, respectivamente en comparacion con el valor obtenido en el invernadero ISC.

En el caso del periodo nocturno, la temperatura media alcanzo un valor de 13.1 ± 1.2 °C con valores maximos y minimos de 18.2 y 7.3 °C respectivamente, en el ambiente exterior. De otro lado en el invernadero ISC estos valores fueron de 12.5± 1.3 °C, 19.0 y 8.1 °C, mientras que en el invernadero IC fueron de 14.3± 1.2 °C, 20.6 y 9.4 °C, por lo tanto el sistema de calefaccion permite obtener valores de temperatura superiores en el invernadero IC en un 13.1, 7.8 y 16.1 % para la temperaturas medias, maxima y minima, respecto a lo encontrado el invernadero ISC.

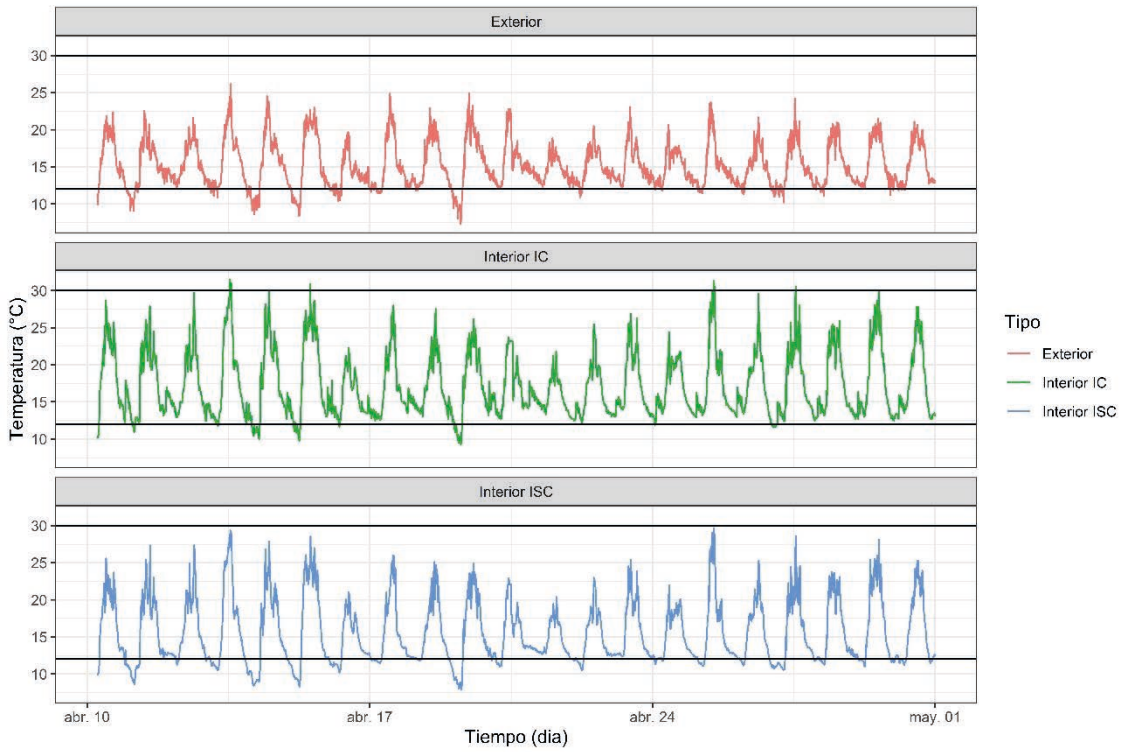


Figura 54. Comportamiento de la temperatura en el ambiente exterior y en el interior de los invernaderos IC y ISC.

3.2. Comportamiento de la humedad.

En la Figura 3, se puede observar el comportamiento de la humedad relativa en el ambiente exterior y en los invernaderos IC y ISC. En terminos generales esta variable muestra un comportamiento donde en los 3 ambientes evaluados la humedad relativa alcanza su mayor magnitud sobre las horas de la noche y la madrugada y su menor magnitud sobre las horas del medio dia, siendo este un comportamiento inverso al presentando para la variable temperatura, lo cual es caracteristico de esta tipologia de invernaderos, mas aun cuando se realizan evaluciones microlcimaticas sin la prensencia de ningun tipo de cultivo [13]. En cuanto a la humedad relativa del invernadero IC se puede observar graficamente que alcanza valores inferiores tanto para el periodo diurno, como para el periodo nocturno, comparada con los ambientes exterior y del invernadero ISC. En terminos numericos los resultados obtenidos mostraron que para el periodo diurno la humedad relativa media alcanzo un valor de 72.1 ± 10.7 % con valores maximos y minimos de 100 y 34% respectivamente, en el ambiente exterior. Asi mismo estos valores fueron de 69.6 ± 11.1 %, 94.5 y 33.2 °C en el invernadero ISC, mientras que en el invernadero IC fueron de 67.3 ± 10.4 %, 91 y 32.3 %. De acuerdo con lo anterior se puede concluir que el sistema de calefaccion permite alcanzar una menor humedad relativa en el invernadero IC en un 2.3, 3.5 y 0.9 % para la humedad relativa media, maxima y minima, respectivamente en comparacion con el valor obtenido invernadero ISC.

En el caso del periodo nocturno, la humedad relativa media alcanzo un valor de 86.7 ± 4.3 % con valores maximos y minimos de 99 y 61 % respectivamente, en el ambiente exterior. De otro lado en el invernadero ISC estos valores fueron de 88.9± 3.7 %, 94.4 y 51 %, mientras que en el invernadero IC fueron de 84.0± 3.9 °C, 93.5 y 47.9 %, por lo tanto el sistema de calefaccion permite obtener valores humedad relativa inferiores en el invernadero IC en un 4.95, 0.9 y 3.1 % para la humedad relativa media, maxima y minima, respecto a lo encontrado el invernadero ISC.

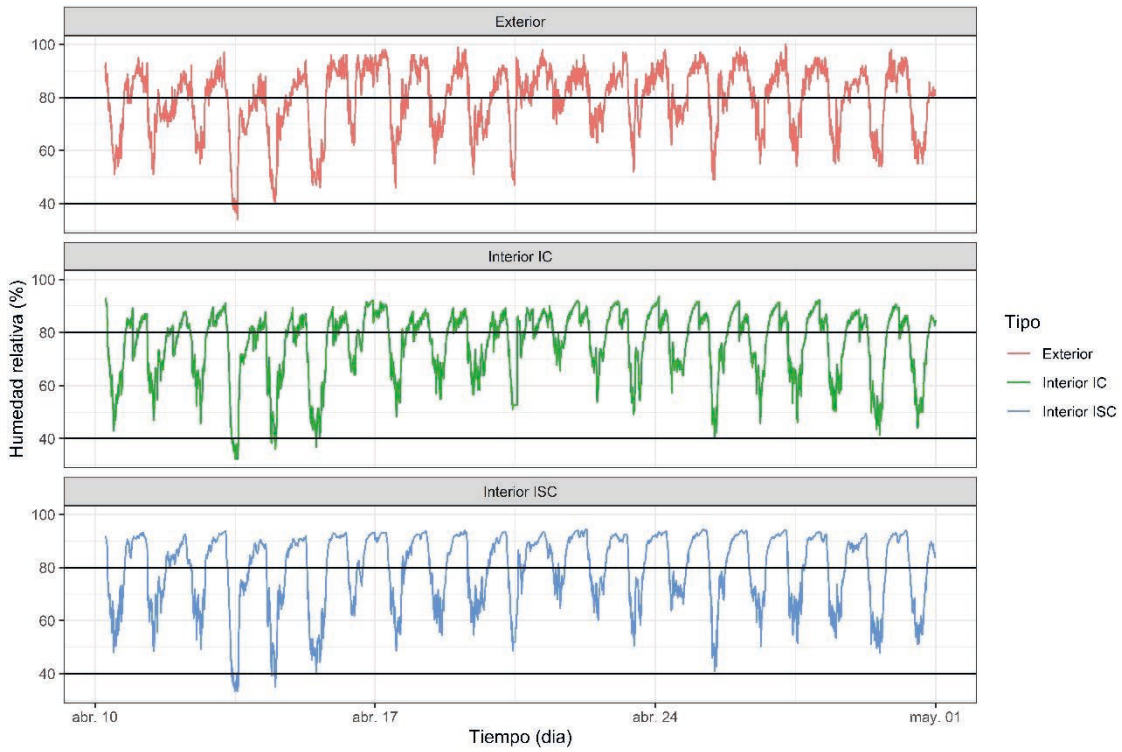


Figura 3. Comportamiento de la humedad relativa en el ambiente exterior y en el interior de los invernaderos IC y ISC.

4. Conclusiones

En este trabajo se realizó la evaluación de un sistema de climatización pasiva adaptado a un invernadero colombiano de cubierta plástica, los resultados obtenidos permitieron observar que el sistema de calefacción permite optimizar la temperatura y la humedad relativa en el interior del invernadero en el periodo nocturno, con lo cual se logran obtener temperaturas medias más elevadas en un 13.1% y humedades relativas medias inferiores en 4.95% respecto al comportamiento del invernadero testigo que no estaba equipado con el sistema de calefacción. Estos resultados sin duda alguna son satisfactorios y son un aliciente para seguir desarrollando investigaciones que permitan optimizar el sistema de calefacción con el objetivo de mejorar las condiciones micro climáticas nocturnas de los invernaderos colombianos, los cuales actualmente presentan problemas asociados a inversión térmica y condensación. Por lo tanto, este tipo de sistemas de climatización se convierten en una estrategia sostenible que puede mejora la agricultura protegida en Colombia.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA por el apoyo técnico en la realización de esta investigación. Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación de Colombia - MINCIENCIAS a través del proyecto denominado "Fortalecimiento de las capacidades de I + D + i del centro de investigación Tibaitata para la generación, apropiación y divulgación de nuevo conocimiento como estrategia de adaptación al cambio climático en sistemas de producción agrícola ubicados en las zonas agroclimáticas del trópico alto colombiano".

6. Referencias

[1] H. Ö. Paksoy and B. Beyhan, "Thermal energy storage (TES) systems for greenhouse technology," in *Advances in thermal energy storage systems*, Elsevier, 2015, pp. 533–548.

[2] F. A. O. S. Yearbook, "World food and agriculture," *Food Agric. Organ. United Nations, Rome*, vol. 15, 2013.

[3] S. Gorjian, H. Ebadi, G. Najafi, S. S. Chandel, and H. Yildizhan, "Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 43, p. 100940, 2021.

[4] S. Baddadi, S. Bouadila, and A. Guizani, "Beneficial use of two packed beds of latent storage energy for the heating of a hydroponic greenhouse," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 156–163, 2019.

[5] A. Bazgaou *et al.*, "Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse," *Sol. Energy*, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.01.041.

[6] V. P. Sethi, K. Sumathy, C. Lee, and D. S. Pal, "Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies," *Sol. Energy*, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.06.034.

[7] E. Cuce, D. Harjunowibowo, and P. M. Cuce, "Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 34–59, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2016.05.077.

[8] L. Gourdo *et al.*, "Heating canarian greenhouse with a passive solar water–sleeve system: Effect on microclimate and tomato crop yield," *Sol. Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.07.004.

[9] A. Bazgaou *et al.*, "Effect of active solar heating system on microclimate, development, yield and fruit quality in greenhouse tomato production," *Renew. Energy*, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.11.007.

[10] G. K. Ntinas, V. P. Fragos, and C. Nikita-Martzopoulou, "Thermal analysis of a hybrid solar energy saving system inside a greenhouse," *Energy Convers. Manag.*, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.02.058.

[11] S. Nishad and I. Krupa, "Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, p. 102241, 2022.

[12] E. A. Villagrán, E. J. Baeza Romero, and C. R. Bojacá, "Transient CFD analysis of the natural ventilation of three types of greenhouses used for agricultural production in a tropical mountain climate," *Biosyst. Eng.*, 2019, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.10.026.

[13] E. Villagrán, J. Flores-Velazquez, C. Bojacá, and M. Akrami, "Evaluation of the Microclimate in a Traditional Colombian Greenhouse Used for Cut Flower Production," *Agronomy*, vol. 11, no. 7, p. 1330, 2021.


UNIVERSIDAD DE SEVILLA


Junta de Andalucía


AGRO
Ingeniería


SCAP