

CONGRESOS Y
JORNADAS
37/96

XIV CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS

AGUADULCE (Almería)

11 al 13 de Junio de 1996



JUNTA DE ANDALUCIA
Consejería de Agricultura y Pesca



XIV CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS

Aguadulce, Almería, 11-13 de junio de 1996



ORGANIZAN

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE RIEGOS Y DRENAJES
COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE LA ICID
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA Y PESCA DE LA JUNTA DE ANDALUCIA
CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SUR
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
UNIVERSIDAD DE ALMERÍA
EMPRESA DE TRANSFORMACIÓN AGRARIA, S.A. (TRAGSA)

© JUNTA DE ANDALUCIA. Consejería de Agricultura y Pesca

Publica: Dirección General de Investigación Agraria
Servicio de Publicaciones y Divulgación.

Colección: Congresos y Jornadas

Información: Recopilada y ordenada por Asociación Española de Riegos y Drenajes.

Coordinación y Diseño: Heliodoro Fernández López.

Depósito Legal: SE - 1.057/96

I.S.B.N.: 84-87564-54-2

Maquetación e Impresión: Tecnographic, S.L.

XIV CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS
Aguadulce, Almería, 11 al 13 de junio de 1996

COMUNICACIONES

ORGANIZAN

ASOCIACION ESPAÑOLA DE RIEGOS Y DRENAJES
COMITE NACIONAL ESPAÑOL DE LA I.C.I.D.
CONSEJERIA DE AGRICULTURA Y PESCA DE LA
JUNTA DE ANDALUCIA
EMPRESA DE TRANSFORMACION AGRARIA
(TRAGSA)
UNIVERSIDAD DE CORDOBA
UNIVERSIDAD DE ALMERIA

COMITE DE HONOR

PRESIDENTE

Excmo. Sr. D. Manuel Chaves González
Presidente de la Junta de Andalucía

VOCALES

Excmo. Sr. Consejero de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía
D. Paulina Plata Cánovas

Excmo. Sr. Consejero de obras Públicas de la Junta de Andalucía
D. Francisco Vallejo Serrano

Excmo. Sr. Presidente de la Diputación Provincial de Almería
D. Luis R. Rodríguez-Comendador Pérez

Excmo. y Magnífico Rector de la Universidad de Córdoba
D. Amador Jover Moyano

Excmo. y Magnífico Rector de la Universidad de Almería
D. Alberto Fernández Gutiérrez

Excmo. Sr. Presidente de la Confederación Hidrográfica del Sur
D. Hilario López Luna

Ilmo. Sr. Director General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Medio Ambiente
D. Carlos Escartín Hernández

Ilma. Sra. Directora General del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria
Doña Alicia Villauriz Iglesias

Ilmo. Sr. Presidente de la Asociación Española de Riegos y Drenajes
D. José Eduardo Torres Sotelo

Ilmo. Sr. Presidente del Comité Español de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes (ICID)
D. José M^a. Martín Mendiluce

Ilmo. Sr. Presidente de la Empresa de Transformación Agraria - TRAGSA
D. Andrés García de la Riva

Ilmo. Sr. Presidente de la Federación Nacional de Comunidades de Regantes
D. Andrés del Campo García

Ilmo. Sr. Presidente de la Caja Rural de Almería
D. Juan del Aguila Molina

Ilmo. Sr. Presidente de UNICAJA
D. Braulio Medel Cámara

COMITE ORGANIZADOR

Presidente: Ilmo. Sr. D. Francisco Nieto Rivera

Secretarios: D. José A. Ortiz Fernández-Urrutia
D. Jerónimo J. Pérez Parra

Vocales: D. Joaquín Berengena Herrera
D. Francisco Bretones Castillo
D. Antonio Calero Romero
D. Rafael Cano López
D. Juan Corominas Massip
D. Miguel Angel Gutiérrez Fernández
D. Alberto Losada Villasante
D. José Roldán Cañas
D. Antonio Vallverdú Arbós

COMITE TECNICO

D. Miguel Alcaide García
D. Luis Corral Mora
D. Federico Estrada Lorenzo
D. Juan Girona Gomis
D. Pedro González Fernández
D. Ernesto Hontoria García
D. Javier López Rodríguez
D. Luciano Mateos Iñiguez
D. Teodoro Montalvo López
D. Felix Moreno Lucas
D. Carlos Ramos Mompó
D. Juan José Ulloa Santamaría

ORGANIZAN Y PATROCINAN

Asociación Española de Riegos y Drenajes (AERYD)

Comité Nacional Español de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes (CERYD)

Dirección General de Investigación Agraria de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía

Confederación Hidrográfica del Sur

Empresa de Transformación Agraria, (TRAGSA)

Universidad de Córdoba

Universidad de Almería

ENTIDADES Y EMPRESAS PATROCINADORAS

Junta Central de Usuarios del Poniente de Almería

Junta Central de Usuarios del Almanzora

HIDROCONTA

Ingeniería y Control del Riego - ICR

TECNI-RIEGOS

EMPRESAS COLABORADORAS

FUNDITUBO, S.A.

ÍNDICE DE AUTORES

AUTOR14C.XLS

NOMBRE	TRABAJO
ABADIA SANCHEZ, Angel	C-18
ABRISQUETA GARCÍA, José M ^a .	A-2
AGUILAR MARIÑOSA, J.V.	D-11
AGUILAR TORRES, Fernando José	B-1, FP-3(p)
AGUILAR, M.A.	B-1(p), FP-3
ALARCON, J.J.	A-2, A-3, A-18
ALCAIDE GARCÍA, Miguel	A-20, C-14
ALEGRE CASTELLVI, Simó	B-3(p)
ALIOD SEBASTIÁN, Ricardo	C-9(p)
ALONSO COBOS, Carlos	D-13
ANDREU, J.	B-20
ARBONÉS, A.	A-9, A-14
ARETXAGA, L.M.	A-18
ARIZA, F.J.	D-4
ARRIAZA BALMON, A.	D-15
ARTETXE, Aitor	A-7, A-18
ARTIGAO RAMIREZ, Alfonso	A-16(p)
ARVIZA VALVERDE, Jaime	C-4, C-8
AYUSO MUÑOZ, José Luis	B-1, C-11
BARRAGAN, J.	C-10, C-17
BASO LOPEZ, José Antonio	D-6(p)
BELLIDO PEREZ, B.	B-12
BENGOECHEA PERÉ, Javier	B-6
BENITO MUÑOZ, Avelino de	B-21
BERBEL VECINO, J.	D-14
BERNARDES, M.	D-10
BEUNZA MUNARRIZ, Ana Isabel	A-7, A-18(p)
BONACHELA, S.	D-10
BRISO-MONTIANO DE ALVARO, Eustorgio	C-12(p)
CABANAS, J.M.	D-2
CAMACHO POYATO, Emilio	A-21, C-14(p), D-4
CANOVAS CUENCA, Juan	B-2
CARREÑO SANCHEZ, Juan	FP-1(p), FP-2
CARRIÓN, P	C-6
CARVAJAL RAMIREZ, Fernando	D-7(p)
CASALI SARASIBAR, Javier	B-10, D-12
CASTEL SANCHEZ, Juan Ramón	A-4
CASTERAD, M ^o . A.	D-3(p)
CASTILLO HERNANDO, Herminio	A-10(p)
CASTRO, J.	A-12
CLOTHIER, B.E.	A-1
COTS RUBIÓ, Luis	C-10, C-17
DAFONTE DAFONTE, Jorge	B-18, B-19
DOMINGO MIGUEL, Rafael	A-3(p)
EIZAGUERRI BRADINERAS, Antonio	C-9
ERENA, M.	A-22
ESTRADA COLLADO, C.	C-9
FACI GONZALEZ, José M ^a .	A-5, B-5
FARRE CODINA, Inmaculada	A-5(p)
FERERES CASTIEL, Elías	A-12(p), B-4, C-16(p)
FERNANDEZ GOMEZ, Rafael	B-13, B-17(p)
FERNANDEZ LUQUE, José Enrique	A-1(p)
GALEGO, R	A-2
GARCIA LOZANO, M.	FP-5
GARCIA MOYA, Antonio José	C-18(p)

AUTOR14C.XLS

ABADIA SÁNCHEZ, Angel	C-18
GARCIA, Josep	A-11(p)
GASCÓ MONTES, José M ^a .	A-17
GASTESI, M	B-10
GIRÁLDEZ CERVERA ,Juan Vicente	B-16, B-17, D-2, D-7, D-9, FP-3
GIRALDEZ CERVERA, Juan Vicente	A-20, B-4, B-11, B-13, B-14, B-15
GIRONA I GOMIS, Joan	A-9, A-14, B-3
GISPERT, Joan R.	A-11
GOMEZ CALERO, José Alfonso	A-12, B-4(p)
GOMEZ POMPA, Pedro	C-1(p)
GOMEZ-LIMÓN RODRIGUEZ, José Antonio	D-14
GONZALEZ FERNANDEZ, Pedro	B-11, B-12, FP-3
GONZALEZ GARCIA, Miguel Angel	B-18(p), B-19(p)
GONZALEZ-ALTOZANO, P. .	A-4(p)
GREEN, S.R.	A-1
GUALDA,, M.J.	D-2
GUARDADO LOPEZ, R	A-16
GUIRAO SOLA, José	B-21(p)
HARO BAILON, Juan Manuel DE	B-14, FP-3
HERRERO, J.	D-3
HIDALGO FERNANDEZ, Rafael Enrique	B-15
HILLS, D.J.	C-10
HONTORIA FERNANDEZ, Chiquinquirá	A-17(p)
JIMÉNEZ BECKER, Silvia	A-19
JIMÉNEZ MEJIAS, R.	A-19
JIMENO RAMIREZ, Antonio	C-13
JUAN, J.A. de	C-15
JUANA SIRGADO, Luis	C-7
LAGUNA LUNA, Ana	B-16
LANG OTTO, Sergio Renato	A-20(p)
LAO ARENAS, M ^a . Teresa	A-19(p)
LINARES SAEZ, Antonio	D-11(p)
LIRIA MONTAÑÉS, José	C-2(p)
LOPEZ LUQUE, R.	A-21, D-4
LOPEZ MENDIETA, Francisco José	B-6
LOPEZ RODRIGUEZ, José Javier	B-10, D-12
LOPEZ RODRIGUEZ, M.	D-9
LORENZO MINGUEZ, Pilar	FP-5
LOSADA VILLASANTE, Alberto	C-7, C-16
LLANOS TRIVIÑO, Ignacio	D-9(p)
MARSAL VILA, Jordi	A-9(p), A-14
MARTINEZ ALVAREZ, Alvaro	B-6(p)
MARTINEZ COB, Antonio	A-6(p), D-3
MARTINEZ LOPEZ, Juan	C-7(p)
MARTINEZ PAZ, José Miguel	D-14(p)
MARTINEZ RASCÓN, A.	A-8
MARTINEZ RAYA, Armando	A-8(p)
MARTINEZ RUBIO, Juan	B-6
MATA, M.	A-9, A-14, B-3
MATEOS INÍGUEZ, Luciano	B-7, B-8, B-9, B-13, B-17, C-16, D-10
MEDINA VINUESA, J.L.	A-21
MEDRANO CORTÉS, E.	FP-5
MIGUEL ESPEJO, C. de	C-11(p)
MIRAVETE, C.	A-14
MONSERRAT VISCARRI, Joaquin	C-10, C-17
MONTALVO LÓPEZ, Teodoro	C-4, C-8
MONTERO MARTINEZ, Jesús	C-6

AUTOR14C.XLS

ABADIA SÁNCHEZ, Angel	C-18
MONTESINOS BARRIOS, Mª Pilar	C-11
MORAL TORRES, Fernando DEL	A-19, B-14, B-15, B-16(p)
MORALES, D	A-3
MORENO LUCAS, Félix	A-1
NOTARIO BODELÓN, Carlos	A-10
OLLES GRUAS, J.	C-9
ORDOÑEZ FERNANDEZ, Rafaela	B-11, B-14, D-2
ORTEGA, J.	A-22
OSUNA GOMEZ, Juan	C-3
OTERO, H	D-13
OYONARTE GUTIÉRREZ, Nicolás	B-7, B-8, B-9
PALOMO GARCÍA, Mª. José	B-7(p), B-8(P)
PASTOR, M.	A-12, C-17
PAZ GONZALEZ, Antonio	B-18, B-19
PÉREZ LUCENA, Carlos	C-14
PEREZ MARTINEZ, Corpus	FP-1, FP-2(p)
PÉREZ PARRA, J. Jerónimo	FP-4
PLAYAN JUBILLAR, Enrique	B-5, C-5, D-8
POLO GOMEZ, Mª. José	B-11, D-2(p)
PUERTO, José Manuel	C-3(p)
PULIDO, I	D-5
RECA CARDEÑA, Juan	A-21, C-7, C-14, D-4
RELAÑO, J.	B-20
RINCON SANCHEZ, Luis	A-15(p), A-22(p)
RODRIGUEZ OCAÑA, A.	D-15(p)
ROJO ALIAGA,, I	FP-4 (p)
ROLDAN CAÑAS, José	B-7, B-8, B-20, C-14, D-4, D-5
ROMERO BUENO, J	B-12
ROSELL, J.R.	C-17
ROYUELA TOMÁS, Alvaro	C-4, C-8
RUIZ AVILES, Pedro	D-15
RUIZ SANCHEZ, Mª. del Carmen	A-2(p), A-3
RUZ, C.	A-12
SAA REQUEJO, A.	A-17
SAEZ, J.	A-15
SANCHEZ BLANQUEZ, J.	A-8
SANCHEZ-BLANCO, Mª. J.	A-2
SANZ BAEZA, Gabriel	A-11
SECO, A.	D-12(p)
SEGARRA LLIDÓ, Juan José	D-13(p)
SEGURA GRAIÑO, Ricardo	D-1(p)
SLATNI, A.	D-8(p)
TARJUELO MARTIN-BENITO, José Mª	C-6(p), C-15
TEBAR GARCIA, J.I.	A-16
TERÉS TERÉS, Valentín	A-7(p), A-18
TORRECILLAS, A.	A-2, A-3
VALIENTE GOMEZ, Manuel	C-6, C-15
VALLVERDÚ ARBÓS, Antonio	FP-4
VILLALOBOS, Francisco José	A-13(p), D-10
ZAPARDIEL, Juan	C-3
ZAPATA RUIZ, N.	C-3(p)

ÍNDICE DE TRABAJOS

INDICE GENERAL

- A) AGRONOMIA DEL RIEGO: Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. Climatología y edafología. Necesidades hídricas de los cultivos, balance, coeficientes, situaciones de escasez y riegos deficitarios, etc. Fórmulas de cálculo y modelos matemáticos de estos procesos.**

PRESENTACION ORAL

Página

A.1	APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE COMPENSACIÓN DE PULSO DE CALOR A LA MEDIDA DEL FLUJO DE SAVIA EN OLIVO, por J.E. Fernández (p), F. Moreno, B.E. Clothier y S.R. Green.	1
A.2	DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE DISTINTOS PERÍODOS FENOLÓGICOS A LA SUPRESIÓN DEL RIEGO EN ALBARICOQUERO, por M ^a C. Ruiz Sánchez (p), M ^a J. Sánchez-Blanco, R. Galego, J.J. Alarcón, J.M ^a Abrisqueta y A. Torrecillas.	9
A.3	RESPUESTA DEL LIMONERO FINO SOBRE DOS PORTAINJERTOS DIFERENTES AL ENCHARCAMIENTO, por R. Domingo (p), M ^a C. Ruiz Sánchez, D. Morales, J.J. Alarcón y A. Torrecillas.	16
A.4	RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO EN CLEMENTINA DE NULES, por P. González-Altozano (p) y J.R. Castel Sánchez.	23
A.5	EFFECTO DE UN DÉFICIT HÍDRICO CONTINUADO SOBRE PARÁMETROS PRODUCTIVOS DEL MAÍZ Y SORGO, por I. Farré Codina (p) y J.M ^a Fáci González.	32
A.6	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA HORARIA Y DIARIA EN EL CLIMA SEMIÁRIDO DE ARAGÓN. PRIMEROS RESULTADOS, por A. Martínez Cob.	40
A.7	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SUSTRATOS, por V. Terés (p), A. Artetxe y A.I. Beunza.	48
A.8	RESPUESTA DEL OLIVO EN CONDICIONES DE EXTREMA SEQUÍA A DISTINTAS DOSIS DE RIEGO, por A. Martínez Raya (p), A. Martínez Rascón y J. Sánchez Blánquez	57
A.9	EVALUACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE HOJAS DE PERAL Y SU USO EN LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN CONDICIONES DE DÉFICIT HÍDRICO, por J. Marsal (p), J. Girona, M. Mata y A. Arbonés.	65

A.10	COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE LAS DOTACIONES NETAS DE RIEGO EN LAS CUENCAS DEL DUERO, TAJO, JUCAR Y EBRO. METODOLOGÍAS: BLANEY-CRIDDLE, PENMAN Y PENMAN-MONTEITH, por H. Castillo Hernando (p) y C. Notario Bodelón.	72
A.11	APLICACIÓN DE LA FÓRMULA DE PENMAN-MONTEITH (FAO) PARA EL CÁLCULO DE LAS NECESIDADES DE AGUA Y PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN LA ZONA REGABLE DEL RIO FRANCOLÍ Y DE LAS AGUAS PROCEDENTES DE LA EDAR DE TARRAGONA, por J. García (p), J.R. Gispey y G. Sanz.	83
A.12	RECUPERACIÓN DEL OLIVO DESPUÉS DE UNA SEQUÍA EXTREMA, por E. Fereres (p), C. Ruz, J. Castro, J.A. Gómez y M. Pastor.	89
A.13	MEDIDA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA POR COVARIANZA DE TORBELLINOS, por F.J. Villalobos (p).	94
A.14	EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD ESTACIONAL DEL ALMENDRO (<i>Prunus amygdalus, L</i>) AL DÉFICIT HÍDRICO. RESPUESTA FISIOLÓGICA Y PRODUCTIVA, por J. Girona (p), J. Marsal, M. Mata, A. Arbonés y C. Miravete. . .	102
A.15	EVAPOTRANSPIRACIÓN Y COEFICIENTES DE CULTIVO DE LA LECHUGA EN RIEGO POR SURCOS, por L. Rincón (p) y J. Sáez.	110

PRESENTACIÓN COMO CARTEL

A.16	EFFECTOS DE LA TRANSFORMACIÓN Y EXPLOTACIÓN EN REGADÍO, SOBRE LA DEGRADACIÓN DE SUELOS DE LA ZONA DE BARRAX (ALBACETE), por A. Artigao Ramírez (p), R. Guardado López y J.I. Tébar García.	118
A.17	COMPARACIÓN DE SEIS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE DATOS CLIMÁTICOS, por C. Hontoria Fernández (p), A. Saa Requejo y J.M. Gascó Montes.	125
A.18	MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO, por A.I. Beunza (p), V. Terés, A. Artetxe y L.M. Aretxaga.	132

A.19 DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE SONDAS DE SUCCIÓN, por M.T. Lao Arenas (p), R. Jiménez Mejías, S. Jiménez Becker y F. del Moral Torres.	141
A.20 COMPARACIÓN ENTRE CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE UN SUELO FRANCO ARENOSO OBTENIDAS MEDIANTE UTILIZACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS, por S.R. Lang Otto (p), M. Alcaide García y J.V. Giráldez Cervera.	147
A.21 DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POR MEDIO DE IMÁGENES LANDSAT-TM5 Y SU AGREGACIÓN A RESOLUCIÓN NOAA-AVHRR, por J.L. Medina Minuesa (p), E. Camacho Poyato, J. Reca Cardeña y R. López Luque.	156
A.22 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN LA REGIÓN DE MURCIA, por L. Rincón (p), J. Ortega y M. Erena.	167

- B) HIDROLOGÍA, DRENAJE Y SALINIDAD: Hidrología e hidráulica agrícola. Drenaje, salinidad y calidad del agua de riego. Utilización para el riego de recursos hídricos no convencionales: aguas depuradas y desalinizadas. Experiencias prácticas.**

PRESENTACION ORAL

	<u>Página</u>
B.1 DEPURACIÓN DE PURINES DE CERDO. DISEÑO Y EVALUACION DE UN SISTEMA DE BAJO COSTE, por M.A. Aguilar (p), J.L. Ayuso y F.J. Aguilar.	175
B.2 ESTUDIO DE FLUJOS EN PLANTAS DE DESALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA, por J. Cánovas Cuenca (p). . . .	183
B.3 EFECTO DEL CLORURO SÓDICO SOBRE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN AVELLANO (<i>Corylus avellana</i> L) por S. Alegre (p), J. Girona y M. Mata.	190
B.4 DISEÑO DE UN MODELO DE INFILTRACIÓN PARA OLIVAR, por J.A. Gómez Calero (p), J.V. Giráldez Cervera y E. Fereres Castiel.	198
B.5 APLICACIÓN DE FERTILIZANTES CON EL RIEGO POR SUPERFICIE: ANÁLISIS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES, por E. Playán Jubillar (p) y J.M ^a . Fáci González.	205
B.6 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO-ESTRUCTURALE INSTALACIÓN DE UNA RED AUTOMATIZADA DE CONTROL EN LA ZONA REGABLE DE LA MORAÑA (AVILA), por A. Martínez Alvarez (p), J. Bengoechea Peré, F.J. López Mendieta y J. Martínez Rubio.	213
B.7 EFECTO DEL PERÍMETRO MOJADO SOBRE LA INFILTRACIÓN EN EL RIEGO POR SURCOS, por M.J. Palomo (p), N.A. Oyonarte, L. Mateos y J. Roldán.	225
B.8 INFILTRACIÓN EN RIEGO POR SURCOS MEDIANTE PULSACIONES INTERMITENTES, por M.J. Palomo (p), N.A. Oyonarte, L. Mateos y J. Roldán.	235
B.9 VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA INFILTRACIÓN EN EL RIEGO POR SURCOS, por N.A. Oyonarte (p) y L. Mateos	244
B.10 ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DEL MODELO WEPP PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE SUELO: RESULTADOS PARA UNA ZONA DE NAVARRA, por M. Gastesi (p), J. Casalí y J.J. López	252

B.11	ESTUDIO DE LA CALIDAD DE UN AGUA RESIDUAL DEPURADA EN SU USO PARA RIEGO, por R. Ordóñez (p), M.J. Polo, J.V. Giráldez y P. González	260
B.12	EL PROCESO DE DESALINIZACIÓN DEL SECTOR B-XII DE LA ZONA REGABLE DEL BAJO GUADALQUIVIR, por P. González Fdz. (p), J. Romero Bueno y B. Bellido Pérez	267
B.13	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA EROSIÓN DEL SUELO EN EL RIEGO POR SURCOS, por R. Fernández (p), L. Mateos y J.V. Giráldez	274
B.14	MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL PERFIL DE UN SUELO DE DOÑANA, por J.M. de Haro (p), J.V. Giráldez, R. Ordóñez y F. del Moral	282
B.15	ESTUDIO COMPARADO DE LA DIFUSIVIDAD POR MÉTO- DOS UNI Y BIDIMENSIONALES, por R.E. Hidalgo (p), F.J. del Moral y J.V. Giráldez	289
B.16	MOVIMIENTO DEL AGUA EN SUELOS ARENOSOS: EL PROBLEMA DE LA REPELENCIA, por F.J. Moral (p), J.V. Giráldez y A. Laguna	296
B.17	MODIFICACIONES TEXTURALES EN EL RIEGO POR SURCOS DEBIDAS A LA EROSIÓN, por R. Fernández- Gómez (p), J.V. Giráldez y L. Mateos.	304

PRESENTACION COMO CARTEL

B.18	ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA CON- DUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA EN ZONAS SOMETIDAS A HIDROMORFÍA TEMPORAL, por M.A. González García (p), J. Dafonte Dafonte y A. Paz Gonzá- lez.	313
B.19	ESTIMACIÓN DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD HI- DRÁULICA SATURADA A PARTIR DE TÉCNICAS GEOES- TADÍSTICAS, por M.A. González García (p), J. Dafonte Dafonte y A.Paz González.	320
B.20	APROXIMACIÓN A LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRI- COS EN LA CUENCA DEL RIO GUADALQUIVIR, por J.A. Relaño (p), J. Roldán y J. Andreu.	328
B.21	EFFECTO DEL AGUA APLICADA SOBRE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN UN CULTIVO DE REMOLACHA AZU- CARERA, por J. Guirao Sola (p) y A. de Benito Muñoz.	346

- C) INGENIERÍA DEL RIEGO: Ingeniería del riego. Equipos, materiales, instrumentos, automatismos, etc. Métodos de riego y respuesta de los cultivos. Explotación, mantenimiento, eficiencia, modernización y rehabilitación de los sistemas de riego y drenaje. Programación de la red. Modelación matemática.**

PRESENTACION ORAL

Página

C.1	DISPOSITIVO DE AFOROS DE POZOS DE SONDEO, por P. Gómez Pompa (p).	354
C.2	PROBLEMAS DE REGULACIÓN DESDE AGUAS ARRIBA EN CANALES DE RIEGO Y SOLUCIÓN ADOPTADA PARA EL CANAL DEL ZÚJAR, por J. Liria Montañés (p). . .	362
C.3	DISEÑO ASISTIDO DE SISTEMAS DE CONDUCCIÓN Y DISTRIBUCIÓN EN ZONAS REGABLES. REGVAR-DARRCO, por J.M. Puerto (p), J. Zapardiel y J. Osuna.	369
C.4	REDES COLECTIVAS CON DISTRIBUCIÓN A LA DEMANDA. APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS EN EL DIMENSIONADO Y SELECCIÓN DE GRUPOS DE IMPULSION, por J. Arviza Valverde (p), A. Royuela Tomás y T. Montálvo López.	384
C.5	RIEGO POR INUNDACIÓN CON UN PUNTO DE DESAGÜE, por N. Zapata Ruiz (p) y E. Playán Jubillar.	392
C.6	ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN RIEGO POR ASPERSIÓN CON EL MODELO "SIRIAS", por J.M ^a Tarjuelo (p), P. Carrión, J. Montero y M. Valiente. . . .	401
C.7	DISTRIBUCIÓN DEL RIEGO POR GOTEO EN GRUPOS DE INVERNADEROS, por J. Martínez (p), A. Losada, L. Juana y J. Reca.	411
C.8	PÉRDIDAS PRODUCIDAS POR LA CONEXIÓN DE LATERALES EN TERCIARIAS, por A. Royuela Tomás (p), J. Arviza Valverde y T. Montálvo López.	419
C.9	APLICACIÓN DE GESTAR, UN PAQUETE AVANZADO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA PARA EL PROYECTO Y GESTIÓN DE REGADÍOS A PRESIÓN, por R. Aliod Sebastián (p), A. Eizaguerri Bradineras, C. Estrada Collado y J. Ollés Grúas.	424

C.10	COMPARACIÓN DE DIFERENTES DISTRIBUIDORES DE BAJA PRESIÓN PARA MÁQUINAS DE RIEGO AUTOPROPULSADAS CON MOVIMIENTO TRANSVERSAL, por J. Barragán (p), D.J. Hills, J. Monserrat y L. Cots.	434
C.11	APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS HIDRÁULICO EN PERÍODO EXTENDIDO A LA REGULACIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA, por C. de Miguel Espejo (p), M ^a . P. Montesinos Barrios y J.L. Ayuso Muñoz.	441
C.12	SISTEMA DE CONTROL Y GESTIÓN DE RECURSOS HIDRÁULICOS EN LA CUENCA DEL DUERO, por E. Briso-Montiano de Álvaro (p).	450
C.13	MANTENIMIENTO DE LOS ELEMENTOS METÁLICOS EN LA ZONA REGABLE DEL CANAL DE ORELLANA (Badajoz), por A. Jimeno Ramírez	455
C.14	DISEÑO Y MANEJO DEL RIEGO POR SURCOS, por E. Camacho (p), C. Pérez, J. Roldán, M. Alcaide y J. Reca	460
C.15	MODELO MULTICRITERIO DE AYUDA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA OPTIMIZACIÓN DEL MANEJO DEL RIEGO POR ASPERSIÓN, por M. Valiente (p), J.M. Tarjuelo y J.A. De Juan	471
C.16	EFICIENCIA DEL RIEGO Y MODERNIZACIÓN DE REGADÍOS, por L. Mateos (p), E. Fereres y A. Losada	481
 <u>PRESENTACION COMO CARTEL</u>		
C.17	COMPUERTA SEMIAUTOMÁTICA PARA RIEGO SUPERFICIAL, por R. Pastor (p), J. Monserrat, J.R. Rosell, J. Barragán y Ll. Cots.	489
C.18	CARACTERÍSTICAS DE LOS EMISORES MÁS UTILIZADOS EN LA REGIÓN DE MURCIA EN EL PERÍODO 92-95, por A.J. García Moya (p) y A. Abadía Sánchez.	498

- D) TEMAS VARIOS: Formación del regante. Asesoría de riego. Aspectos sociales, institucionales, económicos, legislación del agua y derechos de uso, tarifas de riego, etc. Planificación y control de los recursos superficiales y subterráneos. Impacto ambiental de las obras de riego y de drenaje. Agricultura de regadío sostenible. Otros.**

PRESENTACION ORAL

	<u>Página</u>
D.1 RIESGOS Y VENTAJA DE LA INTRODUCCIÓN DEL INTERCAMBIO DE CONCESIONES, por R. Segura Graño (p).	505
D.2 EFECTOS A CORTO PLAZO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE COBRE Y ZINC EN UN SUELO AGRÍCOLA TRAS LA APLICACIÓN DE LODOS DE DPURADORA, por M ^a J. Polo (p), R. Ordoñez, J.V. Giráldez, J.M. Cabanás y M.J. Gualda.	510
D.3 COMBINACIÓN DE DATOS DE TERRENO, DE SATÉLITE Y METEOROLÓGICOS PARA ESTIMAR EL AGUA DE RIEGO ANUAL POR DISTRITO, por M ^a A. Casterad (p), J. Herrero y A. Martínez-Cob.	518
D.4 SISTEMA SOPORTE DE DECISIÓN PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE UNA BALSA DE REGULACIÓN DE AGUA PARA RIEGO, por J. Reca (p), R. López Luque, E. Camacho, F.J. Ariza y J. Roldán.	526
D.5 AHORRO ENERGÉTICO EN EL DISEÑO DE UNA RED DE IMPULSIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA PARA RIEGO, por I. Pulido (p) y J. Roldán.	539
D.6 LA UTILIZACIÓN DE GEOTEXTILES EN LA CONSTRUCCIÓN DE EMBALSES, por J.A. Baso López (p).	549
D.7 ANÁLISIS DEL SISTEMA CUBILLAS-COLOMERA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, por F. Carvajal Ramírez (p) y J.V. Giráldez Cervera.	559
D.8 GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS A LA MEJORA DE LOS RIEGOS DE LA COMUNIDAD DE REGANTES DE ALMUDEVAR (HUESCA), por A. Slatni (p) y E. Playán Jubillar.	568
D.9 DISEÑOS DE ARQUITECTURA MODULAR VS CONTROLADORES LÓGICOS (PLCs) EN SISTEMAS DE APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS DIFERENCIALES EN RIEGOS AUTOPROGRAMADOS, por I. Llanos Triviño (p), J.V. Giráldez Cervera y M. López Rodríguez.	578

D.10	EVALUACIÓN DE TRES EQUIPOS COMERCIALES DE TDR PARA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO, por J.A. Gómez (p), M. Bernárdes, S. Bonachela, F.J. Villalobos y L. Mateos	585
D.11	SISTEMA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE CAUDALES EN EL CANAL DE ARAGÓN Y CATALUÑA, por A. Linares Sáez, (p) y J.V. Aguilar Mariñosa	593
D.12	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO HEC-1 EN LA CUENCA DEL ARGA PARA LA OBTENCIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO EN PAMPLONA, por A. Seco (p), J.J. López y J. Casalí.	603

PRESENTACION COMO CARTEL

D.13	MANIFIESTO EN FAVOR DEL USO RACIONAL Y EFICIENCIA DEL AGUA, por J.J. Segarra Llidó (p), H. Otero y C. Alonso Cobos.	611
D.14	HIDRONET: LA RED DE ECONOMÍA Y ECOLOGÍA DEL AGUA DE RIEGO EN INTERNET, por J.M. Martínez Paz (p), J.A. Gómez-Limón Rodríguez y J. Berdel Vecino.	616
D.15	OPINIÓN DE LOS AGRICULTORES FRENTE A POSIBLES MEJORAS EN LOS REGADÍOS ANDALUCES, por A. Rodríguez Ocaña (p), M. Arriaza Balmón y P. Ruiz Avilés	622

TRABAJOS PRESENTADOS FUERA DE PLAZO

FP-1	GASTOS DE AGUA Y COSECHAS OBTENIDAS EN LOS REGADÍOS DEL PONIENTE ALMERIENSE, por J. Carreño (p) y C. Pérez Martínez	631
FP-2	PRODUCTIVIDAD DEL AGUA DE RIEGO EN CULTIVOS PROTEGIDOS DE PIMIENTO EN ALMERÍA, por C. Pérez Martínez (p) y J. Carreño	642
FP-3	VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO FRANCO ARENOSO CON LA APLICACIÓN DE COMPOST DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS, por F.J. Aguilar (p), J.M. de Haro, J.V. Giráldez y P. González	650
FP-4	APTITUD DE LAS AGUAS RESIDUALES DE ALMERÍA TRATADAS CON OZONO PARA SU REUTILIZACIÓN EN RIEGO, por I. Rojo Aliaga (p), J.J. Pérez Parra y A. Vallverdú Arbós	660
FP-5	ESTUDIO COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA HÍDRICA DE DOS SISTEMAS DE CONTROL DE RIEGO EN SUSTRATO, por P. Lorenzo Minguez (p), E. Medrano Cortés y M. García Lozano	668
FP-6	SISTEMAS DE TELECONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INTEGRAL DE REGADÍOS: APLICACIÓN A LOS REGADÍOS DEL BAJO ANDARAX, por S. Elola Jiménez (p), D. Pérez de los Cobos Marín, J.J., Pérez Parra, A. Vega Betoret, M. Molina Castillo y S. Olivares Ruiz	673

XIV CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS

I

COMUNICACIONES

**INDICES GENERALES Y
GRUPOS DE TEMAS A Y B**

AGUADULCE, ALMERÍA, 11-13 DE JUNIO DE 1996

GRUPO DE TEMAS A
AGRONOMÍA DEL RIEGO

PRESENTACIÓN ORAL

APLICACION DE LA TECNICA DE COMPENSACION DE PULSO DE CALOR A LA MEDIDA DEL FLUJO DE SAVIA EN OLIVO

Fernández¹ J E (P), Moreno¹ F, Clothier² B E y Green² S R

El objetivo del presente trabajo ha sido comprobar la utilidad de la técnica de compensación de pulso de calor para la medida del flujo de savia en tronco y raíces de olivos (*Olea europea*, L.) adultos en condiciones de campo. Los resultados mostraron la dinámica tanto transpirativa como de absorción de agua por las raíces, además de las variaciones de flujo a distintas profundidades por debajo del cambium. Se observó que el transporte de savia en una rama de un árbol regado ocurre en prácticamente toda su sección, registrándose sólo en la parte exterior de la misma en un árbol de secano. En cuanto a la raíz, los flujos mayores de savia se midieron hacia el exterior de la raíz del árbol regado, observándose la tendencia contraria en el árbol de secano. Se concluye que esta técnica, robusta y barata, puede utilizarse en el olivo para medir la dinámica de la absorción de agua por las raíces y de la transpiración. Tras un calibrado adecuado, puede utilizarse también para medir, en tiempo real, los consumos de agua por el olivo.

This paper refers to the availability of the compensation heat-pulse technique for the measurement of sap flow within the trunk and roots of olive trees (Olea europea L.). Results are presented for one regularly irrigated tree and one unirrigated olive tree in the dry environment of SW Spain. The use of the technique provided accurate measurements of both tree transpiration and water uptake by the studied root, on the time scale ranging from minutes through to months. Velocity profiles throughout the cross section of trunk and root were also established. The compensation heat-pulse technique has shown to be a robust non-expensive tool for studying the hydraulic functioning of the tree.

1. Introducción

La práctica del riego ha demostrado ser indispensable para obtener la máxima rentabilidad en una plantación de olivar. No existe en la actualidad, sin embargo, información suficiente que permita realizar el riego en el olivar de forma óptima. Existen trabajos con olivos jóvenes en los que se estudia la respuesta de los mismos al estado hídrico mediante el seguimiento de indicadores fisiológicos (Thompson y col., 1983; Natali y col., 1985), así como trabajos con árboles adultos en condiciones de campo. Moreno y col. (1988), por ejemplo, calcularon el consumo hídrico de un olivar regado por goteo, a partir de un balance hídrico a nivel de parcela. Por su parte, Goldhamer y col. (1993) analizaron la respuesta del olivo a distintos aportes de agua, mostrando resultados de crecimiento y producción. Sin

1 Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (C.S.I.C.)
Avenida de Reina Mercedes s/n Apto 1052, 41080-Sevilla
Tel: 95/4624711 Fax: 95/4604002 C.e.: JEFER@cica.es

2 Environment Group, HortResearch Institute
P.B. 11-030, Palmerston North (Nueva Zelanda)

embargo, la optimización del riego en el olivar exige un conocimiento más detallado de la dinámica de la transpiración en función de las condiciones de agua en el suelo y en la atmósfera y de los mecanismos de control del gasto de agua por parte de la planta, de forma que pueda tenerse en cuenta el efecto de estos factores en el cálculo de las dosis y frecuencias de los aportes hídricos.

En la década de los cincuenta se comenzó a medir el flujo de savia a través del xilema de plantas leñosas, con el objeto de conocer el agua consumida por la planta (Marshall, 1958). Este tipo de medidas aporta una información del máximo interés, ya que permiten conocer, en tiempo real, cuanta agua es absorbida por una planta, ante distintas condiciones medioambientales. Actualmente existen varias técnicas adecuadas para este tipo de medidas. Entre las más extendidas están las que se basan en un balance de calor (Granier, 1985) y las basadas en la emisión periódica de pulsos de calor en el xilema (Cohen y col., 1981). Dentro de estas últimas, la técnica de compensación de pulso de calor (Green y Clothier, 1988) supone una variación interesante, ya que es la única que permite medir los flujos de savia existentes a distintas distancias entre la corteza y el centro del órgano en el que se mide. Puede emplearse no sólo en tronco y ramas, sino también en raíces (Green y Clothier, 1991). Hasta ahora se han utilizado estas técnicas con éxito en diversas especies, sobre todo en árboles forestales y frutales. Sin embargo, la influencia en los resultados de las características de la madera de cada especie, hace necesario un calibrado de la técnica en cuestión cuando se aplica por primera vez a una especie concreta.

El objeto de este trabajo ha sido comprobar la utilidad de la técnica de compensación de pulso de calor en la determinación de la dinámica de la transpiración del olivo y de la absorción de agua por sus raíces, mediante la medida de los flujos de savia. Las medidas se han llevado a cabo en ramas principales y raíces de olivos adultos sometidos a distintos regímenes de riego.

2. Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en la finca experimental del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (C.S.I.C.), situada en el término municipal de Coria del Río (37° 17' N, 6° 3' O, altitud 30 m), a 13 km de Sevilla. El suelo de la finca es un *Xerocept* en fase calcárea, con valores texturales medios de 22'6% de arcilla, 13'4% de limo, 36'5% de arena fina y 27'5% de arena gruesa (Moreno y col., 1988). El contenido volumétrico de agua en el suelo es de 0'33 m³ m⁻³ a saturación y de 0'10 m³ m⁻³ para un potencial de agua en el suelo de -1'5 MPa (Moreno y col., 199?).

Las medidas de flujo de savia se realizaron en olivos *Manzanillo* de 25 años de edad, plantados a 7 x 7 m. Los árboles son de un solo pie, bifurcándose a partir de 0'5-0'7 m en dos ramas principales. Se eligieron dos árboles representativos de los existentes en una plantación de 1 ha perteneciente a la finca experimental. Uno de ellos (árbol regado) se regó por poceta de 3 m de radio, con riegos semanales de unos 650 L, desde mayo a finales de agosto de 1994. El otro árbol (árbol de secano) recibió como único aporte hídrico un riego al comienzo de la experiencia, en mayo. El 30 de agosto se instalaron los instrumentos para la aplicación de la técnica de compensación de pulso de calor (Green y Clothier, 1988) en una de las ramas principales de cada árbol experimental, a una altura de 1'2-1'4 m sobre el suelo.

La instalación se hizo también en una de las raíces principales de cada árbol, para lo que se descubrió una zona cercana al cuello, con cuidado de no dañar la raíz.

El fundamento de la técnica y la descripción detallada de cómo se instalan en el árbol sus distintos componentes, se detalla en Green y Clothier (1988). Brevemente, la técnica consiste en introducir hasta el centro del órgano en el que se quiere medir el flujo de savia una aguja metálica que se calienta durante 2 segundos cada media hora. A 20 mm de la misma y en el sentido del flujo de savia se coloca un multisensor de temperaturas, compuesto por cuatro termistores colocados a distintas distancias desde la corteza hasta el centro del órgano en el que se instala. Estos cuatro termistores permiten medir la variación de flujo de savia en función de la distancia al centro de la rama o raíz. En el sentido opuesto al flujo de savia y a 5 mm de la aguja calefactora se coloca otro multisensor de temperaturas, similar al anterior. El uso conjunto de ambos multisensores permite deducir la velocidad de transmisión de calor por conducción de la madera de la velocidad debida al flujo de savia en sí. Las dimensiones de la aguja calefactora y del multisensor de temperaturas, así como la distancia de separación de los termistores en estos últimos, depende del radio del órgano en el que se instalen. En nuestro caso, los radios de las ramas de los árboles de riego y secano fueron 64 mm y 59 mm respectivamente, mientras que los radios de las raíces fueron 34 mm en el árbol regado y 29 mm en el de secano. Tanto la aguja calefactora como los multisensores se conectaron a un datalogger Campbell CR10, el cual almacenaba la información enviada por los termistores y controlaba la emisión de los pulsos de calor, con la ayuda de un ingenio electrónico basado en un puente de Wheatstone. Todo el sistema se alimentó con una batería de 12 voltios y 75 Amperios. La información almacenada en el datalogger se leyó semanalmente mediante un ordenador portátil en el que se había instalado previamente un programa elaborado al efecto por Green y Clothier (1988), basándose en los cálculos de Swanson y Whitfield (1981).

Las medidas de flujo de savia comenzaron el 30 de agosto (día del año 243), cuatro días después de un riego. El día 252 se dió un último riego de 730 L al árbol regado. El árbol no regado desde mayo se regó con 870 L el día 255, con objeto de estudiar su recuperación tras un prolongado período de estrés hídrico. El sistema estuvo funcionando ininterrumpidamente durante tres meses, aunque en el Apartado 3 se muestran los resultados de las primeras dos semanas (días del año 243 al 260), suficientes para evaluar la aplicabilidad de la técnica en el olivo.

3. Resultados y discusión

En la Figura 1 se muestran los flujos de savia medidos en la rama y en la raíz de los árboles de ambos tratamientos. Se observa que los flujos de savia fueron mayores en el árbol regado que en el de secano, siendo las diferencias particularmente importantes en el caso de la raíz. De hecho, en el árbol regado se midieron en raíz flujos máximos en las horas centrales del día que con frecuencia fueron superiores a 1 L h^{-1} , mientras que en la raíz del árbol de secano el flujo máximo medido fue de 0.061 L h^{-1} . El fenómeno de la recuperación hídrica que tiene lugar en los árboles durante la noche se refleja en la figura del árbol regado (Fig. 1), pudiéndose observar que hay una cierta absorción de agua durante la noche, a pesar de la ausencia de transpiración.

En la Figura 1 puede observarse también un rápido incremento del flujo inmediatamente después del riego, en ambos árboles. Esto demuestra que el olivo tiene una rápida respuesta al riego, incluso después de un período prolongado de sequía. En el Apartado 2 se explica que el árbol no regado permaneció sin ningún aporte hídrico desde comienzos de mayo hasta el 12 de setiembre (día 255), día en el que se le dió el riego de recuperación. Esta capacidad que tiene el olivo estresado de utilizar rápidamente el agua proveniente de las lluvias de otoño o de algún riego ocasional ha sido observada por varios autores, tras el seguimiento de los valores de potencial hídrico foliar y de conductancia estomática (Jorba y col., 1985; Fernández y col., 1993).

En la Figura 2 se muestran los perfiles de velocidad de savia medidos a diferentes profundidades por debajo del cambium, tanto en la rama como en la raíz de ambos árboles experimentales. En el árbol regado, las mayores velocidades en la rama se midieron en la madera más joven cercana a la superficie, mientras que en la raíz el flujo se mostró más uniformemente distribuido. En el árbol de secano, además de registrarse velocidades menores que en el de riego tanto en la raíz como en la rama, se observó que en esta última la zona de conducción de savia estaba restringida a aproximadamente los 20 mm exteriores. En cuanto a la raíz, los mayores flujos de savia se midieron en la zona más interna de la misma, contrariamente a lo observado en el árbol regado.

En la Figura 3 se muestran los perfiles de velocidad de savia, tanto en rama como en raíz, medidos en el árbol de secano después del riego de recuperación del día 255. El día después del riego se midieron perfiles de velocidad de savia notablemente más altos que antes del mismo, indicando el rápido uso del agua por parte del olivo ya comentado. Las velocidades fueron decreciendo progresivamente en los días sucesivos. Destaca el hecho de que no se detectó flujo de savia en la parte externa de la raíz, a pesar del notable incremento del flujo en las zonas más internas. Este fenómeno puede ser debido a que la continuidad de la savia en los vasos del xilema se hubiese roto durante el período de sequía, y que un solo riego de recuperación fuese insuficiente para que la raíz recuperase su integridad hidráulica. De hecho, Moreno y col. (199?) midieron el potencial hídrico foliar en los árboles experimentales y observaron que, tras el riego de recuperación, los potenciales foliares del árbol de secano continuaron siendo significativamente menores que los medidos en el árbol regado, a pesar de reducirse notablemente las diferencias entre ambos.

4. Conclusiones

Los resultados demuestran que la técnica de compensación de pulso de calor puede utilizarse para la determinación de la dinámica de transpiración y de absorción de agua por las raíces del olivo, así como para obtener información acerca del comportamiento hidráulico del árbol. De este trabajo se deduce también que la técnica puede usarse para la determinación, en tiempo real, de los consumos hídricos totales del árbol, teniendo en cuenta que habrá que realizar previamente un proceso de calibrado para el caso particular del olivo, así como proceder a la colocación de varios sensores en un mismo tronco, rama o raíz, con objeto de detectar posibles variaciones de flujo en función de la orientación.

5. Referencias

- FERNANDEZ J E, MORENO F, MARTIN-ARANDA J. 1993. Water status of olive trees under dry-farming and dripirrigation. *Acta Hortic.* 335: 157-164.
- COHEN Y, FUCHS M, GREEN G C. 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant Cell Environ* 4: 391-397.
- GOLDHAMER D A, DUNAI J, FERGUSON L. 1993. Water use requirements of manzanillo olives and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Hortic.* 335: 365-371.
- GRANIER A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann Sci For* 42: 193-200.
- GREEN S R, CLOTHIER B E. 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by heat-pulse technique. *J. Exp. Bot.* 39: 115-123.
- GREEN S R, CLOTHIER B E. 1991. Heat pulse measurement of sap flow in trees and vines. *Proc. Sym. Sap Flow Measure., Amer. Soc Agron., Oct 27th 1991, Denver, Colo,* pp 11-12.
- JORBA J, TAPIA L, SANT D. 1985. Photosynthesis, leaf water potential and stomatal conductance in *Olea europaea* under wet and drought conditions. *Acta Hortic.* 171: 237-246.
- MARSHALL D C. 1958. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant physiol.* 33: 385-396.
- MORENO F, FERNANDEZ J E, CLOTHIER B E, GREEN S. 199?. Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant and Soil.* En revisión.
- MORENO F, VACHAUD G, MARTIN-ARANDA J, VAUCLIN M, FERNANDEZ J E. 1988. Balance hídrico de un olivar con riego gota a gota. Resultados de cuatro años de experiencias. *Agronomie* 8: 521-537.
- NATALI S, XILOYANNIS C, ANGELINI P. 1985. Water consumptive use of olive trees (*Olea europaea*) and effect of water stress on leaf water potential and diffusive resistance. *Acta Hortic.* 171: 341-351.
- SWANSON R H, WHITFIELD D W A. 1981. A numerical analysis of heat-pulse velocity theory and practice. *J. Exp. Bot.* 32: 221-239.
- THOMPSON R G, TYREE M T, LO GULLO M A, SALLESO S. 1983. The water relations of young olive trees in a Mediterranean winter: Measurements of evaporation from leaves and water conduction in wood. *Annals Bot.* 52: 399-406.

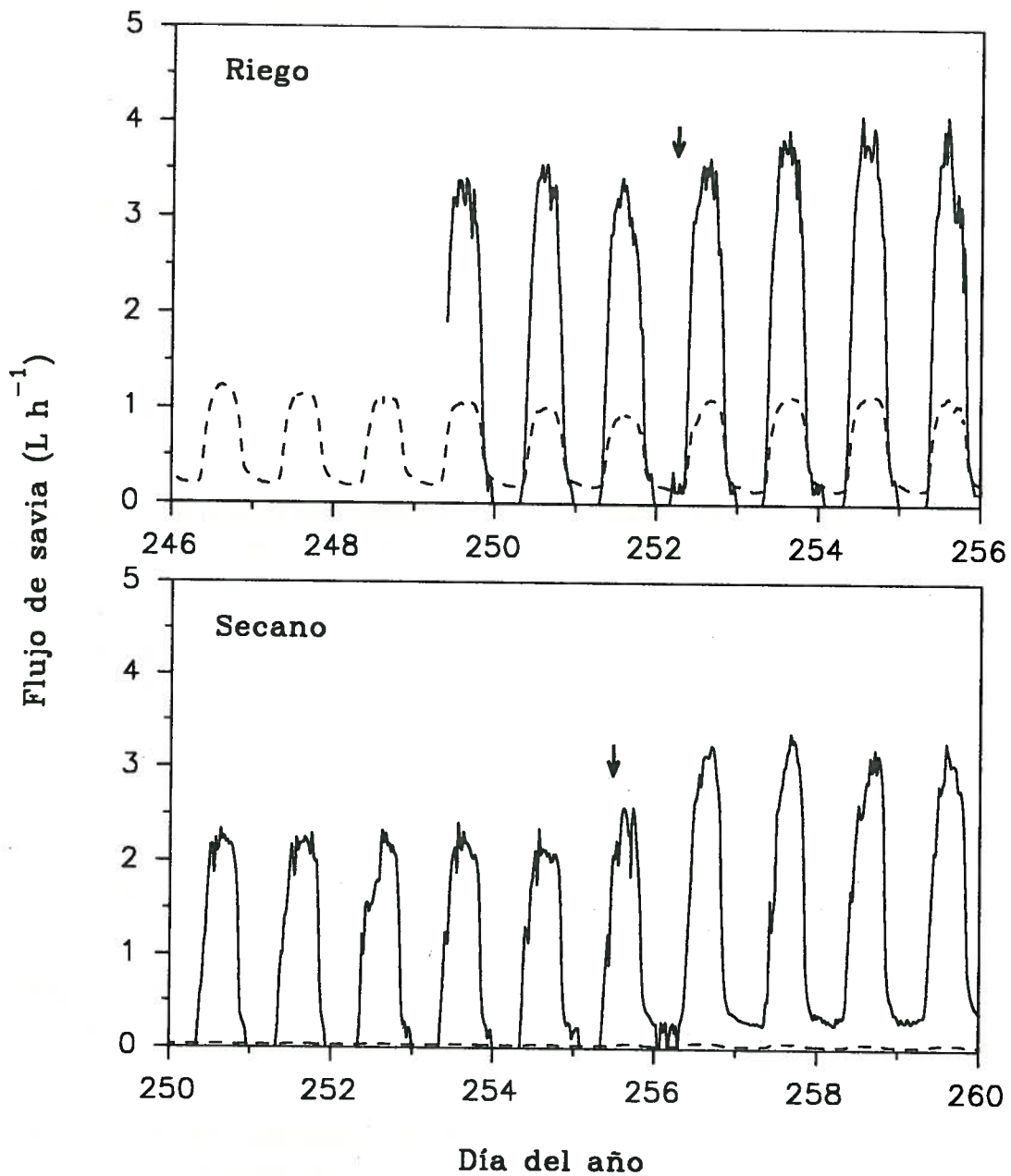


Fig. 1. Flujos de savia medidos en una rama (—) y en una raíz (---) de un árbol representativo de cada tratamiento hídrico. Las flechas indican un riego de recuperación de 730 L en el caso del árbol regado y de 870 L en el árbol de secano.

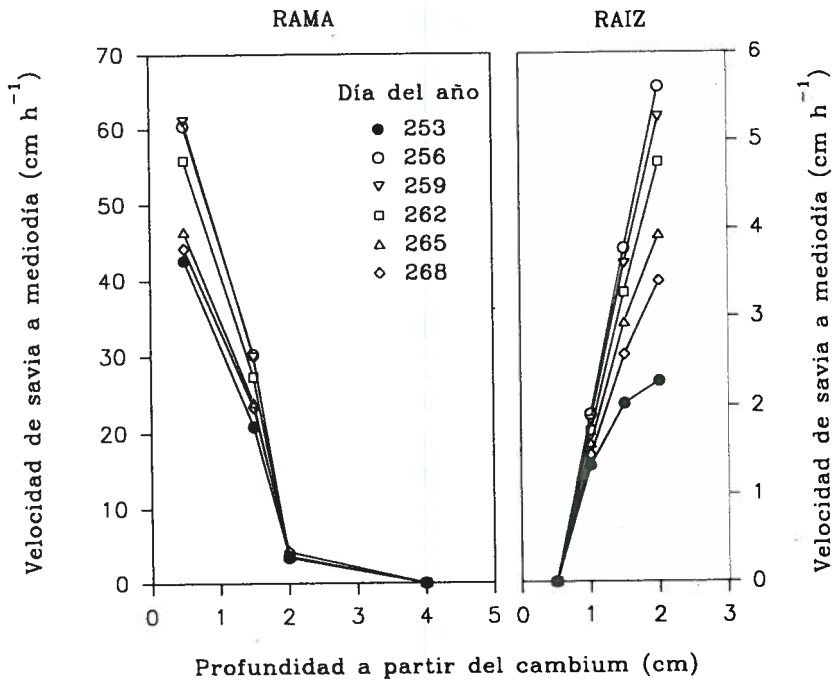
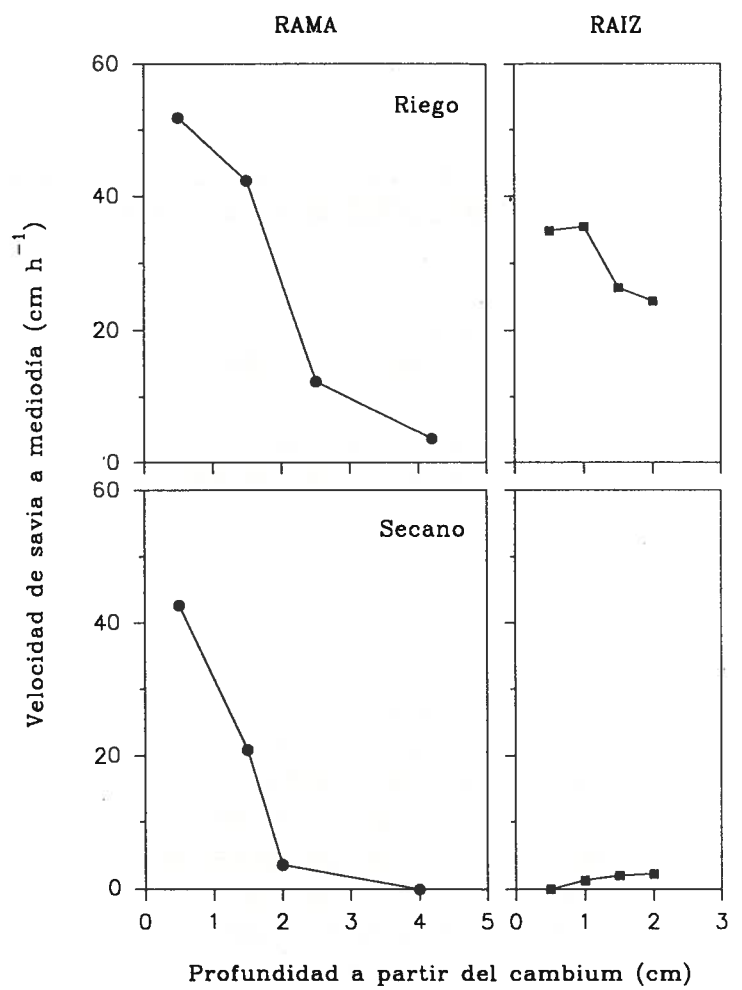


Fig. 3. Evolución de las velocidades de savia medidas a distintas profundidades por debajo del cambium en una rama y una raíz del árbol de secano, los días posteriores al riego de recuperación (riego de 870 L el día 255). Las velocidades de savia representadas son la media de los valores medidos a las 14:30 y a las 15:00 horas.

DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE DISTINTOS PERÍODOS FENOLÓGICOS A LA SUPRESIÓN DEL RIEGO EN ALBARICOQUERO.

Ruiz-Sánchez, M^a.C. (P), Sánchez-Blanco, M^a.J., Galego, R., Alarcón, J.J., Abrisqueta, J.M^a., Torrecillas, A.

Dpto. Riego y Salinidad. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC). Apartado 4195, 30080 Murcia.

Resumen

En una explotación comercial de albaricoquero (*Prunus armeniaca* L.) var. Búlida sobre patrón franco de Real Fino de 8 años de edad, cultivados sobre un suelo de textura franca en riego localizado, se aplicaron 7 tratamientos de riego, un control, regado al 100 % de la ETC (T1) y 6 tratamientos en los que se suprimió el riego en distintos períodos fenológicos: floración-cuajado (T2), primera fase de rápido crecimiento del fruto (T3), endurecimiento del hueso (T4), segunda fase de rápido crecimiento del fruto (T5), período post-recolección de Junio a mediados de Julio (T6) y post-recolección de mediados de Julio a mediados de Septiembre (T7). Los resultados mostraron una clara separación entre los procesos de crecimiento de los ramos y el del fruto, iniciándose éste cuando se ha completado el 75 % del crecimiento total del primero. El estrés hídrico aplicado durante el segundo período de rápido crecimiento del fruto (T5) condicionó claramente la producción al igual que el primer período postrecolección (T6) en el que la producción fue significativamente más baja que en el tratamiento control, debido principalmente a un menor porcentaje de fructificación y una mayor caída de frutos.

Abstract

Eight-year-old apricot (*Prunus armeniaca* L.) trees var. Búlida grafted on Real Fino apricot rootstock were cultivated on a loamy soil under drip irrigation. Trees were submitted to 7 treatments, a control treatment (T1) irrigated to 100% ETC and 6 treatments of water deprivation by withholding irrigation at different phenological stages: flowering-fruit set period (T2), first rapid fruit growth period (T3), stone hardening period (T4), the second rapid fruit growth period (T5), a post-harvest period from June to mid July (T6) and a post-harvest period from mid July to mid September (T7). The results indicated a clear separation between vegetative and fruit growth periods; fruit growth started when 75% of vegetative growth was completed. The water deficit applied during the second period of rapid fruit growth (T5) affected adversely apricot yield. Similar results were obtained in the first post-harvest period (T6), in which total yield were statistically lower than that of the control treatment mainly due to a lower fruit set and a higher fruit drop.

1. Introducción

La necesidad de racionalizar el uso del agua en agricultura ha conducido en los últimos años al desarrollo de estrategias de riego deficitario tendentes a mantener producciones y calidades adecuadas con importantes disminuciones en las dosis de riego. En este sentido, destacan las denominadas estrategias de riego deficitario controlado (RDC) basadas en reducir los aportes hídricos en aquellos períodos fenológicos en los que un déficit hídrico no afecta significativamente la producción (Chalmers *et al.*, 1981; Mitchell *et al.*, 1989; Sánchez-Blanco y Torrecillas, 1995).

Para la determinación de la sensibilidad de los distintos períodos fenológicos de un cultivo al déficit hídrico, se requiere la realización de ensayos experimentales en los que se procede a la supresión del riego, estudiando tanto la intensidad del déficit alcanzado como los efectos del mismo sobre la cosecha. Además debe conocerse el grado de simultaneidad entre los períodos de crecimiento vegetativo y del fruto, con objeto de conocer si se puede reducir el crecimiento de los ramos, mediante un déficit hídrico, sin condicionar el crecimiento del fruto (Sánchez-Blanco y Torrecillas, 1995).

El albaricoquero es un cultivo de gran importancia en la Región de Murcia donde alcanza una superficie de cultivo de unas 12.000 ha, lo que supone el 70% del total nacional, con una producción, que en los años 91-94 alcanzó valores medios de 120.000 t. Por otro lado, hay que señalar que no existen referencias de ensayos tendentes a conocer la respuesta de este frutal al RDC.

En consecuencia, el objetivo de este trabajo es dar a conocer los primeros resultados obtenidos en un ensayo orientado a dilucidar los períodos críticos del albaricoquero Búlida mediante la supresión del riego en distintos períodos fenológicos, así como el grado de coincidencia entre los períodos de crecimiento vegetativo y del fruto, como pasos previos a la elaboración de estrategias de RDC.

2. Material y Métodos

El ensayo se realizó durante 2 años en una explotación comercial situada en el valle del Río Mula (Murcia), en una parcela de albaricoquero (*Prunus armeniaca* L.) var. Búlida sobre patrón franco de Real Fino, de 8 años de edad y a un marco de plantación de 8x8 m. El sistema de riego fue localizado, con emisores autocompensantes de 4 l h⁻¹ a razón de 7 por árbol.

El suelo de la parcela, representativo de las áreas de cultivo de este frutal en Murcia, presentó una textura media franca con ligera tendencia a franco-arcillosa o franco-arcillo-limosa, un alto contenido de caliza activa y bajos niveles de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y sales solubles. El agua de riego, procedente de pozo, presentó una conductividad eléctrica de 0,56 dS m⁻¹.

El clima de la zona durante el período experimental (1994-1995) fue extremadamente seco, con veranos altamente calurosos. La pluviometría anual media fue inferior a los 200 mm, no incidiendo significativamente en los períodos de estrés, y la evaporación de cubeta clase A fue de 1.530 mm.

Se establecieron 7 tratamientos de riego, de los cuales uno se regó al 100%

evaporación de cubeta clase A. En cada uno de los otros 6 tratamientos se suprimió el riego en un período fenológico distinto:

- T2 - Floración-cuajado-división celular del fruto (fase I), de primeros de Febrero a primeros de Marzo.
- T3 - Primer período de crecimiento rápido del fruto (fase II), de primeros de Marzo a primeros de Abril.
- T4 - Endurecimiento del hueso (fase III), de primeros de Abril a primeros de Mayo.
- T5 - Segundo período de crecimiento rápido del fruto (fase IV), Mayo.
- T6 - Período post-recolección inicial, de primeros de Junio a mediados de Julio.
- T7- Período post-recolección posterior, de mediados de Julio a mediados de Septiembre.

La duración de estos períodos experimentó ligeras variaciones en función de la fenología del cultivo en cada año del ensayo.

Se realizaron medidas de contenido de agua en el suelo con sonda de neutrones en tubos instalados a 1,4 m de profundidad. El potencial hídrico foliar antes del alba se midió con cámara de presión siguiendo las recomendaciones de Turner (1988). El crecimiento vegetativo se evaluó en base a medidas quincenales del crecimiento longitudinal de los ramos a razón de 8 ramos por repetición. La dinámica del crecimiento del fruto se determinó a partir de medidas semanales del diámetro ecuatorial de frutos marcados sobre el árbol (20 frutos por repetición).

El cuajado y caída de frutos se evaluó en 8 ramos por repetición en los que se determinó el número de elementos florales antes de la máxima floración (mediados de Febrero) y el número de frutos tras el cuajado (primeros de Marzo) y en fecha cercana a la recolección (primeros de Mayo).

La cosecha se realizó en cuatro recolecciones entre los días 7-10 (1ª) y 24-26 (4ª) de Mayo, controlándose el peso total de frutos recolectados en los 6 árboles controlados. En una submuestra de 20 frutos por repetición se determinaron las características físicas de la cosecha.

El diseño experimental fue completamente aleatorio con 3 repeticiones de 8 árboles por repetición.

3. Resultados y Discusión.

En la figura 1 se recogen los datos de crecimiento de ramos y frutos bajo condiciones de adecuado suministro hídrico (T1). Si bien se detectó una cierta coincidencia entre ambos procesos, debe destacarse que el crecimiento de los frutos se inicia cuando ha tenido lugar el 75% del crecimiento de los ramos. Esta separación entre ambos procesos resulta conveniente en la aplicación de estrategias de RDC, ya que posibilita la reducción de los aportes hídricos durante la mayor parte del crecimiento vegetativo sin afectar al del fruto (Sánchez-Blanco y Torrecillas, 1995). Hay que destacar que la separación observada entre ambos procesos es tan favorable como la encontrada en otros frutales como peral, melocotonero (Chalmers, 1990), pistacho (Goldhamer *et al.*, 1987) y limonero (Domingo, 1994), al considerar las fases críticas más sensibles al déficit hídrico, de forma que la fase más sensible de crecimiento del fruto, como se indica más adelante, se inicia cuando se ha completado casi el 90% del crecimiento de los ramos.

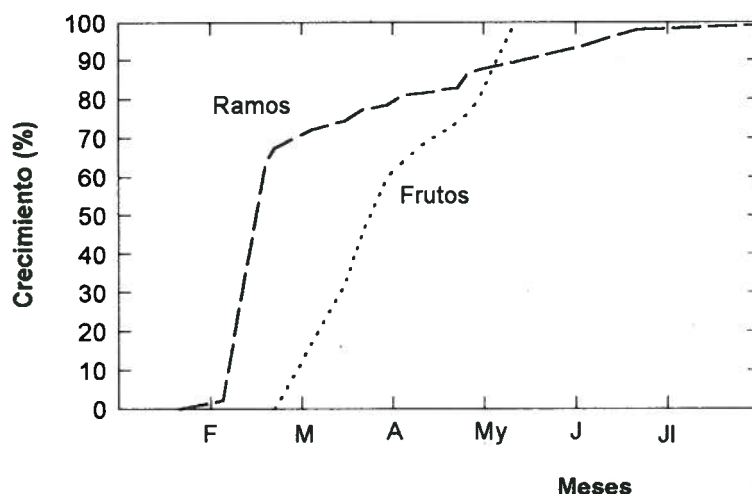


Figura 1. Evolución del crecimiento de ramos y frutos en albaricoqueros Búlida adecuadamente regados (T1).

El tratamiento control presentó niveles de agua en el suelo (0-1,40 m) bastante constantes durante todo el período experimental, oscilando entre 407,85 y 501,15 mm. Durante la supresión del riego se alcanzaron valores mínimos de 305,6 mm en el tratamiento T2, de 307,45 mm en el T3, 305,75 mm en el T4, 254,32 mm en el T3+T4 (1995), 217,37 mm en el T5, 194,20 mm en el T6 y 212,95 mm en el T7. Es de resaltar que, debido a las características texturales del suelo, tanto el agotamiento del agua en el suelo como la recarga del perfil fueron lentos.

La evaluación del estado hídrico del cultivo en base a medidas del potencial hídrico antes del alba (Tabla 1), indicó algunas diferencias entre los 2 años estudiados, los niveles de estrés alcanzados en 1995 fueron algo superiores a los de 1994, debido a la mayor aridez del clima durante el segundo año, especialmente en verano. Es de destacar que los moderados déficits hídricos alcanzados en los tratamientos T3 y T4 durante el primer año, junto a los resultados de producción que se muestran más adelante, indujeron a realizar estos tratamientos conjuntamente durante el segundo año de ensayo a fin de conseguir mayores niveles de déficit hídrico.

Los distintos efectos de la supresión del riego observados (Tabla 1), vienen a indicar su dependencia tanto de la duración como de las condiciones climáticas del período en el que tiene lugar el estrés. Este hecho se confirma en cierta medida por el comportamiento de los tratamientos T6 y T7 en los que se alcanzan niveles mucho más importantes de estrés en relación a los otros tratamientos con duraciones de 15 y 30 días superiores, respectivamente. La severidad del estrés alcanzado en el tratamiento T7 vino acompañada de claros síntomas de marchitez, enrollamiento y clorosis foliar.

Tabla 1. Valores de potencial hídrico foliar antes del alba (Ψ_h , MPa) al inicio (I) y final (F) de los períodos de supresión del riego. Los valores correspondientes a cada tratamiento y año sin ninguna letra en común son significativamente diferentes según el test de la $LSD_{0,05}$.

Trat.	1994		Trat.	1995	
	I	F		I	F
T3	-0,41 a	-0,65 b	T3 + T4	-0,42 a	-1,08 b
T4	-0,41 a	-0,68 b	T5	-0,48 a	-1,47 b
T5	-0,43 a	-1,00 b	T6	-0,59 a	-2,09 b
T6	-0,55 a	-1,52 b	T7	-0,62 a	-3,12 b
T7	-0,61 a	-2,70 b			

La dinámica de crecimiento del fruto durante 1995 en los distintos tratamientos ensayados sólo mostró diferencias significativas respecto al tratamiento control al considerar los tratamientos T3+T4 y T5, por lo que en la figura 3 sólo se presentan éstos. Los frutos bajo estrés hídrico durante la primera fase de crecimiento del fruto y endurecimiento del hueso (tratamiento T3+T4) presentaron un menor tamaño del fruto en la última fase del estrés, destacando cómo tras la reanudación del riego dichos frutos experimentaron un crecimiento compensatorio, no mostrando diferencias significativas de tamaño al final del período de crecimiento. El déficit aplicado durante la segunda fase de crecimiento del fruto (T5), provocó una menor velocidad de crecimiento, induciendo frutos de menor tamaño que los de árboles control.

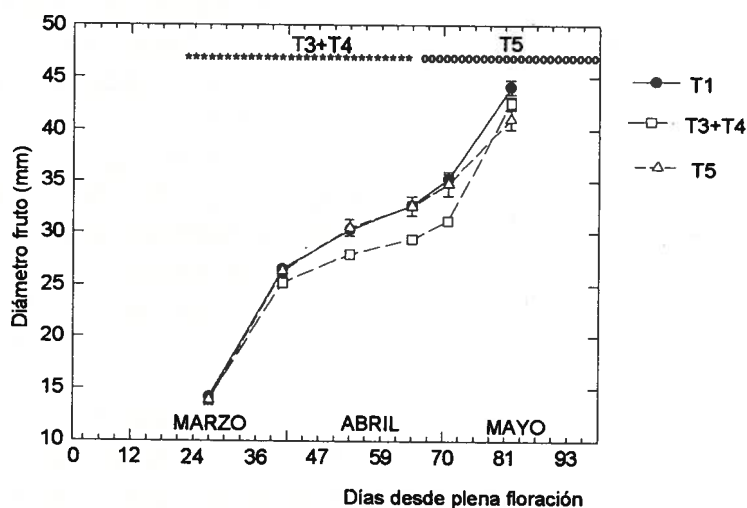


Fig. 3. Crecimiento en diámetro del albaricoque (mm) en los distintos tratamientos de riego. 1995. Los valores corresponden a la media \pm ES.

Las producciones obtenidas durante el primer año de ensayo (Tabla 2) confirman claramente como el efecto del déficit hídrico depende del momento fenológico en el que se desarrolla el estrés (Goldhamer, 1989). Los datos avalan igualmente la alta sensibilidad al déficit hídrico de la segunda fase de crecimiento rápido del fruto (tratamiento T5), tal y como ha sido descrito en otros frutales de hueso como melocotonero (Chalmers *et al.*, 1981; Li *et al.*, 1989; Ruiz-Sánchez y Girona, 1995).

Durante el segundo año de ensayo quedaron confirmados estos resultados, mostrándose además como el primer período de supresión del riego tras la recolección (T6) resulta también crítico para la producción, ya que las producciones obtenidas resultaron estadísticamente similares a las del tratamiento T5, aunque la disminución respecto al control fue menor (Tabla 2). Además, al realizar la supresión del riego durante la primera fase de crecimiento del fruto y el endurecimiento del hueso de forma conjunta (tratamiento T3+T4), el déficit hídrico desarrollado indujo una disminución en los valores absolutos de producción, aunque éstos resultaron estadísticamente similares tanto al control (T1) como al tratamiento T6, lo cual, junto con los datos del año anterior, no permite concluir definitivamente las sensibilidades de este período al estrés hídrico.

Tabla 2. Respuesta productiva (kg/árbol) del albaricoquero a los distintos tratamientos de riego. Los valores correspondientes a cada año sin ninguna letra en común son significativamente diferentes según el test de la LSD_{0,05}.

Trat.	1994	Trat.	1995
T1	168,22 a	T1	189,48 a
T2	165,61 a	T2	199,29 a
T3	138,72 ab		
T4	142,02 ab	T3 + T4	164,50 ab
T5	105,10 b	T5	106,79 c
		T6	130,00 bc
		T7	201,04 a

El análisis de los resultados obtenidos en relación al cuajado y caída de frutos pequeños (Tabla 3) indicó como la menor producción del tratamiento T6 se debió tanto a una disminución significativa del cuajado así como a una mayor caída de frutos.

Tabla 3. Niveles de cuajado y caída de frutos en los distintos tratamientos de riego. 1995. Los valores de cada columna sin ninguna letra en común son significativamente diferentes según el test de la LSD_{0,05}.

Trat	Cuajado (%)	Caída de frutos (%)
T-1	12,53 a	11,6 b
T-2	18,79 a	4,8 b
T3+T4	14,25 a	12,5 b
T5	13,59 a	10,7 b
T-6	8,25 b	29,7 a
T-7	13,79 a	13,0 b

Si bien algunos autores indican como los frutales de hueso en general, y el albaricoquero en particular, presentan una alta sensibilidad al déficit hídrico en el período postrecolección (Uriu, 1964), los resultados obtenidos indican que tras la recolección podrían distinguirse dos períodos en función de su sensibilidad al déficit hídrico. En el primero de ellos, correspondiente al tratamiento T6, los resultados confirman estas ideas dado el posible efecto del déficit hídrico sobre la inducción floral, que tiene lugar en ese período (Westwood, 1982), lo cual puede condicionar significativamente la producción del año siguiente. Sin embargo, el período correspondiente al tratamiento T7, de mayor duración y en el que se alcanzan mayores niveles de estrés hídrico, no afecta a ningún proceso relacionado con la producción del año siguiente.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que los efectos de la supresión del riego en albaricoquero dependen no sólo del momento fenológico concreto en el que se realiza, sino del nivel de estrés alcanzado como consecuencia de la demanda evaporativa del ambiente y/o duración del estrés. Además, la respuesta del cultivo resultó en líneas generales bastante parecida a la observada en otros frutales de hueso.

Los períodos más críticos a la supresión del riego parecen estar asociados a la segunda fase de rápido crecimiento del fruto (T5), así como al período inmediato a la postrecolección (T6). La situación intermedia del efecto observado al suprimir el riego durante la primera fase de rápido crecimiento del fruto y durante el endurecimiento del hueso, junto con el hecho de que sólo se dispone de un año de observaciones del comportamiento del tratamiento T6, aconsejan continuar el ensayo hasta que los comportamientos observados sean verificados.

En cualquier caso, la separación entre las fases de crecimiento de ramos y crecimiento del fruto, junto con la existencia de claros períodos no críticos para la reducción del riego, parecen indicar la viabilidad del albaricoquero Búlida para ensayos de estrategias de riego deficitario controlado.

5. Bibliografía.

- Chalmers, D.J. 1990. Control del crecimiento de la planta por regulación de los déficits de agua y la limitación de la zona de humectación. *Frut* 5: 369-365.
- Chalmers, D.H. Mitchell, P.D. y Van Heek, L. 1981. Control of peach tree density and summer pruning. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106: 307-312.
- Goldhamer, D.A. 1989. Drought Irrigation Strategies for Deciduous Orchards. Cooperative. Extensión University of California *Div. Agric. and Natural Resources*. Publ. nº 21453, 15 pp..
- Goldhamer, D.A. Phene, B.C., Beede, R., Scherlin, L., Mahan, S. y Rose, D. 1987. Effects of sustained deficit irrigation on pistachio tree performance. *Calif. Pistachio. Ind. Ann. Rep.* 1986-87, p. 61-66.
- Domingo, R. 1994. Respuesta del Limonero Fino al Riego Deficitario Controlado. Aspectos Fisiológicos. Tesis Doctoral, Universidad de Murcia, 232 pp.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Schoch, P.G. y Orlando, P. 1989. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development. *J. Hort. Sci.* 64: 541-552.
- Mitchell, P.D., Van den Ende, B., Jerie, P.H. y Chalmers, D.J. 1989. Responses of "Bartlett" pear to withholding irrigation, regulated deficit irrigation, and tree spacing. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114: 15-19.
- Ruiz Sánchez, M.C. y Girona, J., 1995. Investigaciones sobre RDC en melocotonero. En: Riego Deficitario Controlado. Fundamentos y Aplicaciones. Colección Cuadernos VALUE I. UE-Mundi Prensa, Madrid. ISBN 84-7114-590-1, p. 67-91.
- Sánchez-Blanco, M.J. y Torrecillas, A. 1995. Aspectos relacionados con la utilización de estrategias de RDC en cultivos leñosos. En: Riego Deficitario Controlado Fundamentos y Aplicaciones. Colección Cuadernos VALUE I. UE-Mundi Prensa, Madrid. ISBN 84-7114-590-1, p. 43-63.
- Uriu, K. 1964. Effect of post-harvest soil moisture depletion on subsequent yield of apricots. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 84: 93-97.
- Westwood, N.H. 1982. Fruticultura de zonas templadas. Ed. Mundi Prensa. Madrid. p. 180-190.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Ing. Téc. T. Berenguer su ayuda en la preparación y realización del ensayo y a M.D. Velasco, J. Soto, J. Soto-Montesinos, J. Bernal y F. Durán su colaboración en la toma y elaboración de datos. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CICYT AMB95-0071.

Respuesta del limonero Fino sobre dos portainjertos diferentes al encharcamiento

Domingo¹, R.(P), Ruiz-Sánchez², M^a.C., Morales², D., Alarcón², J.J., Torrecillas^{1,2}, A.

¹Dpto. Ingeniería Aplicada, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Murcia, Paseo Alfonso XIII, 34, 30203 Cartagena, Murcia.

²Dpto. Riego y Salinidad. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CSIC). Apartado 4195, 30080 Murcia.

Resumen

Plantas de limonero Fino injertadas sobre naranjo amargo y *C. macrophylla*, de dos años de edad y cultivadas en macetas bajo condiciones de campo fueron sometidas a dos tratamientos, uno adecuadamente regado (control) y otro de inundación (8 días). Durante los primeros 4 días del período de inundación se produjo una regulación estomática (disminución de la conductancia foliar, g_l) en las plantas sobre ambos portainjertos, que a pesar del aumento en la resistencia al flujo de agua a través del suelo y la planta ($R_{(s+p)}$) contribuyó a mantener valores similares de potencial hídrico (Ψ_h) y de presión (Ψ_p) en ambos tratamientos. El continuo aumento de $R_{(s+p)}$ provocó, en los últimos días del período de inundación, la caída de Ψ_h y Ψ_p . Con la interrupción del encharcamiento los valores de Ψ_h y Ψ_p se recuperaron. Sin embargo, el aumento en $R_{(s+p)}$ y la disminución de g_l se mantuvieron durante mucho más tiempo. La posterior recuperación de g_l en las plantas sobre *C. macrophylla*, una vez alcanzados niveles de O_2 similares a los controles, podría explicar el mayor efecto inhibitorio del crecimiento vegetativo observado en las plantas inundadas injertadas sobre este patrón.

Abstract

Potted two-year-old Fino lemon plants grafted on two different rootstocks: sour orange and *C. macrophylla* were submitted to two different treatments: non flooded (control) and flooded for 8 days, under field conditions. During the four first days of the flooding period a stomatal regulation (leaf conductance (g_l) decrease) was observed in flooded plants of both rootstocks, instead of the increase in resistance of plant plus soil ($R_{(p+s)}$) values. This fact allowed to the maintenance of leaf water potential (Ψ_l) and turgor pressure potential (Ψ_p) values in flooded plants at values similar to those of the control plants. The decrease in Ψ_l and Ψ_p values, observed in the last part of the flooding period, in both flooded rootstocks, can be related to the increase in the resistance to water flow. After flooding was discontinued Ψ_l and Ψ_p recovered, whereas the $R_{(p+s)}$ increase and g_l decrease remained longer. The later g_l recovery in plants grafted on *C. macrophylla* could explain the inhibitory effect of flooding on vegetative growth in these plants.

1. Introducción

El limonero Fino es una variedad autóctona murciana, en ella y en la variedad Verna se basa la producción española de limón. La aridez del clima de la Región de Murcia no está exenta de las ocasionales lluvias torrenciales de primavera y otoño con los consiguientes efectos perjudiciales en plantaciones sobre suelos con insuficiente drenaje. Uno de los primeros efectos del anegamiento del suelo en la fisiología de las plantas cultivadas, consecuencia de la disminución de oxígeno, es la reducción de la permeabilidad radical y por tanto de la absorción de agua (Bradford y Yang, 1981). Otros efectos derivados de ello, y de sintomatología muy similar a los originados por sequía, son el cierre estomático, los cambios en el estado hídrico, la reducción de la tasa fotosintética (Vu y Yelenosky, 1991), epinastias y abscisiones foliares, clorosis, necrosis y reducciones en el crecimiento (Kozłowski, 1984).

Según Ortiz y García-Lidón (1982) y Bender (1987), los cítricos injertados sobre naranjo amargo toleran mejor el encharcamiento que cuando están injertados sobre *C. macrophylla*. Sin embargo, estos estudios no abordan los mecanismos desarrollados por estas plantas para afrontar el estrés.

2. Material y Métodos

El ensayo se realizó en plantas de limonero Fino (*Citrus limon* (L.) Burm. fil.) de 2 años de edad injertadas en dos portainjertos diferentes: naranjo amargo (*C. aurantium* L.) y *C. macrophylla*, cultivadas en contenedores de 35 l con un suelo de textura franco arcillosa al que se añadió un 10 % de compost, en condiciones de campo.

20 plantas de cada portainjerto fueron sometidas a dos tratamientos: un control regado diariamente por goteo, en el que se mantuvo el potencial matricial del suelo entre -15 y -30 kPa, y otro de inundación que consistió en la sumersión de las plantas con sus contenedores en balsas llenas de agua, permaneciendo el nivel del agua 4 cm por encima de la superficie del suelo, durante ocho días. Después de este período, las plantas fueron sacadas y puestas a drenar libremente, tres días después se colocaron en idénticas condiciones que las plantas control, estudiándose la recuperación durante 43 días.

Con intervalos de 1 a 3 días durante el período de inundación y de 5 a 6 días durante el de recuperación, se controlaron los siguientes parámetros: contenido de oxígeno en la solución del suelo, con un oxímetro YS1 mod. 58, en muestras reunidas en el interior de las sondas de succión; potencial hídrico foliar (Ψ_h) a mediodía, con cámara de presión, en 2 hojas soleadas por árbol y 4 árboles por tratamiento; conductancia (g) y transpiración foliares (TR) a mediodía con porómetro de estado estacionario, en un número de hojas similar a Ψ_h ; potencial osmótico (Ψ_o), en las mismas hojas utilizadas para Ψ_h , tras su congelación en nitrógeno líquido y extraer la savia después de la descongelación (Slavick, 1974), utilizando un microvoltímetro de punto de rocío HR-33T conectado a una cámara C-52 (Wescor); potencial de presión (Ψ_p), calculado por diferencia entre Ψ_h y Ψ_o ; la resistencia al flujo de agua a través del suelo y la planta ($R_{(s+p)}$) se calculó de

acuerdo con Sands y Theodorou (1978) mediante la ecuación: $R_{(s+p)} = -\Psi_h / TR$, al ser el potencial matricial cero en el tratamiento de inundación y cercano a cero en las plantas control (Savé y Serrano, 1986). El crecimiento vegetativo fue determinado en base a medidas de crecimiento longitudinal de 4 ramos por árbol en 4 árboles por tratamiento y portainjerto.

3. Resultados y Discusión

La evolución del contenido de oxígeno en la disolución del suelo fue similar para ambos portainjertos. En las plantas control el oxígeno se mantuvo entre 0,19 y 0,25 mmol l⁻¹ durante todo el ensayo. Desde el principio del período de estrés se produjo una drástica disminución del contenido de oxígeno, alcanzando valores del 50% en las primeras 24 h. A partir del segundo día, y hasta el final del período de estrés, los niveles de oxígeno en la disolución del suelo permanecieron constantes ($\approx 0,06$ mmol l⁻¹), precisando unos 16 días para recuperar los valores del control, una vez finalizado el período de estrés.

El crecimiento de los ramos fue mayor en las plantas control sobre *C. macrophylla* que sobre naranjo amargo, con incrementos del 73 % y 28% en relación al valor inicial, respectivamente. Este crecimiento no resultó afectado por el encharcamiento en el caso del naranjo amargo, mientras que en las plantas injertadas sobre *C. macrophylla* se produjo una reducción del 70 %.

Los niveles globales de potencial hídrico foliar (Ψ_h) fueron mayores en las plantas injertadas sobre *C. macrophylla* que sobre naranjo amargo (Fig. 1). Durante los primeros cuatro días del período de encharcamiento, Ψ_h no resultó afectado significativamente en ninguno de los portainjertos. Posteriormente, se observó una reducción en ambos portainjertos, alcanzándose valores mínimos de -1,8 MPa, lo que supuso una mayor reducción para las plantas sobre *C. macrophylla*. Las plantas sobre naranjo amargo alcanzaron niveles de Ψ_h similares a los de las plantas control a los 3 días del inicio período de recuperación, mientras que las de *C. macrophylla* necesitaron 6 días para la completa recuperación.

Durante los 4 primeros días de estrés el potencial de presión (Ψ_p) no se vió afectado por la inundación, posteriormente disminuyó alcanzando valores mínimos al final del período de estrés. La recuperación de Ψ_p fue similar a la de Ψ_h .

La conductancia foliar (g_i) presentó niveles superiores en las plantas injertadas sobre *C. macrophylla* que en las de naranjo amargo (Fig. 1). El encharcamiento provocó una progresiva disminución de g_i desde el principio al final del período de estrés, en ambos portainjertos. Durante el período de recuperación los valores de g_i se mantuvieron por debajo del control 26 días después de la recuperación de Ψ_h en las plantas sobre naranjo amargo y 41 días en las injertadas sobre *C. macrophylla*.

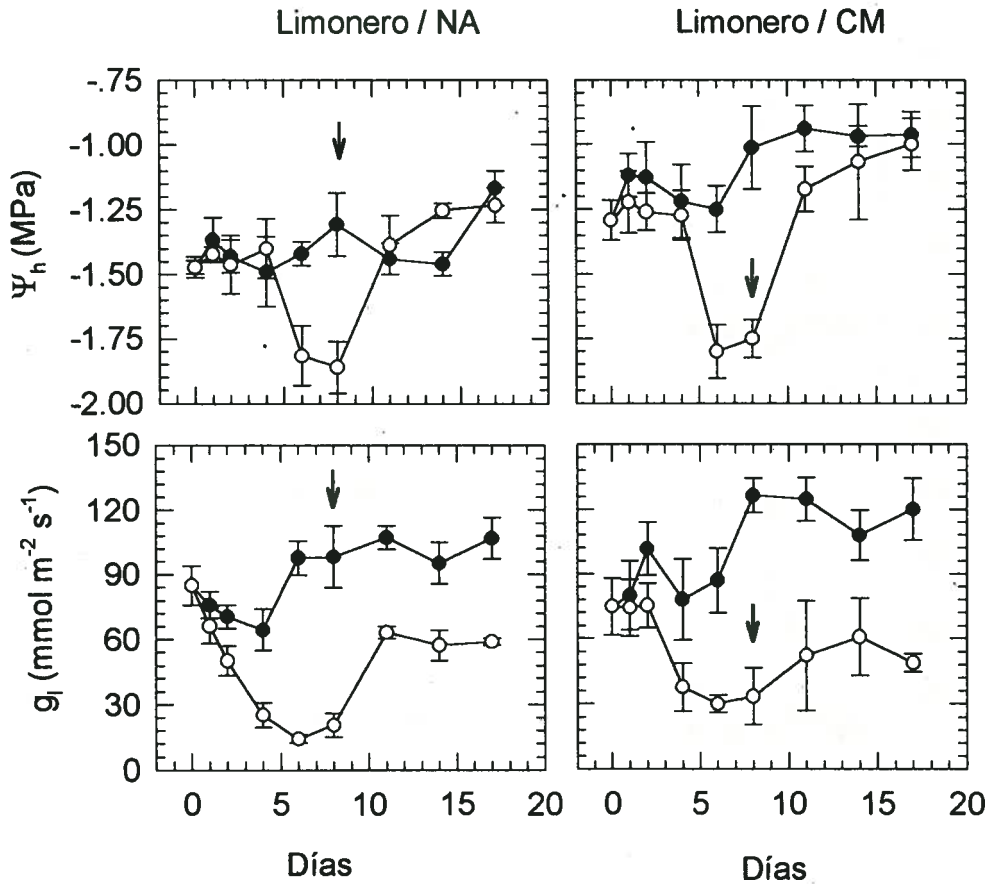


Figura 1. Evolución del potencial hídrico foliar (Ψ_h) y conductancia foliar (g_l) en plantas de limonero Fino sobre naranjo amargo (NA) y *C. macrophylla* (CM) en los tratamientos control (círculos llenos) y de inundación (círculos vacíos). Las flechas indican el final del período de estrés.

Las plantas injertadas sobre naranjo amargo presentaron, en todos los casos, una mayor resistencia al flujo del agua a través del suelo y la planta ($R_{(s+p)}$) (Fig. 2). El encharcamiento originó un incremento en $R_{(s+p)}$, el cual fué significativo después del segundo día de estrés en las plantas sobre ambos portainjertos. Durante el período de recuperación, los valores de $R_{(s+p)}$ en las plantas inundadas fueron superiores a los de las plantas control durante 29 y 43 días para el naranjo amargo y *C. macrophylla*, respectivamente. La completa recuperación de $R_{(s+p)}$ sucedió antes en las plantas sobre naranjo amargo que sobre *C. macrophylla*, coincidiendo con la de g_l .

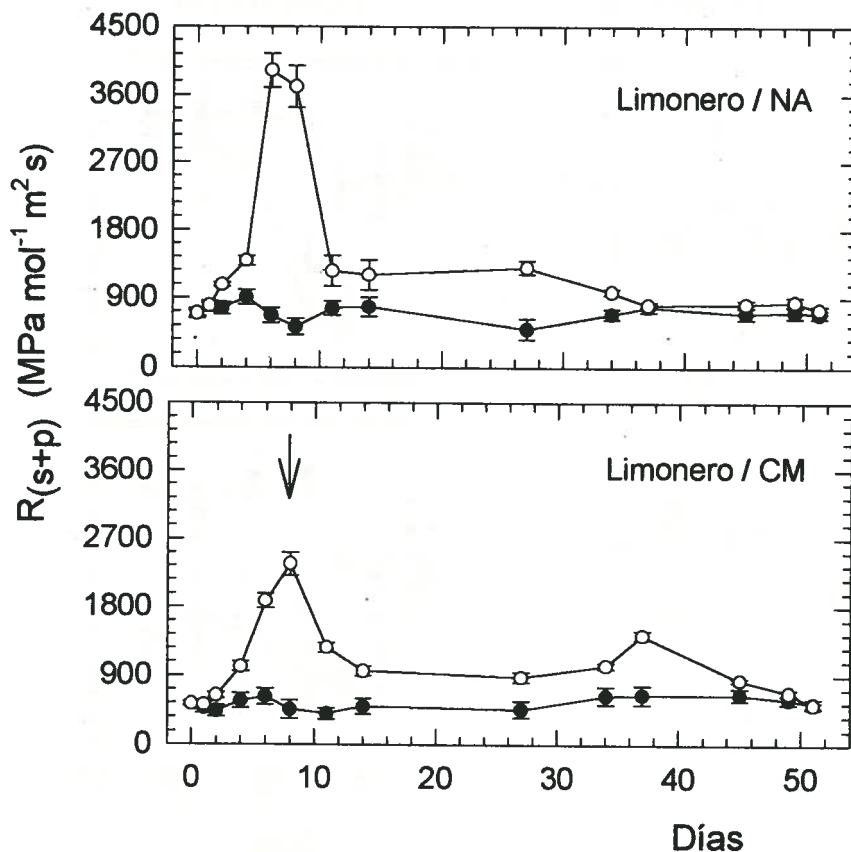


Figura 2. Evolución de la resistencia al flujo del agua a través del suelo y la planta ($R_{(s+p)}$) en plantas de limonero Fino sobre naranjo amargo (NA) y *C. macrophylla* (CM) en los tratamientos control (círculos llenos) y de inundación (círculos vacíos). La flecha indica el final del período de estrés.

Estos resultados indican que la respuesta estomática de las plantas de limonero Fino al estrés por inundación puede presentar dos situaciones diferenciables. En los primeros 4 días de estrés y durante el período de recuperación, la regulación estomática evita la deshidratación de los tejidos foliares (Bradford y Hsiao, 1982), a pesar de los altos valores de resistencia al flujo del agua (Savé y Serrano, 1986). En consecuencia, en el primer caso (0-4 días), la reducción de g_i puede venir mediada por el bajo nivel de O_2 en la disolución del suelo y el incremento en la concentración foliar de CO_2 , o bien por efecto de señales químicas desde las raíces (Kawase, 1981; Bradford y Yang, 1981; Savé y Serrano, 1986). Durante el período de recuperación, cuando los niveles de O_2 han sido recuperados, sólo cabe pensar en la última causa señalada.

En la última fase del período de estrés (4-8 días) parece operar una situación diferente ya que los máximos valores de $R_{(s+p)}$ podrían ser los responsables de la disminución de Ψ_h y Ψ_p . Los mínimos valores de g_i observados en esta fase podrían ser producidos por la deshidratación foliar (Sánchez-Blanco et al., 1994) y/o las causas implicadas en la primera situación descrita.

La respuesta estomática observada en éste ensayo, junto con su alta sensibilidad al encharcamiento, sugiere que la porimetría es un indicador válido en el diagnóstico de las alteraciones causadas por el encharcamiento en limonero.

El efecto más permanente de la inundación en las plantas injertadas sobre *C. macrophylla*, detectado fundamentalmente por la más lenta recuperación de g_i tras el período de estrés, podría indicar un menor nivel de fotosíntesis y por tanto un mayor efecto inhibitor sobre el crecimiento vegetativo de estas plantas (Zaerr, 1983; Grant y Ryugo, 1984).

4. Conclusiones

Los resultados expuestos indican que las plantas de limonero Fino injertadas sobre *C. macrophylla* presentan una mayor sensibilidad al estrés por inundación que las injertadas sobre naranjo amargo. Hecho a tener en cuenta en áreas de cultivo con suelos pesados donde puedan acontecer ocasionales lluvias torrenciales. Estos resultados abogan por la correcta programación del riego, a fin de evitar situaciones de axfisia radical prolongada en este tipo de plantas.

5. Bibliografía.

- BENDER, G.S. (1987). A look at citrus rootstocks. *California Growers (USA)*, **11**, 9-20.
- BRADFORD, K.J. y HSIAO, T.C. (1982). Stomatal behaviour and water relations of waterlogged tomato plants. *Plant Physiology*, **70**, 1508-1513.
- BRADFORD, K.J. y YANG, S.F. (1981). Physiological responses of plants to waterlogging. *Journal of Horticultural Science*, **16**, 25-30.
- GRANT, J.A. y RYUGO, K. (1984). Influence of within-canopy shading on net photosynthetic rate, stomatal conductance and chlorophyll content of kiwifruit leaves. *HortScience*, **19**, 834-836.
- KAWASE, M. (1981). Anatomical and morphological adaptation of plants to waterlogging. *Journal of Horticultural Science*, **16**, 30-34.
- KOZLOWSKI, T.T. (1984). Responses of woody plants to flooding. In: *Flooding and Plant Growth*. (Kozlowski, T.T. Ed.) Academic Press, New York, USA, 123-164.
- ORTIZ, J.M. y GARCIA-LIDON, A. (1982). Portainjertos de limonero. *Comunicaciones INIA. Serie: Producción Vegetal*, **47**, 18 pp.
- SANCHEZ-BLANCO, M.J., ALARCON, J.J., PLANES, J. y TORRECILLAS, A. (1994). Differential flood stress resistance of two almond cultivars based on survival, growth and water relations as stress indicators. *Journal of Horticultural Science*, **69**, 947-953.

- SANDS, R. y THEODOROU, C. (1978). Water uptake by mycorrhizal roots of radiata pine seedlings. *Australian Journal Plant Physiology*, **5**, 301-309.
- SAVE, R. y SERRANO, L. (1986). Some physiological and growth responses of kiwi fruit (*Actinidia chinensis*) to flooding. *Physiologia Plantarum*, **66**, 75-78.
- SLAVIK, B. (1974). *Methods of studying plant water relations*. Academic Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Prague, Springer Verlag, Berlin.
- VU, J.C.V. y YELENOSKY, G. (1991). Photosynthetic responses of citrus trees to flooding. *Physiologia Plantarum*, **81**, 7-14.
- ZAERR, J.B. (1983). Short-term flooding and net photosynthesis in seedlings of three conifers. *Forest Science*, **29**, 121-148.

Agradecimientos: Los autores agradecen su colaboración a M.D. Velasco, M. García, J. Segura, J. Soto-Montesinos. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CICYT AMB95-0071.

RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO EN CLEMENTINA DE NULES

González-Altozano, P (P) y Castel, Juan R.

RESUMEN

Se realizó un experimento de riego deficitario controlado (RDC) durante 1995 en una parcela sita en Moncada de Clementina de Nules/Citrango carrizo de 10 años de edad regada por goteo.

Los tratamientos consistieron en riego sin limitación durante todo el año en el control y reducción del riego al 25 % o al 50 % de la evapotranspiración de un lisímetro de pesada (ET_{lis}) durante los periodos : I) 21 marzo a 3 de julio (Floración-cuajado); II) 4 de julio a 7 de agosto (Crecimiento rápido del fruto); III) 8 de agosto hasta mediados de enero de 1996 (Crecimiento final y maduración). El tratamiento 50 %-Año se regó con el 50 % ET_{lis} durante todo el año.

Los efectos de los tratamientos sobre la producción y calidad de los frutos se discuten en relación al estrés hídrico producido (potencial del agua en la hoja al amanecer y a mediodía, así como su integral en el tiempo). Los resultados muestran grandes diferencias de sensibilidad al estrés según el periodo, siendo la fase de floración-cuajado la más crítica y la de menos efecto la de crecimiento inicial del fruto.

Los principales efectos producidos por el estrés hídrico en cada uno de los periodos estudiados fueron:

En primavera: se produjo una merma importante de la producción por reducción del nº de frutos por árbol. El tamaño final de estos fue igual o mayor que en el control.

En otoño: hubo una clara disminución del tamaño del fruto e incidencia sobre la calidad del mismo, con la consiguiente pérdida de valor comercial.

En verano: no afectó ni la producción, ni el tamaño, ni la calidad de la fruta. Este es el periodo en que el RDC es más prometedor.

ABSTRACT

An experiment on Regulated Deficit Irrigation (RDI) was performed during 1995 in an orchard of 10 year old, drip-irrigated Clementina de Nules/ Carrizo Citrange located in Moncada (Valencia).

Treatments consisted in irrigation without restriction during the whole year in the Control and reductions to 25 % or to 50 % of crop evapotranspiration measured in a weighing lysimeter (ET_{lis}) during the periods : I) 21 March to 3 July (Flowering-Fruit Set); II) 4 July to 7 August (Fast Fruit Growth Phase), and III) 8 August to mid-January 1996 (Phases of Final Fruit Growth and Maturation). An additional treatment denominated 50 %-Year was irrigated at 50 % ET_{lis} during the whole year.

The effects of the treatments on yield and fruit quality are discussed in relation to tree water status (predawn and midday leaf water potential, as well as their integral with time). Results show large differences of sensitivity to water stress according to the phenological phase. The more critical period was the Flowering and Fruit Set phases and the initial stages of fruit growth that of less effect.

The main treatment effects during each period were :

In spring : an important yield decrease due to reduction in the number of fruits per tree. Final fruit size was equal or higher than in the Control.

In autumn : there was a clear reduction of fruit size and lower fruit quality.

In summer : irrigation treatments did not affect yield or its components, nor fruit quality. This is the period where RDI seems more promising.

Dpto. Recursos Naturales, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias,
Apartado Oficial, 46113 Moncada (Valencia).

INTRODUCCIÓN

El riego deficitario controlado (RDC), está basado en la idea de reducir los aportes hídricos en aquellos periodos fenológicos en los que un déficit hídrico controlado no afecta sensiblemente a la producción y calidad de la cosecha y de cubrir plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo de cultivo (Mitchell et al., 1984; Chalmers et al., 1985).

Para la elaboración de estrategias de RDC es importante el conocimiento de los periodos críticos del cultivo, que son aquellas fases fenológicas en las que el desarrollo de un estrés hídrico puede condicionar de forma considerable la producción y/o la calidad de la cosecha. En cítricos, los periodos de floración y cuajado son generalmente los más críticos (Doorenbos y Kassam, 1979; Ginestar y Castel, 1996).

Otra característica importante para el éxito del RDC es la capacidad de los frutos de experimentar crecimientos compensatorios al reanudar el riego tras un déficit hídrico moderado como es el caso de los cítricos (Cohen y Goell, 1988).

El objetivo de este trabajo fue estudiar las relaciones hídricas y la respuesta de la producción y de la calidad de la fruta a tratamientos de RDC en 3 fases fenológicas en Clementina de Nules regada por goteo.

MATERIALES Y MÉTODOS

a) Características de la parcela experimental y de los tratamientos de riego

El experimento se realizó durante 1995 en una parcela de 2 ha de Clementina de Nules/Citrango carrizo de 10 años de edad, plantada a 6x3'85 m y regada por goteo con 4 emisores autocompensantes por árbol, de 4 l/h cada uno. El huerto está situado en la finca del IVIA en Moncada (Valencia).

El suelo es de textura franco-arenosa a franco-arcillo-arenosa y su profundidad efectiva está limitada a 50-60 cm por un horizonte petrocálcico parcialmente cementado. La capacidad de agua disponible es de 125 mm/m, y la densidad aparente oscila entre 1'43 y 1'55 Mg/m³. El suelo es rico en potasio, pobre en materia orgánica y fósforo y sin problemas de salinidad (C.E. del extracto de saturación 0'5 dS/m). El agua de riego tenía una C.E. media de 1'2 dS/m (a 25° C) y un contenido medio de Cloruro de 120 g/m³. El abonado aplicado por fertirrigación e igual para todos los tratamientos fue de 132-44-94 kg/ha de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente.

El diseño estadístico fue de bloques al azar con tres repeticiones de 12-18 árboles por parcela elemental en los tratamientos deficitarios y 36 en el control. Los tratamientos aplicados consistieron en i) Control, regado durante todo el año con el 125% de la evapotranspiración de un lisímetro de pesada (ET_{lis}), plantado con un árbol similar al resto y ubicado en la misma parcela (Castel, 1991), y por tanto con dosis de agua no limitante; ii) un tratamiento deficitario todo el año, regado con sólo el 50% ET_{lis}; y iii) tratamientos deficitarios en sólo un periodo, a los que se aplicó el 25 y el 50 % ET_{lis} respectivamente en una de las fases fenológicas siguientes: I) Floración-cuajado; II) Crecimiento rápido del fruto; y III) Crecimiento final y maduración. La frecuencia de riego, igual para todos los tratamientos, fue de 5, 4 y 2 días por semana en verano, primavera-otoño e invierno, respectivamente.

La duración de los periodos se basó en la fenología complementada con las medidas de potencial hídrico foliar al amanecer (ψ^a). Se consideró como final de un periodo de riego deficitario cuando se alcanzaron valores de ψ^a en los tratamientos del 25 % de -0'7 a -1'0 MPa. Estos valores límite de ψ^a se establecieron en base a resultados previos obtenidos en esta misma parcela (Ginestar y Castel, 1996).

De esta forma, la duración concreta de cada período fue: I) 21 de Marzo al 3 de Julio, que incluye las fases de floración y cuajado; II) 4 de Julio al 7 de Agosto, cuando tiene lugar la fase de rápido crecimiento del fruto; III) 8 de Agosto hasta finales de la recolección, que terminó a mediados de enero de 1996. En lo sucesivo denominaremos cada uno de los periodos como P, V y O, respectivamente. Una vez terminado cada período de riego deficitario, los tratamientos de RDC pasaron a regarse como el control.

Los datos climáticos y de evaporación de tanque E_o , se tomaron en la estación agroclimática del IVIA situada en un extremo de la parcela. El año 1995 fue seco, en especial la primavera y verano, la lluvia anual fue de 242 mm y la E_o de 1698 mm.

b) Determinaciones

Se realizaron periódicamente medidas de potencial hídrico en hojas antes del amanecer (ψ^a) y a mediodía (ψ^{md}) con una cámara de presión, siguiendo los procedimientos descritos por Turner (1981). Se utilizaron 5 hojas adultas situadas en la cara Noroeste del árbol (2 árboles por tratamiento), en cada uno de los tratamientos.

Se midió semanalmente el diámetro de 16 frutos por árbol en tres árboles por tratamiento. Ocasionalmente se determinó el volumen del fruto con lo que se pudo establecer la relación entre el diámetro ecuatorial medido y el volumen del fruto ($R^2=0.95$).

Para estudiar los efectos del riego sobre la caída de flores y frutos, se colocaron mallas de 4x2'5m debajo de los árboles a razón de 9 mallas por tratamiento y 12 mallas en los árboles control. El contenido de las mallas se recogió periódicamente y tras limpiarlo de otros materiales se pesó en fresco. Se contó el número de flores y/o frutos en alicuotas de unos 15g de peso seco y se calculó el número total por malla mediante la relación peso fresco/peso seco.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evolución del potencial hídrico en hoja al amanecer y al mediodía, así como la del volumen del fruto en los tratamientos del 25 % ET_{lis} y en los del 50% ET_{lis} en comparación al control se presenta en las figuras 1 y 2, respectivamente. Asimismo en ambas figuras se ha incluido la lluvia.

TABLA I. Efecto del riego deficitario en tres épocas del año y durante todo el año en la producción y la calidad del fruto de Clementina de Nules durante 1995.

	TRATAMIENTO DE RIEGO							
	Control	25 % - P*	50 % - P	25 % - V	50 % - V	25 % - O	50 % - O	50%-Año
Riego, mm	400	273	313	344	373	283	303	171
Ahorro relativo agua		0.32	0.22	0.14	0.07	0.29	0.24	0.67
Integ. estrés, MPa*día	52	90	69	91	57	87	66	78
Producción, kg/arb	59.0	17.4 * ^y	35.9 *	52.7	60.3	36.4 *	43.8 *	40 *
Producción relativa	1.0	0.30	0.61	0.95	1.02	0.71	0.76	0.78
Nº Frutos/árbol	717	181 *	436 *	683	738	565	595	517
Peso fruto, g	83.2	100.3 *	82.6	77.5	82.8	64.8 *	74.1 *	78.5 *
Corteza, %	24	23	22	24.8	24.4	26.2	24.6	23.5
Azúcares, °Brix	11.6	10.5	11.6	11.9	11.4	15.8	14.3 *	13.8 *
Acidez, g/l	8.4	7.5	8.4	8.8	8.3	10.9	9.7 *	10.0 *

(*) Los tratamientos consistieron en riego sin limitación durante todo el año en el control y reducción del riego al 25 % o al 50 % ET_{lis} durante el período P) 21 marzo a 3 de julio; V) 4 de julio a 7 de agosto; O) 8 de agosto hasta mediados de enero de 1996. El resto del año los árboles se regaron igual que el control. El tratamiento 50 %-Año se regó con el 50 % ET_{lis} durante todo el año.

(^y) El asterisco indica efecto significativo respecto al control, basado en contrastes ortogonales a $P < 0.05$.

Los resultados del estado hídrico junto con los de producción (tabla 1), muestran grandes diferencias de sensibilidad al estrés hídrico según la fase fenológica. Así, durante el período I, que fue poco lluvioso y con demanda evaporativa elevada ($P=29.7$ mm; $E_o=5.8$ mm/día y $ET_{lis}=1.2$ mm/día), la reducción del riego produjo una disminución paulatina de ψ^a que, como era esperable, fue más acusada en el 25%P que en el 50%P. Respecto a los valores de ψ^{md} , sólo se observaron diferencias entre el 25%P y el control. Dos semanas después de la conclusión de este período y reanudarse el riego a dosis normal, la recuperación hídrica de ambos tratamientos era total.

A pesar de que la máxima diferencia de ψ^a respecto al control fue de solo 0.4 MPa en el tratamiento del 25 % P, los efectos sobre la caída de órganos florales fueron muy acusados (Fig.3), observándose además un retraso en la caída en este tratamiento respecto a los demás. De hecho, durante la primavera la pérdida de órganos florales en este tratamiento fue incluso menor que en los restantes, pero en el momento en que se volvió a regar con dosis no limitante fue cuando la caída pasó a ser mucho mayor que en aquellos, resultando finalmente sólo un 25% del número de frutos por árbol que en el control. Aunque menos acusada y sin el retraso antes mencionado, en el tratamiento 50%P también se produjo una mayor caída de frutos que en el control. A consecuencia de ello la producción final (tabla 1) fue sólo del 31 y 61 % respecto a la del control para los niveles del 25 y 50%P respectivamente. Esta reducción se debió exclusivamente al menor número de frutos por árbol, pues el fruto, aunque creció a menor velocidad mientras duró la reducción del riego (Fig. 1B y 2B), después lo hizo más rápidamente al reanudarse el riego normal y finalmente alcanzó el mismo tamaño que en el control en el 50 %P, e incluso significativamente ($P > 0.05$) mayor en el 25%P. Otro efecto destacable de los tratamientos de RDC en primavera fue la aparición de una segunda floración a mediados de verano, más intensa cuanto menor el agua aplicada, que dio lugar a los denominados frutos de "repom", de nulo valor comercial.

En el Período II la caída de potencial hídrico respecto al control tras la reducción del riego fue mucho más rápida, presumiblemente debido a la mayor demanda evaporativa y ausencia casi total de lluvias ($P=0.7$ mm; $E_o=7.5$ mm/día y $ET_{lis}=1.7$ mm/día). Durante este período se alcanzaron en el tratamiento 25%V las máximas diferencias respecto al control de todo el año, tanto en ψ^a (0.8 MPa) como en ψ^{md} (2.0 MPa). En el tratamiento 50%V las diferencias respecto al control fueron mucho menos acusadas. Sin embargo, ni la producción, ni sus componentes (número y tamaño de los frutos) fueron afectados por la reducción del riego en este período (tabla 1). El estrés sufrido produjo una ralentización inicial del crecimiento del fruto, seguida de un crecimiento más rápido una vez restablecida la normalidad en el riego (fig. 1B y 2B), dando lugar finalmente a frutos de tamaño similar a los del control; resultados similares fueron descritos por Cohen y Goell (1988) en pomelo. Por otra parte, los parámetros de calidad del fruto: peso del fruto, corteza, azúcares y acidez tampoco difirieron de los del control (tabla 1).

Así pues el riego con el 25 y 50%V de la ET_{lis} en el período de verano permitió ahorros de agua del 7 y 14 % respectivamente sin afectar la producción, ni la calidad de los frutos.

Durante el período III, el desarrollo del estrés fue más lento, a causa, probablemente de las lluvias y de la menor demanda evaporativa ($P=199$ mm, $E_o=3.7$ mm/día, $ET_{lis}=1.5$ mm/día). Aunque los niveles de estrés hídrico alcanzados fueron solo ligeramente inferiores a los del verano (la diferencia máxima de ψ^a respecto al control fue también 0.8 MPa), la disminución del riego durante este período redujo significativamente la producción total. La merma de cosecha en este período se debió al menor tamaño de la fruta y aunque se produjo el frecuentemente observado aumento significativo de ácidos y azúcares (Shalhevet y Levy, 1990), la piel presentaba malformaciones ("clareta") en un porcentaje elevado de los frutos, lo que disminuyó su valor comercial.

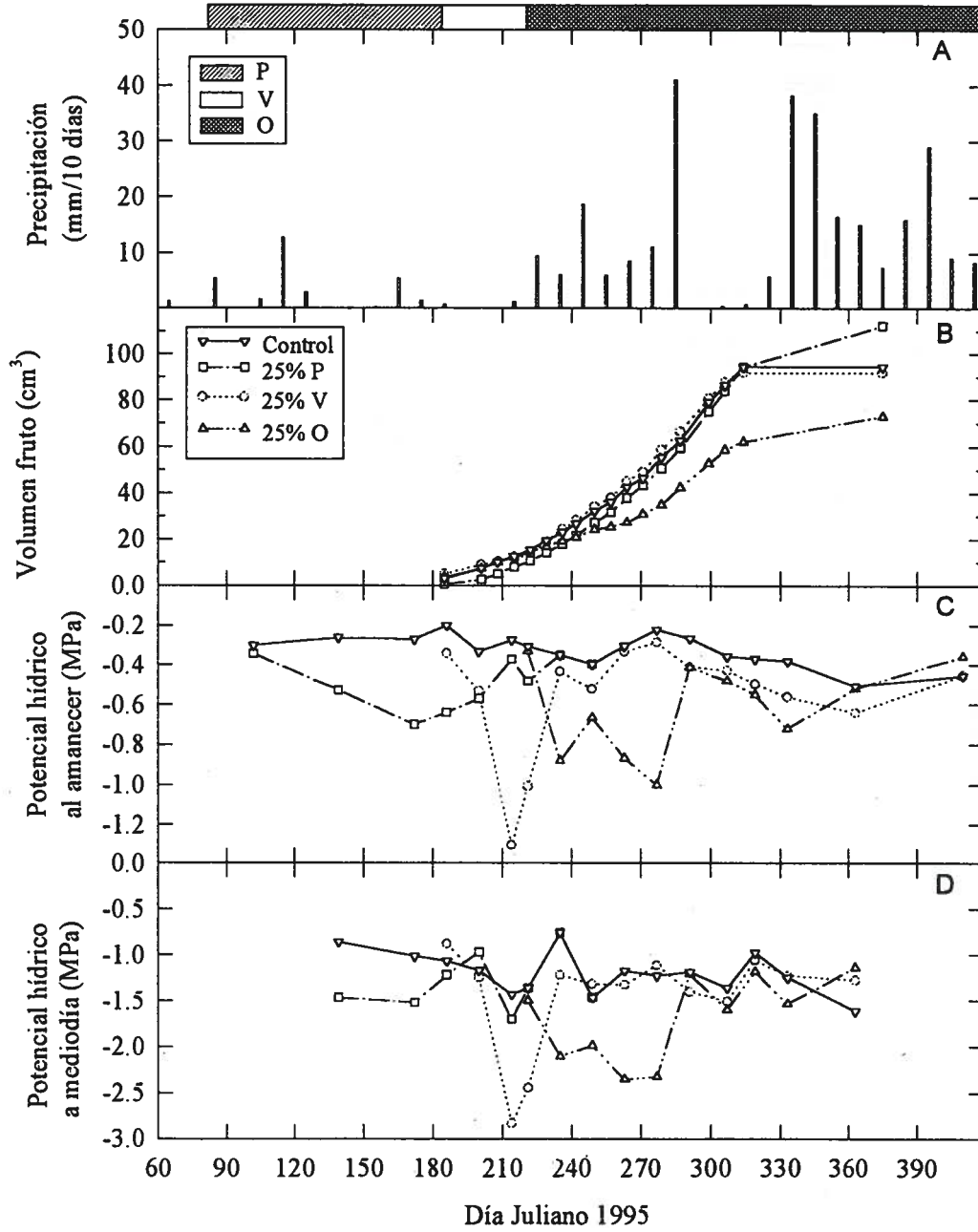


Figura 1. Evolución de B) volumen de fruto y potencial hídrico C) al amanecer, y D) a mediodía en los tratamientos del 25% de ET_{lis} y en el control. Se incluye también A) la lluvia en intervalos de 10 días.

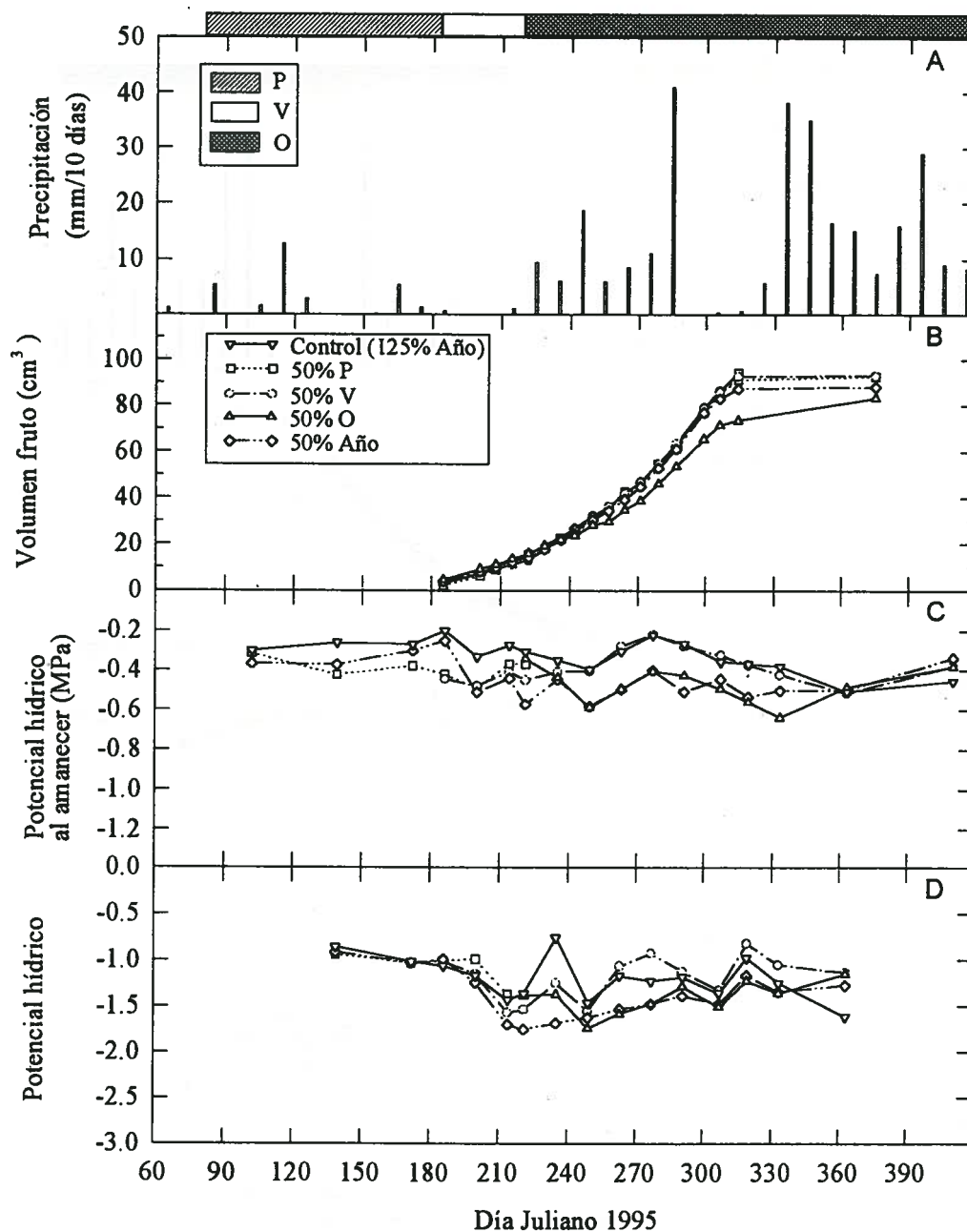


Figura 2. Evolución de B) volumen de fruto y potencial hídrico C) al amanecer, y D) a mediodía en los tratamientos del 50% de ET_{ls} y en el control. Se incluye también A) la lluvia en intervalos de 10 días.

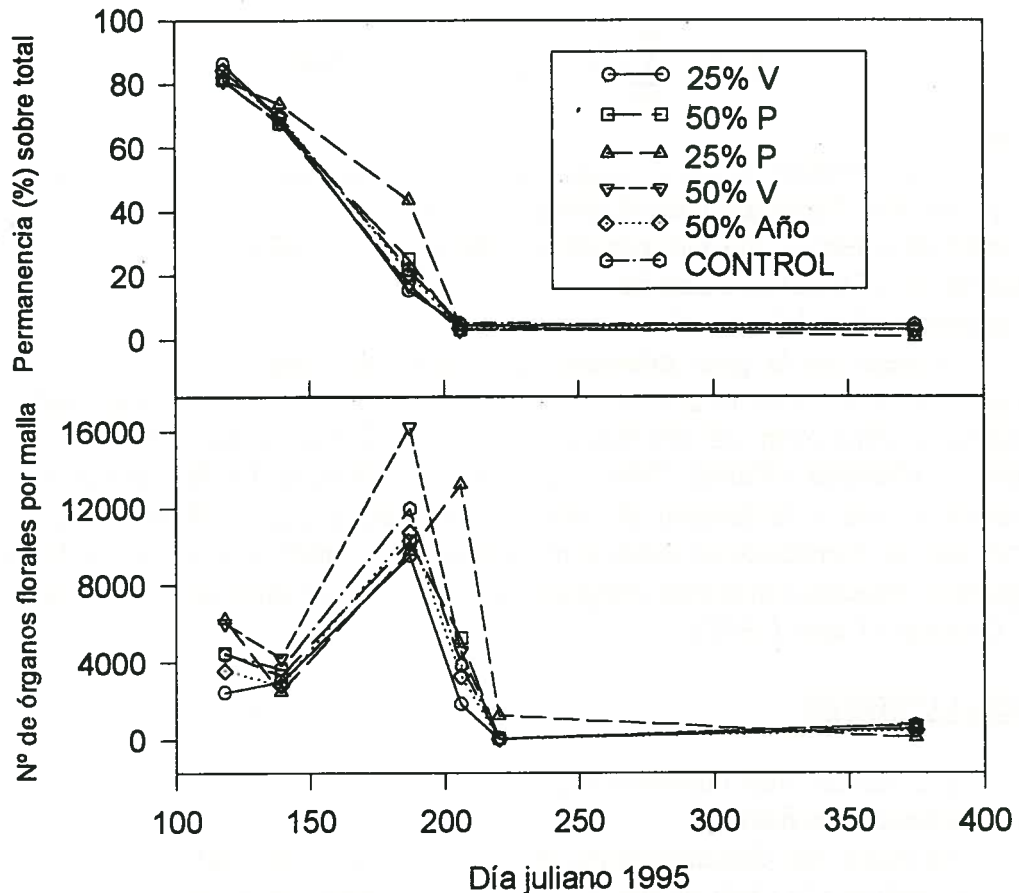


Figura 3. Evolución de la caída de frutos en los distintos tratamientos y porcentaje remanente respecto al total. Los datos son media de 9 a 12 árboles/trat. Los coeficientes de variación oscilaron entre 30 y 60%.

En los árboles del tratamiento control, regados al 125% de la ET_{lis} durante todo el año, los valores de potencial ψ^a oscilaron durante todo el tiempo alrededor de -0.3 MPa, y el valor máximo medido fue de -0.5 MPa.

En el tratamiento del 50% ET_{lis} durante todo el año, aunque también se produjo una disminución de la cosecha del 22 % respecto al control, sus efectos fueron menos acusados de lo esperable en base a la importante reducción del agua aplicada (sólo recibió el 33% del control). El poco efecto relativo de este tratamiento, que sólo afectó significativamente al tamaño del fruto, es posiblemente atribuible a fenómenos de adaptación a más largo plazo, dado que estos árboles se vienen regando deficitariamente con la misma dosis desde hace ya 5 años.

Así pues los resultados de los tres periodos de RDC, muestran que el período II parece el más adecuado para aplicar el riego deficitario, ya que tanto la producción, el tamaño final de los frutos, como la calidad de los mismos fueron similares a los del control, consiguiéndose ahorros no despreciables de agua.

Con los datos de potencial hídrico al amanecer y a mediodía se calculó la integral de estrés hídrico, $S_{\psi a}$ y $S_{\psi md}$ (Myers, 1988) mediante la expresión:

$$S_{\psi} = \left| \sum_{i=0}^{i=t} (\bar{\psi}_{i,i+1} - c)n \right| \quad (MPa * dia)$$

donde:

$\bar{\Psi}_{i,i+1}$: es el potencial medio al amanecer o a mediodía del intervalo $i,i+1$. En nuestro caso, estos intervalos fueron aproximadamente bisemanales.

c: valor de potencial máximo medido en todo el periodo de estudio, que fue de -0'2 MPa al amanecer y -0'76 MPa a mediodía.

n: número de días del intervalo.

A pesar de la gran diferencia en sensibilidad respecto al estrés observada según periodos, la producción total y la S_{ψ} estaban significativamente correlacionadas. Resultados similares se obtuvieron en este mismo huerto con niveles de estrés más severos en los años anteriores (Ginestar y Castel, 1996). La correlación obtenida fue ligeramente superior entre la producción total y la Integral de estrés a mediodía ($S_{\psi md}$) ($R^2=0'69$) que al amanecer ($R^2=0'40$). La correlación se debió al nº de frutos por árbol, pues el peso del fruto no mostró ninguna correlación con dichas Integrales de estrés, al contrario de lo observado previamente por Ginestar y Castel (1996).

CONCLUSIONES

Los efectos más importantes producidos por el estrés hídrico en cada uno de los periodos estudiados fueron:

En Primavera: disminución importante de cosecha por reducción del número de frutos por árbol debida a la caída de flores y frutitos. El tamaño final del fruto fue igual o un 25% mayor que en el control por la menor competencia entre frutos. Los efectos fueron tanto más acusados cuanto mayor fue la reducción de agua.

En Otoño: notable disminución del tamaño del fruto debido a la menor velocidad de crecimiento en las fases finales de su desarrollo. Así, al final sólo se alcanzó un 79% del tamaño del control en el tratamiento 25%O. La calidad también fue afectada con aumento de azúcares, ácidos y piel con "clareta". Esto último redujo substancialmente el valor comercial de la Clementina.

En Verano: no afectó ni la producción, ni el tamaño, ni la calidad de la fruta en ninguno de los dos niveles de reducción. Este es el periodo en que el RDC es más prometedor.

El tratamiento 50%ET_{lis} durante todo el año redujo la cosecha un 22% respecto al control, menos de lo esperable en base a la importante reducción (67%) del agua aplicada.

BIBLIOGRAFÍA

- Castel, J.R. 1991. Determinación de la evapotranspiración de cítricos mediante lisimetría de pesada. Riegos y Drenajes XXI, 56: 9-14.
- Cohen, A. y Goell, A. 1988. Fruit growth and dry matter accumulation in grapefruit during periods of water withholding and after reirrigation. Aust. J. Plant Physiol. 15: 633-639.
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. y Jerie, P.H. 1985. The relations between irrigation, growth and productivity of peach trees. Acta Hort. 173: 283-288.
- Doorenbos, J. y Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 33: 81-87.

Ginestar, C. y Castel, J.R. 1996. Response of young "Clementine" citrus trees to water stress during different phenological periods. *J. Hort. Sci.* 71(4): En prensa.

Mitchell, P.D., Jerie, P.H. y Chalmers, D.J. 1984. Effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth and yield. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 109: 604-606.

Myers, B.J. 1988. Water stress integral: a link between short-term stress and long-term growth. *Tree Physiology* 4: 315-323.

Shalhevet, J. and Levy, Y. 1990. Citrus trees. In 'Irrigation of Agricultural Crops' (B.A. Stewart and D.R. Nielsen, eds.) *Agronomy monograph* N°. 30: 951-986. ASA, Madison, Wisconsin.

Turner, N.C. 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and Soil* 58: 339-366.

EFFECTO DE UN DÉFICIT HÍDRICO CONTINUADO SOBRE PARÁMETROS PRODUCTIVOS DEL MAÍZ Y SORGO

Farré, I.¹ (P), Faci, J.M.¹

RESUMEN

El ensayo se realizó en Zaragoza el año 1995 para comparar el efecto de un déficit hídrico continuado en maíz y sorgo.

En una parcela provista de una fuente lineal de aspersión, se sembró maíz (*Zea mays* L. cv. Prisma 700) y sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench cv. Pioneer 8501). El suelo era de textura franco-arenosa (Typic Xerofluvent). Se midieron el contenido de agua en el suelo, parámetros de cultivo y rendimiento

La fuente lineal de aspersión produjo un gradiente lineal de agua aplicada, que causó un gradiente de estrés hídrico desde nulo junto a la línea de aspersión hasta severo en la parte más alejada de la misma. El régimen de riegos redujo significativamente la evapotranspiración (ET) estacional, parámetros de cultivo y el rendimiento en los dos cultivos. Las reducciones fueron mayores en maíz que en sorgo. El rendimiento del maíz fue superior al del sorgo en los tratamientos no deficitarios, mientras que el sorgo produjo más que el maíz en los tratamientos más deficitarios. Se encontró una relación lineal entre la producción de materia seca y el rendimiento en grano y la ET en los dos cultivos, con pendientes mayores en maíz que en sorgo.

ABSTRACT

This experiment was conducted in Zaragoza in 1995 to compare the effects of variable water supply on corn and sorghum.

Soil water status, crop parameters and yield were measured in a sprinkler source line plot, sown with corn (*Zea mays* L. cv. Prisma 700) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench cv. Pioneer 8501) on a loam soil (Typic Xerofluvent).

The sprinkler source line produced a continuously decreasing moisture gradient away from the water source, leading to a development of a range of water stresses from non to severe. Seasonal evapotranspiration (ET), crop parameters and yield decreased significantly on both crops as the water stress increased. Reductions were higher in corn than in sorghum. In the non stressed treatments corn outyielded sorghum. In the water stressed treatments corn yield was more affected than sorghum yield. The total dry matter production and grain yield of corn and sorghum were linearly related to the seasonal ET, being the slope of the relation higher for corn than for sorghum.

¹ Unidad de Suelos y Riegos. Servicio de Investigación Agroalimentaria (DGA). Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (CSIC-DGA), Apdo.727, 50080 Zaragoza

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es un cultivo importante en los regadíos del valle del Ebro. Es un cultivo de elevadas necesidades de agua de riego y a la vez muy sensible al estrés hídrico. Numerosos trabajos indican que dicha sensibilidad hace difícil el manejo del agua de riego en condiciones limitantes sin incurrir en importantes descensos de rendimiento (Rhoads *et al.*, 1990; Lamm *et al.*, 1994).

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es un cultivo considerado tolerante a la sequía (Krieg y Lascano, 1990) y que ocupa el mismo nicho agronómico que el maíz. El sorgo posee mecanismos de adaptación al déficit hídrico que le permiten obtener rendimientos económicos bajo condiciones de suministro insuficiente de agua. Su tolerancia a la sequía es debida a un sistema radicular muy desarrollado (Mayaki *et al.*, 1976), al ajuste osmótico (Girma y Krieg, 1992) y al control de apertura estomática (Garrity *et al.*, 1984).

Por estas razones, el sorgo podría plantearse como una alternativa interesante al maíz bajo condiciones limitantes de agua de riego. Es de gran interés, conocer la respuesta de ambos cultivos al déficit hídrico en un mismo ensayo y en las mismas condiciones ambientales, para evitar las diferencias producidas cuando se comparan estos cultivos en distintos experimentos. Hanks (1983) indicó que la transferencia de las funciones de producción de unas zonas a otras es de resultados muy dudosos.

En este trabajo se presentan los resultados de un ensayo de campo utilizando una fuente lineal de aspersión (Hanks *et al.*, 1976) con un cultivo de maíz y un cultivo de sorgo, para el estudio de la respuesta de ambos cultivos a un suministro variable de agua de riego.

MATERIAL Y MÉTODOS

El ensayo se realizó el año 1995, en una parcela de la finca experimental del Servicio de Investigación Agraria (S.I.A.) de Zaragoza, provista de una fuente lineal de aspersión (Hanks *et al.*, 1976). El suelo de la parcela era aluvial, de textura franco-arenosa (*Typic Xerofluvent*) y de una profundidad de 1,1 m a 1,5 m. El contenido de humedad volumétrico (θ) era de 28% a capacidad de campo y 9% a punto de marchitez permanente. El valor medio de densidad aparente del suelo era de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$.

La parcela experimental se dividió perpendicularmente a la fuente lineal en dos mitades, una para el maíz y otra para el sorgo. El maíz (cv. Prisma 700) y el sorgo (cv. Pioneer 8501) se sembraron el 17 y 19 de mayo respectivamente, a 0,75 m de separación, en líneas paralelas a la fuente lineal, de forma que ambos cultivos estuvieron situados a ambos lados de la fuente lineal de aspersión. La población final fue de 82.000 plantas ha^{-1} en el maíz y 176.000 plantas ha^{-1} en el sorgo. El abonado y labores culturales se realizaron según las prácticas habituales en la zona.

Los tratamientos de riego fueron impuestos mediante una fuente lineal de aspersión con 13 aspersores equidistantes 6 m. Los aspersores (VYR 70), provistos de dos boquillas (4,2 mm y 2,4 mm de diámetro) funcionaron a una presión de 0,4 MPa y produjeron un radio mojado de 15 m aproximadamente.

Para el establecimiento de los tratamientos de riego, en los dos cultivos y a ambos lados de la línea de aspersión, se eligieron seis puntos a equidistancias de 2,25 m. La denominación de los tratamientos (T-1 a T-6) se efectuó de mayor a menor cantidad de agua aplicada.

Los riegos fueron de corta duración con el fin de evitar la escorrentía superficial y efectuados con vientos inferiores a 2 m s^{-1} . En total se dieron 27 riegos, de manera que el

agua aplicada al tratamiento más próximo a la línea de aspersión fuese equivalente a la evapotranspiración (ET) del cultivo de sorgo, estimada a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o) medida en un lisímetro de pesada y los coeficientes de cultivo (K_c) de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977). Los riegos se efectuaron a la vez para los dos cultivos. La cantidad de agua aplicada en cada tratamiento se midió después de cada riego mediante dos filas de 12 pluviómetros.

El contenido de agua en el suelo se midió gravimétricamente al inicio y al final del ensayo, hasta 1,1 m de profundidad a intervalos de 20 cm. La ET estacional de los dos cultivos se estimó a partir del agua aplicada, la lluvia y la extracción de agua del suelo por el cultivo entre el inicio y el final de la estación de cultivo. Al realizar el balance hídrico, se asumió que la percolación y la escorrentía fueron despreciables.

En los tratamientos T-1, T-3 y T-5 del maíz y sorgo se midieron diversos parámetros del cultivo. La altura de planta, medida como la distancia entre el suelo y la base del limbo de la última hoja desarrollada, se midió en seis ocasiones durante el período de cultivo. El porcentaje de suelo sombreado (%SS) a mediodía solar, se midió con un Ceptometer (Delta T-Devices LTD, England) en 5 ocasiones. El valor del índice de área foliar (IAF) máximo se midió alrededor de floración, multiplicando la longitud de la hoja por la máxima anchura de hoja y por los coeficientes 0,75 y 0,74 para el maíz y el sorgo respectivamente (Norman y Campbell, 1991).

La evolución de la materia seca de la parte aérea se obtuvo en los tratamientos T-1, T-3 y T-5, mediante la recolección de una superficie de 1,5 m² en el maíz y 0,7 m² en el sorgo, en 3 ocasiones. Las plantas individuales fueron separadas en hojas, tallo y mazorca o panícula y secadas a 70 °C durante al menos 72 horas.

La cosecha final se realizó en todos los tratamientos, en una superficie de 6,8 m² en el maíz y 3,4 m² en el sorgo. El material se separó en parte vegetativa y grano, se secó a estufa y se determinó la producción total de materia seca de la parte aérea, el rendimiento (expresado en grano seco a estufa) y sus componentes y el índice de cosecha.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Agua de riego aplicada

La fuente lineal de aspersión produjo un gradiente lineal del agua total aplicada. Los valores máximos fueron de 551,2 mm y 521,0 mm, y los valores mínimos 98,3 mm y 97,0 mm en el maíz y el sorgo respectivamente. El agua total aplicada a ambos lados de la línea de aspersión en el maíz y en el sorgo no resultó significativamente diferente. La menor cantidad de agua de riego recogida en los pluviómetros del sorgo fue debida a la interceptación de agua por una red protectora instalada en la época de floración del sorgo para evitar los daños de los pájaros.

- Extracción de agua del suelo

La Figura 1 muestra el contenido de humedad volumétrico (θ) en el suelo a distintas profundidades al inicio y al final de la estación de cultivo en los tratamientos T-1, T-3 y T-5 del maíz y el sorgo. La extracción de agua del suelo fue relativamente pequeña en T-1, siendo en profundidad mayor en el sorgo que en el maíz. En T-3 y T-5 las extracciones de agua fueron mayores, siendo la extracción del sorgo mayor que la del maíz en todo el perfil. En todos los tratamientos el sorgo extrajo mayor cantidad de agua en profundidad que el maíz, lo que concuerda con los resultados hallados por Singh y Singh (1995) para maíz y sorgo bajo condiciones de déficit hídrico. Las diferencias en extracción de agua del

suelo entre los dos cultivos aumentaron para condiciones de mayor déficit hídrico. Esto podría ser debido a diferencias en el sistema radicular de los dos cultivos, que se acentuarían en condiciones de estrés hídrico (O'Toole y Bland, 1987).

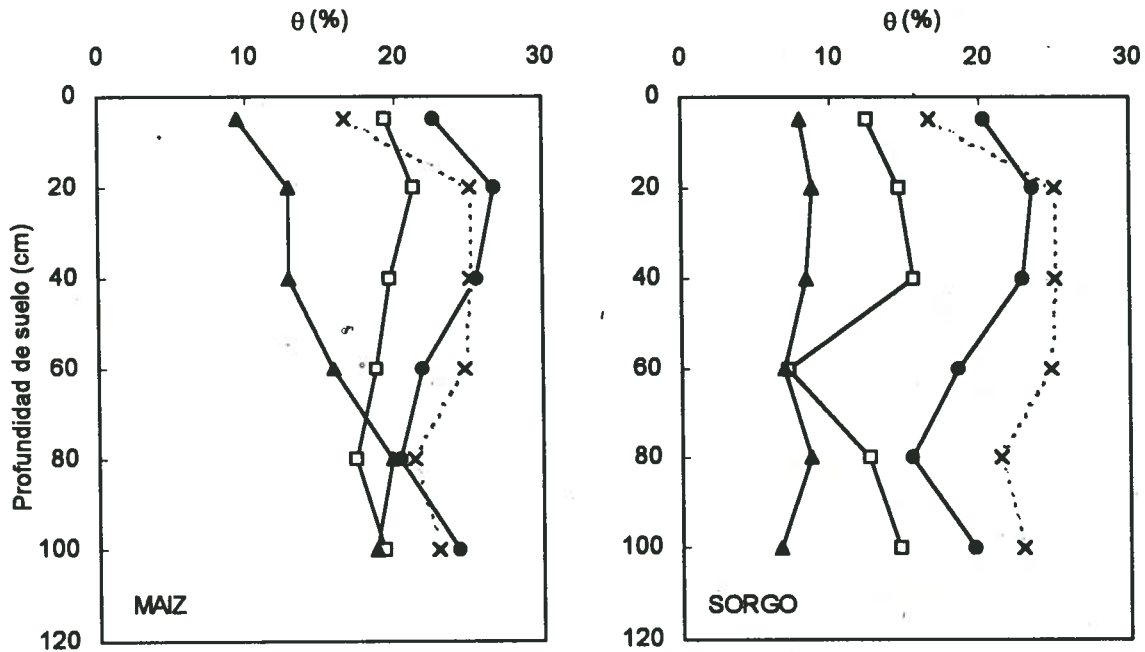


Fig. 1. Contenido de humedad volumétrico (θ ; %) en el perfil de suelo al inicio del ensayo para todos los tratamientos (-x-) y al final de la estación de cultivo en los tratamientos T-1 (●), T-3 (□) y T-5 (▲) en el maíz y el sorgo.

- Evapotranspiración

Los valores de ET estacional (Tabla 1) se estimaron a partir de la medida de los componentes del balance hídrico, sumando la extracción de agua del suelo, el riego y la lluvia registrada en el período de cultivo. La ET se vio afectada significativamente por el régimen de riegos impuesto por la fuente lineal, siendo máxima en T-1 y mínima en T-6. El gradiente de reducción de la ET fue mayor en maíz que en sorgo debido a la mayor extracción de agua por el sorgo. En ambos cultivos la ET en T-1 fue similar al agua total aplicada. Sin embargo, en los tratamientos más deficitarios el agua extraída del suelo fue un componente importante de la ET, alcanzando el 53% de la ET en el sorgo y 44% de la ET en el maíz.

Tabla 1. Componentes del balance hídrico y evapotranspiración (ET) estacional del maíz y sorgo en los distintos tratamientos de riego (mm).

Tratamiento	Lluvia	Riego		Extracción		ET	
		Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
T-1	32	551,23	520,95	-5,45	34,96	577,77	587,91
T-2	32	481,73	445,70	0,92	66,11	514,64	543,81
T-3	32	379,43	357,88	42,82	113,27	454,25	503,15
T-4	32	263,68	240,68	80,38	155,17	376,06	427,84
T-5	32	178,95	174,70	85,46	168,12	296,41	374,82
T-6	32	98,33	96,97	103,99	145,11	234,32	274,09

- Respuesta del cultivo al suministro variable de agua de riego

El crecimiento vegetativo de ambos cultivos se vio muy afectado por las reducciones de la ET. La altura de planta (Fig. 2) se vio muy afectada por los tratamientos de riego, siendo las reducciones mayores en el maíz (51%) que en el sorgo (24%).

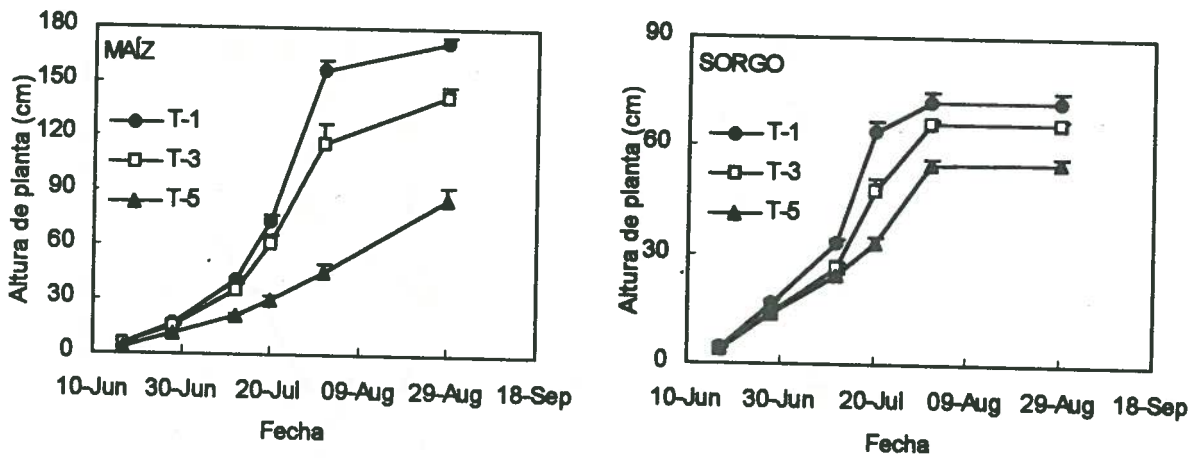


Fig. 2. Evolución de la altura de planta en los tratamientos T-1, T-3 y T-5 en el maíz y el sorgo. Cada valor es la media de 6 medidas. La longitud de la barra indica el valor del error estándar.

La evolución del suelo sombreado (Fig. 3) tuvo un comportamiento similar al de la altura de planta. La reducción de estos parámetros fue similar en ambos cultivos para niveles moderados de déficit hídrico (T-3), siendo el maíz más afectado que el sorgo para niveles de estrés hídrico severo (T-5).

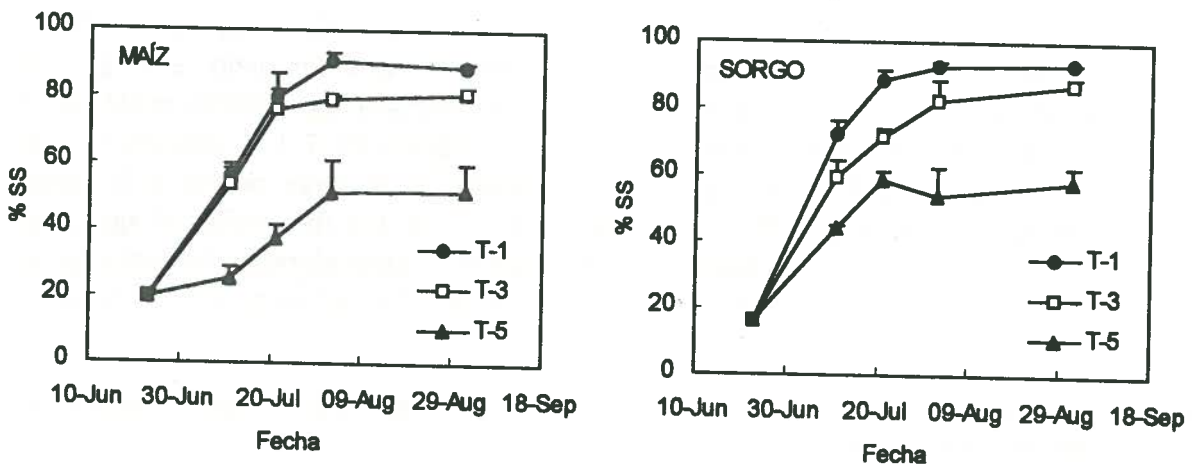


Fig. 3. Evolución del porcentaje de suelo sombreado (%SS) a mediodía solar en los tratamientos T-1, T-3 y T-5 en el maíz y el sorgo. Cada valor es la media de 4 medidas. La longitud de la barra indica el valor del error estándar.

El valor máximo de índice de área foliar (IAF_{máx}) (Tabla 2), alcanzado alrededor de floración, se vio afectado por los tratamientos de riego en los dos cultivos. En T-5 el valor de IAF_{máx} sufrió una reducción de 61% en maíz y 26% en sorgo. Singh y Singh (1995) hallaron descensos de IAF similares en maíz y sorgo sometidos a estrés hídrico.

Tabla 2. Valores medios del índice de área foliar (IAF) máximo en los tratamientos T-1, T-3 y T-5 en el maíz y el sorgo.

Tratamiento	IAF máx	
	Maíz	Sorgo
T-1	5,04	6,36
T-3	4,64	4,89
T-5	1,95	4,73

- Evolución de la materia seca aérea total

Los tratamientos de riego deficitario afectaron de forma importante a la acumulación de materia seca aérea total en ambos cultivos. Las reducciones en T-5 fueron mayores en maíz (76%) que en sorgo (52%).

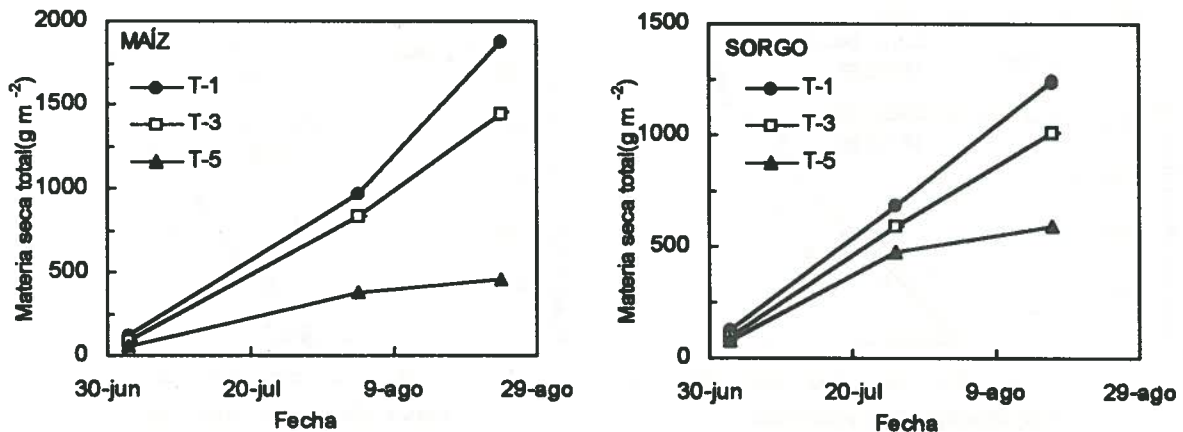


Fig. 4. Evolución de la materia seca aérea total en los tratamientos T-1, T-3 y T-5 en el maíz y el sorgo.

- Producción de materia seca y rendimiento

La producción de materia seca de la parte aérea y el rendimiento en grano resultaron muy afectados por los tratamientos de riego (Tabla 3) en los dos cultivos. La producción de maíz fue superior a la del sorgo en los tratamientos más regados (T-1 y T-2). Los tratamientos de riego produjeron descensos de producción mayores en el maíz, siendo la producción del sorgo superior a la del maíz en los niveles más deficitarios de riego (T-4, T-5 y T-6). El efecto del déficit hídrico en el maíz fue mayor en el rendimiento en grano que en la producción de materia seca, como se refleja en la disminución del índice de cosecha (IC) para todos los tratamientos deficitarios. Sin embargo, en el sorgo el IC solo se vio afectado en los niveles más severos de estrés (T-5 y T-6). Faci y Fereres (1980) encontraron reducciones de IC menores que las halladas en este trabajo, en un cultivo de sorgo sometido a estrés hídrico.

Tabla 3. Valores del rendimiento en grano, de la producción de materia seca aérea e índice de cosecha en los distintos tratamientos de riego en maíz y sorgo.

Tratamiento	Rendimiento grano ($g\ m^{-2}$)		Materia seca aérea ($g\ m^{-2}$)		IC	
	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo	Maíz	Sorgo
T-1	1082,2	853,8	2140,1	1837,7	0,51	0,49
T-2	878,8	741,8	1740,6	1638,3	0,50	0,47
T-3	480,1	629,5	1099,8	1299,8	0,43	0,46
T-4	195,1	488,5	700,3	1072,7	0,28	0,46
T-5	55,8	265,1	485,1	728,4	0,12	0,37
T-6	9,5	64,3	356,6	522,3	0,03	0,13

- Funciones de producción frente a la ET estacional

Se encontró una relación lineal con la ET estacional tanto para la producción total de materia seca como para el rendimiento en grano, en los dos cultivos (Fig. 5). Las regresiones lineales tuvieron mayores pendientes en el maíz que en el sorgo. El maíz resultó ser un cultivo con producciones superiores a las del sorgo para altos valores de ET, pero produjo menos bajo niveles de estrés hídrico severo.

En numerosos trabajos realizados en condiciones similares se han encontrado relaciones lineales entre la producción de materia seca y grano y la ET (Garrity *et al.* 1982; Cosculluela y Faci, 1992; Berenguer y Faci, 1993), pero con pendientes menores a las halladas en este trabajo.

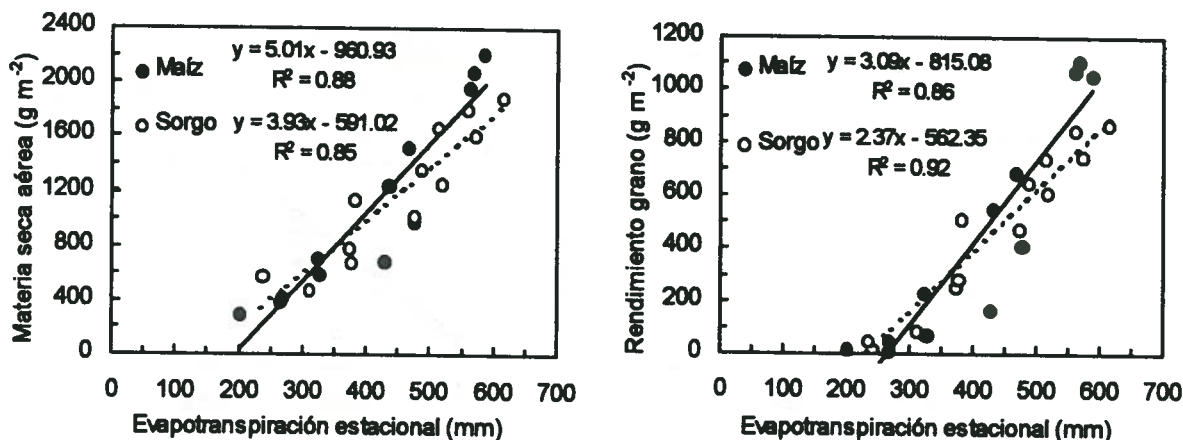


Fig. 5. Regresiones lineales de la producción total de materia seca aérea y el rendimiento en grano seco frente a la evapotranspiración estacional en el maíz y el sorgo. $n = 12$.

CONCLUSIONES

El régimen de riegos impuesto por la fuente lineal de aspersión han producido un descenso gradual de la ET, de parámetros productivos y del rendimiento en grano en el maíz y el sorgo. El maíz se ha visto más afectado que el sorgo por el déficit hídrico, llegando en los tratamientos más deficitarios a una producción nula de grano. El maíz produjo más que el sorgo bajo condiciones de riego no limitante, mientras que el sorgo fue superior al maíz bajo condiciones de estrés hídrico moderado o severo.

Se ha confirmado la existencia de una relación lineal con la ET estacional tanto para la producción de materia seca como para el rendimiento en grano en ambos cultivos, encontrándose pendientes mayores en el maíz que en el sorgo, tanto en producción de materia seca como en rendimiento en grano.

De este trabajo se deduce que, desde el punto de vista productivo y para el tipo de suelo utilizado, el sorgo podría ser una alternativa al maíz bajo condiciones de riego limitante.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) por la concesión de la beca al primer autor y al Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) por la financiación del proyecto SC93-059-06-1. Se agradece a Miguel Izquiero y Jesus Gaudó por su gran ayuda en el trabajo de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Berenguer, M.J., Faci, J.M., 1993. Efecto del riego deficitario en el rendimiento y sus componentes en un cultivo de sorgo. XI Jornadas Técnicas sobre Riegos. AERYD. Valladolid, junio de 1993, 73-81.
- Coscolluela, F., Faci, J. M., 1992. Obtención de la función de producción del maíz (*Zea mays* L.) respecto al agua mediante una fuente lineal de aspersion. Invest. Agr. Prod. Prot. Veg., 7(2), 169-194.
- Doorenbos, J., Pruitt, W. O., 1977. Crop water requirements. Irrig. and Drain. Paper 24. FAO. Rome, 144 pp.
- Faci, J. M., Fereres, E., 1980. Responses of Grain Sorghum to Variable Water Supply under Two Irrigation Frequencies. Irrig. Sci., 1, 149-159.
- Garrity, D. P., Sullivan, C. Y., Watts, D. G., 1984. Changes in Grain Sorghum Stomatal and Photosynthetic Response to Moisture Stress Across Growth Stages. Crop Sci., 24, 441-446.
- Garrity, D. P., Watts, D. G., Sullivan, Y., Gilley, J. R., 1982. Moisture deficits and grain sorghum performance: evapotranspiration-yield relationships. Agron. J., 74, 815-820.
- Girma, F.S., Krieg, D. R., 1992. Osmotic Adjustment in Sorghum. I. Mechanisms of Diurnal Osmotic Potential Changes. Plant Physiol., 99, 577-582.
- Hanks, R. J., 1983. Yield and water-use relationships: An overview. In: Limitations to efficient water use in crop production. Taylor *et al.*, (Eds.). Am. Soc. of Agron., Inc. Madison, Wisconsin, USA, 393-411.
- Hanks, R. J., Keller, J., Rasmussen, V. P., Wilson, G. D., 1976. Line Source Sprinkler for Continuous Variable Irrigation-Crop Production Studies. Soil Sci. Soc. Am. J., 40, 426-429.
- Krieg, D.R., Lascano, R.J., 1990. Sorghum. In: Irrigation of Agricultural Crops, Agronomy Monograph n° 30, 719-739.
- Lamm, F.R., Rogers, D.H., Manges, H.L., 1994. Irrigation Scheduling with Planned Soil Water Depletion. Am. Soc. of Agric. Eng., 37 (5), 1491-1497.
- Mayaki, W. C., Stone, L. R., Teare, I. D., 1976. Irrigated and Nonirrigated Soybean, Corn, and Grain Sorghum Root Systems. Agron. J., 68, 532-534.
- Norman, J.M, Campbell, G.S., 1991. Canopy structure. En: Plant Physiological Ecology. Pearcy *et al.* (Eds.). Chapman and Hall. London, 301-325.
- O'Toole, J.C. Bland, W.L., 1987. Genotypic variation in crop plant root systems. Adv. Agron., 41, 91-145.
- Rhoads, F.M., Bennett, J.M., 1990. Irrigation of Agricultural Crops, Corn. B.A. Stewart and D.R. Nielsen (Eds.). Madison, Wis, Chapter 19, 569-596.
- Singh, B.R., Singh, D.P., 1995. Agronomical and physiological responses of sorghum, maize and pearl millet to irrigation. Field Crops Research, 42, 57-67.

EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA HORARIA Y DIARIA EN EL CLIMA SEMIARIDO DE ARAGON. PRIMEROS RESULTADOS

A. Martínez Cob

RESUMEN

Este trabajo presenta los primeros resultados de la comparación entre la evapotranspiración de referencia (ET_0) horaria y diaria medida en un lisímetro de pesada (hierba) y la ET_0 determinada por dos métodos, el método FAO Penman-Monteith y el método *surface renewal*. Esta comparación se realizó en un clima semiárido de Aragón, en las cercanías de Zaragoza, en el segundo semestre de 1994. La comparación se realizó mediante análisis de regresión simple y análisis de errores. Los resultados sugieren que ambos métodos producen determinaciones aceptables de la ET_0 horaria aunque se observó una cierta dispersión y, para algunos días individuales, el rendimiento de los métodos fue relativamente pobre, de forma más acusada en el caso del método de *surface renewal*. En cuanto a los valores diarios de ET_0 , el método de FAO Penman-Monteith fue superior al método de *surface renewal*. Este último método mostró una tendencia a la subestimación (en promedio, un 8%) de la ET_0 diaria medida en lisímetro, aun cuando se observó una tendencia a la sobreestimación en los meses de otoño. En el caso del método de FAO Penman-Monteith, la pendiente de la regresión no fue significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$) y la parte sistemática del error cuadrático medio fue despreciable.

ABSTRACT

This paper reports the first results of the comparison of measured lysimeter hourly and daily reference evapotranspiration (ET_0) and the values determined by two methods, the FAO Penman-Monteith method and the surface renewal method. The comparison was performed in a semiarid climate of Aragón, next to Zaragoza, during the second semester of 1994. Simple linear regression and error analysis were used for the comparison. The determinations of hourly ET_0 by both methods were acceptable although some dispersion was observed. Nevertheless, the performance of the methods for some single days was relatively poor, particularly in the case of the surface renewal method. For daily values, the FAO Penman-Monteith method was superior. Thus, the surface renewal method underestimated daily lysimeter ET_0 by 8% on average, although some overestimation was noticed for Fall months. In the case of the Penman-Monteith method, the slope of the linear regression was not significantly different than 1 ($\alpha = 0,05$) and the systematic part of the mean square error was negligible.

Unidad de Suelos y Riegos (S.I.A.).
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (D.G.A. - C.S.I.C.)
Apartado 727 - 50080-ZARAGOZA
Correo electrónico: MACOAN@MIZAR.CSIC.ES

1. INTRODUCCION

La determinación de la evapotranspiración es fundamental para un conocimiento más adecuado del consumo de agua por los cultivos y, en definitiva, para mejorar la gestión y manejo de los recursos hídricos. Existen diversos métodos de medida y determinación de la evapotranspiración, métodos que deben ser verificados y calibrados antes de su utilización en unas condiciones climáticas determinadas.

Recientemente, en el S.I.A. de Zaragoza se ha instalado un lisímetro de pesada, para la medida de la ET_0 a escalas horaria y diaria. Este lisímetro empezó a ser operativo en 1994. Los datos de ET_0 recogidos en este lisímetro permitirán la verificación, calibración y comparación de diversas metodologías de medida indirecta y de cálculo de la ET_0 a escalas temporales pequeñas (diaria y horaria) para las condiciones climáticas semiáridas de Aragón. En este trabajo se presentan los primeros resultados obtenidos en el segundo semestre de 1994 cuando los datos lisimétricos de ET_0 horaria y diaria se compararon con los valores obtenidos con un método indirecto de medida de la ET_0 , el método de *surface renewal* (Spano et al., 1994) y un método de cálculo de la ET_0 , el método de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1994).

2. MATERIAL Y METODOS

El trabajo se efectuó en una parcela de festuca (*Festuca arundinacea* Schreber), de unos 100 m x 100 m, en cuyo centro se encuentra el lisímetro de pesada (hierba) del S.I.A. de Zaragoza. El lisímetro tiene una superficie de 6 m² y una profundidad de 1,5 m. El lisímetro empezó a ser operativo desde 1994. La célula de carga del lisímetro es capaz de registrar variaciones de peso de 0,5 kg, equivalentes a 0,08 mm de agua. En este lisímetro se registraron valores horarios y diarios de ET_0 a lo largo de 1994. Estos datos sufrieron un proceso de depuración en el que se eliminaron, total o parcialmente, los días en que se produjeron incidencias como el riego de la parcela (por aspersión), el corte de la hierba, el drenaje del lisímetro o problemas en el sistema electrónico de registro horario del peso del lisímetro.

En junio de 1994 se instalaron dos estaciones meteorológicas automáticas Campbell CR10 adyacentes al lisímetro. Una de las estaciones dispone de diversos sensores para medir la precipitación, la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, la velocidad y dirección del viento, la radiación solar global incidente y la radiación neta. Cada 30 minutos, se almacenan promedios de estas variables (para la precipitación, valores totales). Los datos registrados en esta estación se utilizaron para calcular la ET_0 cada 30 minutos mediante el método de FAO Penman-Monteith, tal como se describe en Allen et al. (1994).

En la otra estación se conectó un termopar de respuesta rápida para la medida de la temperatura del aire cada 1/8 s. Este sensor se instaló a 0,5 m de la superficie del suelo (Spano et al., 1994). Los datos registrados con este sensor se emplearon para determinar el flujo de calor sensible (H) cada 30 minutos mediante el método de *surface renewal*. Con este método, H se determina a partir de las fluctuaciones de temperatura de alta frecuencia medidas con el sensor antes mencionado. Estas fluctuaciones se caracterizarían por una serie de rampas que

se definen por tres parámetros: 1) amplitud, a ; 2) longitud, l ; y 3) separación entre rampas, s (Gao et al., 1989; Spano et al., 1994). Los detalles de la determinación de estos parámetros se pueden encontrar en Van Atta (1977). Estos parámetros se determinaron para períodos de 30 minutos y, posteriormente, se utilizaron para determinar H tal como se describe en Paw U y Brunet (1991) y Snyder y Paw U (1993). Se utilizó un factor de ponderación de 1,0 (Spano et al., 1994). Finalmente, la ET_0 cada 30 minutos se calculó resolviendo la ecuación del balance de energía, ya que la radiación neta se midió con la primera estación y el flujo de calor hacia el suelo se estimó como 10 % de la radiación neta (Allen et al., 1994). Esta estima del flujo de calor hacia el suelo se utilizó también en el caso de la ecuación de FAO Penman-Monteith. Con ambos métodos, la ET_0 horaria se determinó sumando dos valores consecutivos de ET_0 de 30 minutos. La ET_0 diaria se obtuvo sumando los valores horarios de ET_0 .

La comparación entre los valores lisimétricos (variable dependiente) y los valores de ET_0 determinados por ambos métodos (variables independientes) se realizó mediante análisis de regresión simple. Para la comparación de valores horarios se utilizaron los resultados para el período 11 de julio a 30 de septiembre de 1994. Para la comparación de valores diarios se utilizaron los resultados del período 1 de julio a 31 de octubre de 1994. Además, se realizó un análisis de las diferencias entre los valores lisimétricos y los determinados por los dos métodos. Para ello se calcularon diversos estadísticos (Willmott, 1982): a) el error absoluto medio; b) el error cuadrático medio, que, a su vez, se descompuso en una componente aleatoria y una componente sistemática; y c) el índice de similitud, que cuantifica el grado de concordancia entre los valores lisimétricos y los determinados por los dos métodos.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

La Figura 1 muestra los valores horarios de ET_0 medidos en el lisímetro y determinados por ambos métodos, FAO Penman-Monteith y *surface renewal* para cuatro fechas distintas, 12 y 26 de julio y 18 y 27 de septiembre de 1994. En términos generales, los valores de los métodos siguieron la evolución a lo largo del día de los valores lisimétricos, circunstancia que fue más evidente en el caso de las dos fechas de julio que en las de septiembre.

Las Tablas 1 y 2 resumen los resultados de los análisis de regresión simple efectuados para estas cuatro fechas y para el conjunto total de valores horarios para el período 11 de julio a 30 de septiembre. Para ambos métodos, los coeficientes de determinación fueron altos, superiores al 83 %, en las cuatro fechas estudiadas, excepto en el caso del 27 de septiembre (método de *surface renewal*). En todos los casos, las ordenadas en el origen no fueron significativamente diferentes de 0 ($\alpha = 0,05$). Las pendientes no fueron significativamente diferentes de 1 ($\alpha = 0,05$), excepto en las dos fechas de septiembre (método de *surface renewal*) y en el 18 de septiembre (método FAO Penman-Monteith). En el caso de todos los valores horarios del período de estudio, los coeficientes de determinación fueron relativamente bajos (63 a 68%), con ordenadas en el origen significativamente diferentes de 0, aun cuando las pendientes no difirieron significativamente de 1 ($\alpha = 0,05$).

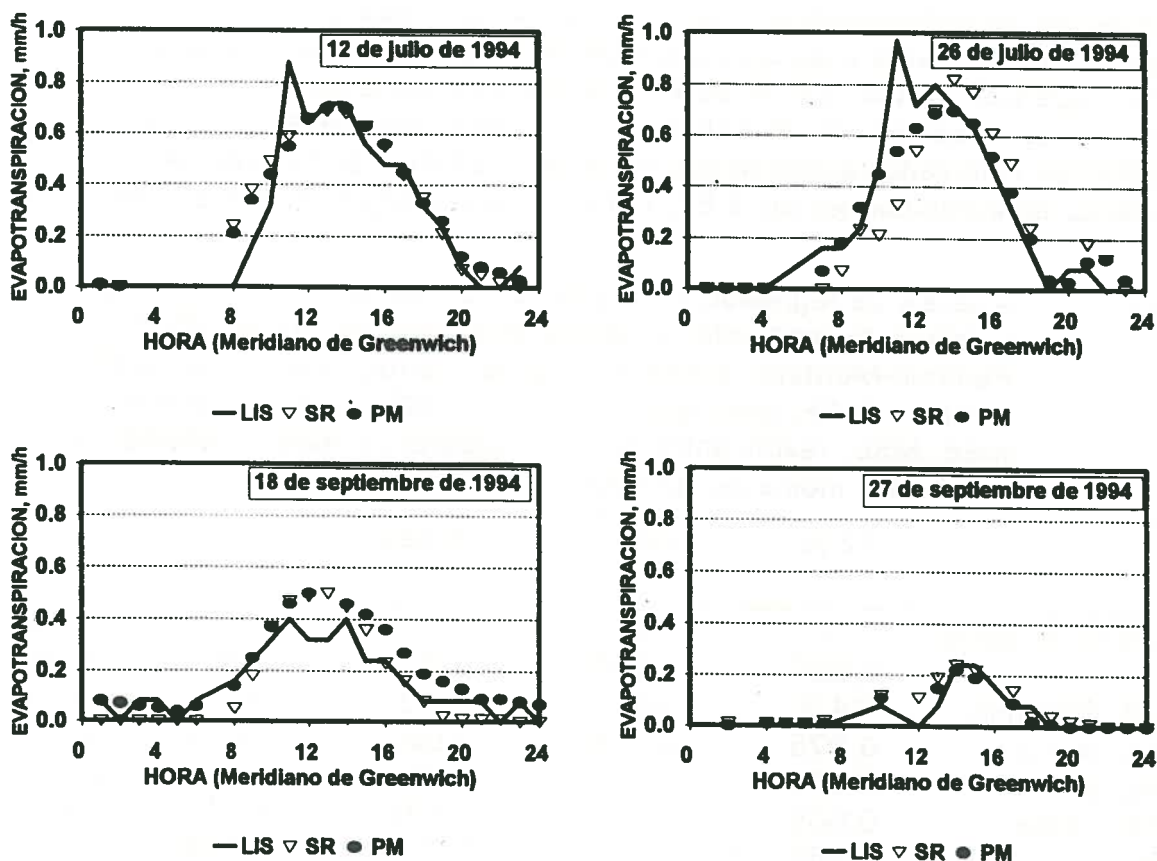


Figura 1. Valores de ET_0 horaria medida en el lisímetro (LIS) y determinada mediante los métodos de FAO Penman-Monteith (PM) y *surface renewal* (SR) en cuatro fechas distintas.

En términos generales, los índices de similitud fueron altos (superiores a 0,89), indicando una concordancia aceptable entre los valores lisimétricos de ET_0 horaria y los determinados por ambos métodos (Tablas 1 y 2). En las dos fechas de julio los índices de similitud superaron 0,95, al igual que el 27 de septiembre para el método de FAO Penman-Monteith. En el caso de las dos fechas de septiembre (método de *surface renewal*) y el 18 de septiembre (método FAO Penman-Monteith), los índices de similitud bajaron a 0,92 y en el caso de todos los datos en conjunto bajaron a 0,89-0,90. Asimismo, en términos generales, los errores absolutos medios (MAE) fueron similares en todos los casos y parecidos a la precisión del lisímetro de pesada (0,08 mm). Lo más interesante es que la parte sistemática del error cuadrático medio (MSE_s) fue despreciable en todos los casos, excepto el 18 de septiembre para ambos métodos y para el 27 de septiembre en el caso del método de *surface renewal*, en donde MSE_s fue superior al 39 % del error cuadrático total (Tablas 1 y 2).

En el caso de todos los valores horarios en su conjunto, la parte sistemática del error también fue despreciable, indicando que no existieron tendencias globales a la subestimación o a la sobreestimación en ninguno de los dos métodos. Las tendencias a la subestimación en días individuales se compensaron con la tendencia a la sobreestimación en otros días. Los relativamente pobres

coeficientes de determinación y los mayores MAE y MSE en el caso de todos los días en conjunto frente a las cuatro fechas individuales indican que se produjo una cierta dispersión de los valores de ET_0 horaria determinados por ambos métodos frente a los medidos en el lisímetro. En términos generales, los diversos estadísticos calculados sugieren que el método de FAO Penman-Monteith condujo a mejores determinaciones de la ET_0 horaria que el método de *surface renewal*.

Tabla 1. Análisis de regresión simple entre valores lisimétricos de ET_0 horaria (variable dependiente) y valores determinados por el método de FAO Penman-Monteith (variable independiente), así como análisis de errores: MAE, error absoluto medio; MSE, error cuadrático medio; MSE_s/MSE , razón entre el error cuadrático medio sistemático y el MSE; IDS, índice de similitud.

	12 jul	26 jul	18 sep	27 sep	11 jul - 30 sep
Tamaño muestra	17	20	21	16	1006
Pendiente	0,98 ^{NS}	1,10 ^{NS}	0,74 ^s	1,00 ^{NS}	0,95 ^{NS}
Coef. determin.	84,9	88,1	86,3	87,5	67,7
MAE, mm h ⁻¹	0,075	0,079	0,063	0,017	0,080
MSE, (mm h ⁻¹) ²	0,013	0,013	0,007	0,001	0,019
MSE_s / MSE	0,005	0,102	0,675	6,1E-5	0,014
IDS	0,955	0,959	0,916	0,965	0,901

^{NS} No significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$)

^s Significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$)

Tabla 2. Análisis de regresión simple entre valores lisimétricos de ET_0 horaria (variable dependiente) y valores determinados por el método de *surface renewal* (variable independiente), así como análisis de errores: MAE, error absoluto medio; MSE, error cuadrático medio; MSE_s/MSE , razón entre el error cuadrático medio sistemático y el MSE; IDS, índice de similitud.

	12 jul	26 jul	18 sep	27 sep	11 jul - 30 sep
Tamaño muestra	17	19	22	17	1073
Pendiente	0,97 ^{NS}	1,08 ^{NS}	0,61 ^s	0,78 ^s	0,98 ^{NS}
Coef. determin.	83,3	87,8	88,9	76,5	62,7
MAE, mm h ⁻¹	0,084	0,066	0,073	0,029	0,096
MSE, (mm h ⁻¹) ²	0,014	0,013	0,008	0,002	0,022
MSE_s / MSE	0,012	0,082	0,770	0,392	0,002
IDS	0,953	0,963	0,924	0,921	0,891

^{NS} No significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$)

^s Significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$)

La Tabla 3 presenta los resultados del análisis de regresión simple entre la ET_0 diaria medida en los lisímetros y la ET_0 diaria determinada por los dos métodos objeto de estudio, así como los diferentes estadísticos utilizados para el análisis de errores. En ambos casos, los coeficientes de determinación fueron altos, superiores al 88 %. En el caso del método FAO Penman-Monteith la pendiente no fue significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$), mientras que sí lo fue en el caso del método de *surface renewal*. En ambos casos, los índices de similitud fueron altos, superiores a 0,96. El error absoluto medio y el error cuadrático medio del método de *surface renewal* fueron más altos que en el otro método. Asimismo, la componente sistemática del error cuadrático medio fue despreciable en el caso del método de FAO Penman-Monteith y superior al 17 % en el caso del método del *surface renewal*. La Figura 2 presenta los valores diarios de la ET_0 medida en el lisímetro frente a la determinada por los dos métodos. Se puede observar que en ambos casos la concordancia entre valores lisimétricos y valores determinados fue menor para valores altos de ET_0 (meses de verano). En el caso del método de FAO Penman-Monteith no se observa, sin embargo, una tendencia a la sobreestimación o a la subestimación, mientras que en el caso del método del *surface renewal* se observa una sobreestimación para valores bajos de ET_0 y una subestimación más evidente para valores altos de ET_0 .

En resumen, los resultados de este trabajo indican que ambos métodos, FAO Penman-Monteith y *surface renewal* han producido determinaciones aceptables de la ET_0 horaria en términos generales. Empero, este rendimiento difiere de unos días individuales a otros y, en términos globales, existe cierta dispersión entre los valores medidos en el lisímetro y los determinados por ambos métodos. De esta forma, cuando se comparan valores diarios de ET_0 , se puede observar que el método del *surface renewal* subestima claramente la ET_0 medida en el lisímetro durante los meses de verano y tiende a cierta sobreestimación en los meses de otoño. Los resultados de este trabajo sugieren cierta superioridad del método de FAO Penman-Monteith frente al método del *surface renewal*.

Aparte de otras consideraciones, hay que señalar que el método de *surface renewal* tiene cierto grado de empirismo que sería preciso evaluar (Snyder y Paw U, 1993). Asimismo, los resultados de este método son sensibles a la altura a la que se coloca el sensor de temperaturas de alta frecuencia (Spano et al., 1994a, b). En el caso del método de FAO Penman-Monteith, la suposición de que la resistencia global de la cubierta vegetal es constante a lo largo del día puede ser una limitación seria cuando dicho método se aplique para determinar valores horarios de ET_0 (Allen et al., 1994). Un análisis más detallado de estos y otros factores es necesario antes de que se puedan obtener resultados más concluyentes sobre la utilidad de estos dos métodos para obtener valores horarios de ET_0 en las condiciones climáticas semiáridas de Aragón. En estas condiciones climáticas, y teniendo en cuenta los relativamente fuertes vientos de la zona, un problema a considerar debería ser la fuerte advección que puede proporcionar una fuente adicional de energía para el proceso de evapotranspiración.

Tabla 3. Análisis de regresión simple entre valores lisimétricos de ET_0 diaria (variable dependiente) y valores determinados por los métodos de FAO Penman-Monteith y *surface renewal* (variable independiente), así como análisis de errores: MAE, error absoluto medio; MSE, error cuadrático medio; MSE_s/MSE , razón entre el error cuadrático medio sistemático y el MSE; IDS, índice de similitud.

	Tamaño muestra	Pendiente	Coef. determin.	MAE mm día ⁻¹	MSE (mm día ⁻¹) ²	MSE_s/MSE	IDS
FAO Penman-Monteith	59	1,01 ^{NS}	91,1	0,402	0,371	0,004	0,976
<i>Surface renewal</i>	44	1,08 ^S	88,0	0,604	0,581	0,171	0,961

^{NS} No significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$)
^S Significativamente diferente de 1 ($\alpha = 0,05$)

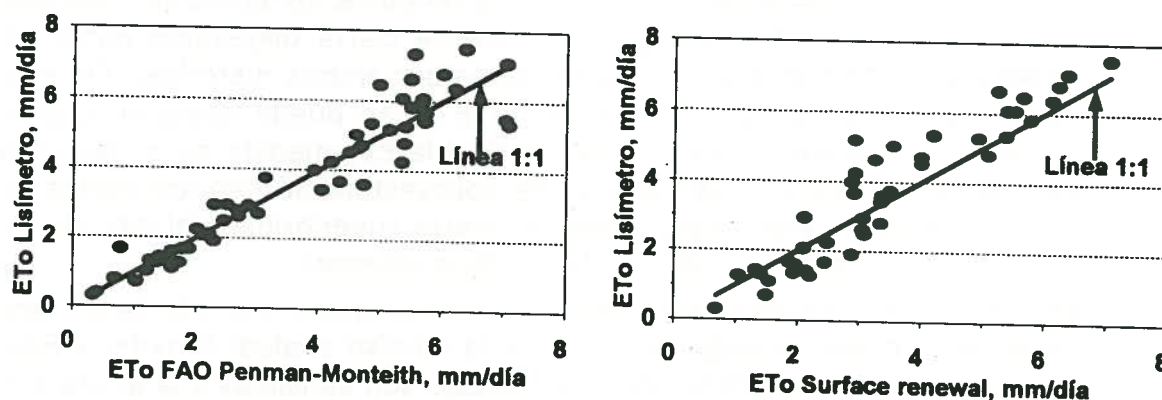


Figura 2. Relación entre valores diarios de ET_0 medidos en el lisímetro y valores diarios de ET_0 determinados por los métodos de FAO Penman-Monteith y *surface renewal*.

4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de este trabajo indican que los métodos de FAO Penman-Monteith y del *surface renewal* han determinado de manera aceptable la ET_0 horaria, aunque este rendimiento difiere entre días individuales. En términos generales, se observa cierta dispersión frente a los valores horarios de ET_0 medida en el lisímetro. Respecto a valores diarios de ET_0 se observó la superioridad del método de FAO Penman-Monteith frente al del *surface renewal*. Este último método tiende a subestimar la ET_0 diaria medida en el lisímetro en los meses de verano y a sobreestimarla en los meses de invierno.

Estos resultados deben ser considerados como preliminares ya que sólo se refieren a un período muy concreto, el segundo semestre de 1994. Asimismo, es necesario analizar y evaluar de forma más detallada algunos aspectos de la utilización de estos métodos, tales como el grado de empirismo que existe en el método del *surface renewal*, altura de colocación de los sensores, sobre todo en el caso de este método, etc. El análisis de éstos y otros factores en posteriores trabajos permitirá establecer conclusiones más firmes sobre el rendimiento de estos métodos de determinación de la ET_0 horaria y diaria bajo estas condiciones semiáridas.

REFERENCIAS

- Allen R.G., Smith M., Pereira L.S., Perrier A. 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*. 43 (2): 35-92.
- Gao W., Shaw R.H., Paw U K.T. 1989. Observations of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology*. 47: 349-377.
- Paw U K.T., Brunet Y. 1991. A surface renewal measure of sensible heat flux density. *20th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*. 10-13 de septiembre. Salt Lake City, Utah. 52-53. American Meteorological Society. Boston, MA.
- Snyder R.L., Paw U K.T. 1993. Estimating ET using turbulent coherent structures. In: *Management of Irrigation and Drainage Systems*. 21-23 julio. Park City, Utah. 930-936. Irrigation and Drainage Division, ASCE.
- Spano D., Snyder R.L., Paw U K.T., DeFonso E. 1994a. Verification of the surface renewal method for estimating evapotranspiration. *21th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*. 7-11 de marzo. San Diego, California. 297-298. American Meteorological Society. Boston, MA.
- Van Atta C.W. 1977. Effect of coherent structures functions of temperature in the atmospheric boundary layer. *Archives of Mechanics*. 29: 161-171.
- Willmott C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 63 (11): 1309-1313.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado a través del proyecto SC93-059 (INIA, Ministerio de Agricultura). Se agradece al Dr. Snyder (University of California, Davis) por su colaboración en el registro y análisis de los datos utilizados en el método del *surface renewal*.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE SUSTRATOS

Terés, V. (P); Artetxe, A.; Beunza, A.I.

RESUMEN

Las propiedades físicas de los sustratos difieren considerablemente de las de los suelos. La consecuencia más importante de estas diferencias se manifiesta en los gradientes de humedad que son muy elevados en el caso de sustratos, y provocan variaciones importantes en el reparto de aire y agua.

El estudio de las relaciones aire-agua mediante la curva de retención de agua aportan gran parte de la información necesaria para la correcta aplicación de los riegos.

En el presente trabajose ha medido el reparto de fases correspondiente a valores de la tensión comprendida entre 0 y 100 cca. En base a ello se ha elaborado la curva de retención de agua correspondiente para doce sustratos de turba, corteza de pino, escorias, lana de escoria y mezclas de los mismos. Se ha seguido la metodología desarrollada en el SIMA para la caracterización física de sustratos.

En general los sustratos estudiados tienen una alta aireación. En cuanto al agua disponible es muy elevada para la lana de escoria, elevada para los sustratos con turba y baja para los compuestos de corteza y escorias. En consecuencia, en el caso de la lana de escoria y sustratos con turba pueden hacerse riegos abundantes y distanciados mientras que en el resto de sustratos deben ser cortos y frecuentes.

SUMMARY

Physical characteristics of substrates are considerably different from those of soils. The main consequence of these differences affects the humidity gradients which are extremely high in the case of substrates, therefore causing important variations in the distribution of air and water.

The study of the relationships between air and water by means of the water retention curve provides for a main part of the information needed for the sound application of irrigations.

In this paper the distribution of phases corresponding to 11 tension values between 0 and 100 cca has been measured. Taking it as a basis, a water retention curve has been developed for 12 substrates of turf, pine bark, slag, slag wool and mixtures of these materials. The methodology developed at the S.I.M.A. (*Servicio de Investigación y Mejora Agraria del Dpto. de Industria, Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco*) has been followed in order to physically characterize the substrates.

In general, the substrates studied are highly aerated. Regarding the water availability it is very high for the slag wool, high for the substrates containing turf and low for the mixtures of bark and slag. Therefore, in the case of slag wool and substrates containing turf, water applications may be high and less frequent whilst for the rest of substrates types they should be small and frequent.

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Diferencias Suelo-Sustrato

El cultivo en sustratos presenta diferencias importantes en relación al cultivo en suelo. Estas diferencias están determinadas principalmente por dos factores: la limitación del espacio explorado por el sistema radicular y las diferencias existentes entre las propiedades físicas de suelo y sustratos. Como consecuencia de ello se tiene una alteración del drenaje y una modificación importante de los criterios de riego (Burés, 1985).

Existen grandes diferencias entre la porosidad de un suelo y la de un sustrato. Estas diferencias son tanto en lo que se refiere al valor de la porosidad total como a la tipología de la misma.

La porosidad total de un sustrato es normalmente de alrededor del 85-95 % del volumen total de éste, mientras que en suelos supone aproximadamente un 50 %.

Respecto a la tipología, la porosidad total de los sustrato puede clasificarse en (Terés *et al.*, 1995b):

- Porosidad interparticular que también está presente en suelos y está formada por los espacios existentes entre partículas. Depende de la forma de las partículas y del tipo de empaquetamiento. El porcentaje de porosidad interparticular respecto al volumen total en un sustrato es previsible que sea similar al de la porosidad en suelos.

- Porosidad intraparticular, en general no presente en suelos, y está formada por poros internos de las partículas que pueden estar o no comunicados con el exterior, formando así poros abiertos (porosidad abierta) o cerrados (porosidad ocluida). Podemos suponer que representa las diferencias entre la porosidad total de suelos y sustratos. Este tipo de porosidad depende más del proceso de formación de cada sustrato que de la forma, tamaño o empaquetamiento de sus partículas. La presencia de poros cerrados, o su tamaño en el caso de poros abiertos, supone barreras que limitan la accesibilidad y el intercambio de aire y agua (Terés *et al.*, 1995a).

Una de las consecuencias de estas diferencias en las propiedades físicas de suelos y sustratos es que los gradientes de humedad en las zonas habituales de trabajo ($\Psi_m > -100$ cca para sustratos y $\Psi_m < -330$ cca en suelos) son mucho más fuertes en sustratos que en suelos. En el caso de sustratos, una diferencia en el potencial matricial de 10 a 20 cm. de columna de agua (cca) supone una variación muy importante en los porcentajes de agua/ aire. Estas diferencias son las que se encuentran en una maceta o contenedor de esa altura. En el caso de suelos la variación del potencial matricial de 20 a 30 cca (equivalente a la profundidad de la capa arable) no supone una alteración apreciable en el reparto agua/ aire.

Otros aspectos importantes a señalar son:

- Mediante el cultivo con sustratos en contenedor se consigue una mayor sanidad inicial en el sustrato, una mayor capacidad de aireación del sistema radicular, mayor control nutritivo de la planta y mayor control de riego.

- Un inconveniente de la utilización de sustratos como medio de cultivo en lugar de suelos es la pérdida de la capacidad tampón. Así, en cultivos en contenedor, y sobre todo cuando se trabaja con sustratos inertes, es necesario aportar a las plantas todos los elementos necesarios para su desarrollo de forma correcta ya que cualquier fallo podría tener graves consecuencias.

- El uso de suelos en un contenedor no reportaría las ventajas del empleo de sustratos debido a razones de tipo físico. Las diferencias de porosidad entre ambos y la limitación de volumen por el contenedor provoca una disminución de la cantidad de aire y agua disponibles para la planta. Además la utilización de suelos, con diámetros de poros pequeños, en contenedores de poca profundidad no crea las condiciones suficientes para provocar el drenaje (Bunt, 1988).

Como consecuencia de las diferencias comentadas entre suelos y sustratos, los métodos desarrollados para el estudio de las relaciones hídricas en suelos no son aplicables a sustratos de cultivo. Por ello se han desarrollado varias metodologías para su aplicación específica en estos materiales. Debido a los diversos problemas que presentan todas ellas, fundamentalmente relacionadas con el cálculo de errores, hemos desarrollado un proceso metodológico propio cuyo objetivo principal es conocer además de los valores correspondientes, la exactitud y precisión de las medidas realizadas.

1.2.- Curvas de retención de agua

La caracterización física de sustratos estudia las propiedades físicas que tienen interés desde el punto de vista agronómico: granulometría, densidades aparente y real, porosidad, curvas de retención de agua, conductividad hidráulica saturada e insaturada, etc. Muchas de ellas están relacionadas entre sí.

El estudio de las curvas de retención de agua o de las relaciones aire-agua sustrato, mediante el reparto del volumen total entre la fase sólida (sustrato), líquida (agua) y gas (aire) aporta gran parte de la información necesaria para la correcta aplicación de los riegos. El reparto del volumen total entre las diferentes fases varía en función del estado hídrico del material, que puede medirse por el potencial matricial (Ψ_m) o tensión (t) ($\Psi_m = -t$) (Terés *et al.*, 1995a).

La curva de retención de agua refleja el perfil hídrico que se da en un contenedor en un momento dado. Cuando el cultivo se riega y se deja drenar libremente la tensión en la base de la maceta es cero, y la tensión en cca. en cada uno de los puntos de la maceta es igual a la altura geométrica en cm. del punto sobre la base de la maceta (Fig. 1a).

Una disminución del contenido hídrico del sustrato se corresponde con un aumento de la tensión. Una vez alcanzado el equilibrio en un contenedor la diferencia de tensión entre dos puntos de dicho contenedor es igual a la diferencia de alturas. El reparto de agua/aire del contenedor en este caso puede representarse gráficamente colocando éste a la altura correspondiente a su tensión (Fig. 1b).

Las curvas de retención de agua de los sustratos presentan una mayor pendiente en la zona cercana a saturación por lo que pequeñas variaciones en altura de la maceta se corresponden con variaciones importantes de la cantidad de agua y aire. Este hecho afecta en gran medida a los cultivos en contenedor ya que se suelen encontrar en condiciones cercanas a saturación con el fin de que la planta tenga en todo momento el agua necesaria para su desarrollo.

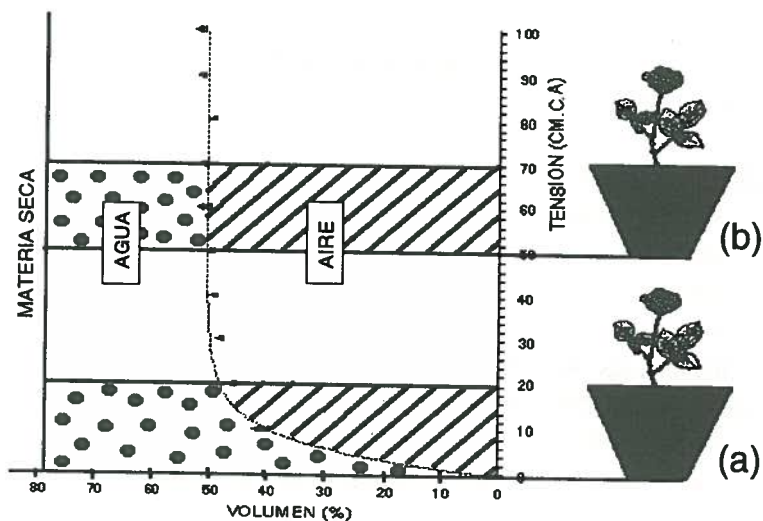


Figura 1.- Perfil hídrico del contenedor:
a) Con una tensión en la base de la maceta de 0 c.c.a.
b) Con una tensión en la base de la maceta de 50 c.c.a.

El Ψ_m expresa la energía con que el agua está retenida en el suelo y depende del diámetro del poro. Cuanto más bajo sea el potencial matricial del poro menor será el diámetro del poro equivalente. De esta forma deducimos que la curva de retención de agua nos proporciona además la distribución de la porosidad total en los distintos diámetros de poro. Por tanto, observando la curva de retención de sustratos se deduce que existe un alto porcentaje de poros de diámetro grueso ($\phi > 300 \mu\text{m}$) (Lemaire *et al.*, 1989). Esta distribución de tamaños de poro influye, además de en la curva de retención, en la conductividad hidráulica. (Orozco, 1995).

La conductividad hidráulica de un sustrato influye por un lado en la capacidad para aportar agua a las raíces y por otro en la rapidez con la que se produce el drenaje del agua de riego facilitando la respiración de las mismas.

2.- OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es la obtención de las curvas de retención de agua de distintos sustratos obtenidos a partir de corteza de pino, turba y escorias de altos hornos.

3.- MATERIALES MÉTODOS

3.1.- Sustratos

Se han realizado las curvas de retención de agua de 12 sustratos:

1.- C100	5.- EG100	9.- E25:C75
2.- T100	6.- LE100	10.- E50:C50
3.- CY	7.- C25:T75	11.- EG25:C75
4.- E100	8.- E25:T75	12.- EG50:C50

C → Corteza de pino compostada en el S.I.M.A.

T → Turba TKS2 de Floragard.

CY → Turba Cyclamenerde suministrada por Floragard

E → Escoria cristalizada procedente de Altos Hornos de Vizcaya (AHV)

EG → Escoria granulada de AHV

LE → Lana de escoria de AHV

Nº → % en volumen que representa cada sustrato

Las tensiones aplicadas fueron las siguientes: 0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40, 50 y 100.

3.2.- Material

• Preparación de la muestra:

* Anillo principal calibrado:

Tubo de acero inoxidable: Diámetro 82,625 mm
 Altura $40 \pm 0,1$ mm
 Capacidad 215 c.c.

* Anillo secundario:

Tubo de acero inoxidable: Diámetro 82,625 mm
 Altura $30 \pm 0,1$ mm

* Mallas de nylon de $75 \mu\text{m}$ de luz para tapar las caras abiertas de los anillos.

* Goma de caucho para la unión de los anillos.

* Juntas tóricas de silicona para sujeción de las mallas de nylon.

• Sistema de tensionado:

* Lecho de arena fina con potencial de entrada de aire (Ψ_e) < -100 cca..

* Plástico para cubrir el conjunto y evitar evaporaciones.

* Regulador de nivel constante.

* Tensiómetro de control de tensionado en lecho de arena.

• Saturación:

* Campana de vacío..

• Gravimetría de muestras.

* Balanza de precisión.

* Baño de agua para peso dentro del agua.

* Cesta metálica.

* Patrones de volumen para evaluación de la densidad del agua.

• Estufa para secar a 105 °C.

• Desecadores.

3.3.- Metodología

La metodología utilizada para la caracterización física de los sustratos es la desarrollada en el S.I.M.A.(Gobierno Vasco) (Arechaga, 1994) basada en el método de referencia de Gabriëls y Verdonck, (1991). Los pasos seguidos son los siguientes:

1. Se eligen aleatoriamente 5 anillos por sustrato.
2. Se une el anillo principal con el secundario con la goma de caucho.
3. Se rellena el anillo con sustrato y tapamos con dos mallas de nylon (una arriba y otra abajo) las cuales van sujetas a los anillos con dos juntas tóricas de silicona.
4. Se satura la muestra a un vacío aproximado de 70 cm de Hg.
5. El lecho de arena se llena de agua de abajo hacia arriba (a través del regulador de nivel y drenaje) hasta 1 cm. por encima del nivel de arena.
6. Se introducen los anillos en el lecho de arena colocándolos sobre la tela y ejerciendo una ligera presión.
7. Se quita la malla de nylon superior.
8. Se somete el sistema a la tensión prefijada y se cubre con plástico la parte superior del depósito de arena.
9. Transcurridos las 24 horas, se sacan los anillos.
10. Se quita el anillo secundario y se pasa un cuchillo por el borde superior del anillo principal quedando únicamente el volumen contenido en este anillo.
11. Se coloca la malla superior.
12. Se pesa el anillo principal más el sustrato tensionado, junto con sus correspondientes mallas de nylon y juntas tóricas de silicona.
13. Las muestras así preparadas se saturan por vacío.
14. Se prepara el baño de agua para obtener el peso sumergido y se pesan los patrones 1 y 2 fuera y dentro del agua.
15. Las muestras saturadas se trasladan a la pila llena de agua en donde se procederá a realizar las pesadas de los anillos con el sustrato tensionado dentro del agua.
16. Una vez pesados los anillos, se vuelven a pesar los patrones dentro del agua.
17. Las muestras se secan en estufa a 105 °C durante 24 horas.
18. Una vez enfriadas en desecador se pesan el anillo con sustrato seco y sus mallas y juntas correspondientes.

4.- RESULTADOS

Porosidad total (Pt) (Tabla 1):

Los valores de la Pt mas elevados corresponden a la turba TKS2 (Fig.2) y lana de escoria (Fig.6) que en las distintas tensiones estudiadas varían entre un 90 y 95 %. Los valores para la turba Cyclamenerde (Fig.3) se sitúan ligeramente por debajo del 90% y en el caso de la corteza de pino (Fig.1) alrededor del 85%. Por último, las escorias estudiadas (Fig.4 y 5) presentan valores de Pt considerablemente mas bajos, situándose en el entorno al 50-60% con valores ligeramente superiores en el caso de la escoria granulada. Las mezclas entre los diferentes sustratos presentan en todos los casos valores intermedios y más próximos a unos u otros en función del porcentaje de sus componentes (Fig. 7-12).

Aireación (Tabla 1):

A tensiones próximas a cero, las escorias (cristalizada y granulada) (Fig.4 y 5), la turba Cyclamenerde (Fig.3) y la turba TKS2 (Fig.2) presentan un volumen ocupado por aire cercano a cero. La lana de escoria (Fig.6) y la corteza (Fig.1) presentan altos valores para este parámetro en el mismo rango. Las mezclas ,en general, no presentan problemas de falta de aireación (Fig.7-12).

Respecto a la capacidad de aireación (% de aire para tensión =10 cca.) los valores mas altos corresponden a escoria granulada ((Fig.5), corteza (Fig.1), y las mezclas de escoria granulada y corteza (Fig.11-12), con valores próximos al 40%. Las mezclas de corteza con los otros componentes (Fig.7, 9 y 10) y la lana de escoria (Fig.6) se encuentran en un segundo grupo de valores, tambien elevados para éste parámetro, que varían entre 22.6% (LE) y 31,17% (E25:C75). El resto de los sustratos presentan unos valores entre 14.23% (CY) y 17,68% (Turba TKS2). En general se puede decir que la aireación de todos estos sustratos es alta para los dos primeros grupos y media para el último.

Agua disponible (agua facilmente disponible + area de reserva,) (Tabla 1):

Entre los sustratos estudiados la mayor cantidad de agua disponible (Agua retenida entre 10 y 100 cca de tensión, AD) corresponde a la lana de escoria (Fig.6) con un 66.85% la mayor parte de ella entre 10 y 50 cca de tensión (agua facilmente disponible, AFD). Los cuatro sustratos en cuya composición interviene la turba incluida turba Cyclamenerde (Fig.2, 3, 7 y 8) presentan valores de entre 30 y 40% para el AD y queda una cantidad comprendida entre 30 y 36% de agua dificilmente disponible (ADD). Los sustratos a base de escoria cristalizada sola o con corteza (Fig.4, 9 y 10) presentan unos valores para el AD entre el 10 y 15% y para el ADD entre el 20 y 32%. La corteza de pino (Fig.1), escoria granulada (Fig.5) y sus mezclas (Fig.11-12) presentan unos valores de AD por debajo del 10% que podemos considerarlos bajos. Las cantidades de ADD en este grupo son muy variables con un valor muy alto para la corteza de pino (40,75%) y muy bajos para la escoria granulada (11.41%). Las mezclas presentan valores intermedios.

5.- CONCLUSIONES

- En general los sustratos estudiados tienen una alta aireación. En algunos casos el contenido de aire a tensión 0 es próximo a cero pero la capacidad de aireación es en todos los casos elevada o muy elevada.

- La lana de escoria tiene un valor muy elevado para el agua disponible. Los sustratos con una componente importante de turba presentan valores elevados de AD, mientras que los elaborados a base de corteza y escorias presentan valores considerablemente inferiores. Como compensación la corteza de pino y sus mezclas tienen valores elevados para el agua dificilmente disponible.

- Como consecuencia de todo ello, y en relación a los riegos, en el caso de la lana de escoria y sustratos a base de turba pueden hacerse riegos relativamente abundantes y distanciados entre si mientras que, en los otros sustratos los riegos deben ser cortos y frecuentes.

6.-BIBLIOGRAFÍA

- ARECHAGA, L.M. 1994. Medida de la humedad en sustratos de cultivo. Trabajo Fin de Carrera de la ETSIA de la Universidad Pública de Navarra.
- BUNT, A.C. 1988. Chapter Three: Physical aspects in growing media for ornamental plants and turf. 2nd Edition. Publicado por Academic División for Unwin Hyman Ltd. Londres. Pag: 40-63. ISBN: 0-04-635016-0.
- BURÉS, S. 1985. Sustratos en horticultura. Floricultura y horticultura, nº20: 12-15.
- GABRIËLS, R y VERDONCK, O. 1991. Physical and chemical caracterización of Plant Substrates: towards a European Standardización. Acta Horticulturae, 294: 249-259.
- LEMAIRE, F; DARTIGUES, A.; RIVIERE, L.M.; CHARPENTIER, S. 1989. Culture en pots et conteneurs. Principes agronomiques et aplicaciones. Co-édition INRA-PHM Revue Horticole. 184 pp. ISBN: 2-7380-0157-2.
- OROZCO, R. 1995. Propiedades físicas de perlitas utilizadas para cultivo sin suelo. Su implicación con la relación sustrato- agua- planta y con el riego de cultivos hortícolas.

Tesis presentada en l'Escola Tècnica Superior D'Enginyeria Agrària como aspirante al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo. Dept. de Medi Ambient y Ciència del Sòl. Universitat de Lleida.

TERÉS, V.; ARRIETA, V.; SÁNCHEZ, J.; LUCAS, M. y RITTER, E. 1995a. Evaluación de la densidad real de sustrato de cultivo por el método de inmersión. *Invest Agr: Prod. Prot: Veg.* 10 (2): 39-52.

TERÉS, V.; ARTETXE, A. y BEUNZA, A.I. 1995b. Relaciones aire-agua en sustratos de cultivo. En: *Avances en la investigación en Zona No Saturada*. 395-407. De. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. ISBN: 84-457-0635-7.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado mediante las financiaciones del Dpto. de Industria, Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco a través del Proyecto de Sustratos, y de la Comisión Interministerial de Ciencias y Tecnologías (CICYT) a través del Proyecto Ref: AMB 94-0178.

	Pt (%)	% Aire (t=0)	CA (%)	AD (%)	ADD (%)
C100	83.21	15.26	37.14	5.28	40.71
T100	92.20	6.27	17.68	40.52	33.26
CY	88.04	4.79	14.23	36.66	36.40
E100	52.46	-0.17	17.36	13.93	20.88
EG100	57.17	1.14	38.53	8.58	11.41
LE100	92.09	17.60	22.59	66.85	2.82
C25:T75	90.33	2.85	25.97	31.27	33.75
E25:T75	88.84	2.60	14.73	35.29	30.28
E25:C75	75.02	11.95	31.17	11.92	31.86
E50:C50	67.34	6.27	125.32	13.7	28.84
EG25:C75	76.21	16.99	38.62	5.27	31.76
EG50:C50	73.04	9.28	39.92	4.65	28.02

Tabla 1: Valores de Porosidad total (Pt), Aire a 0 cca de tensión, Capacidad de aireación (CA), Agua disponible (AD) y Agua difícilmente disponible (ADD) para los distintos sustratos.

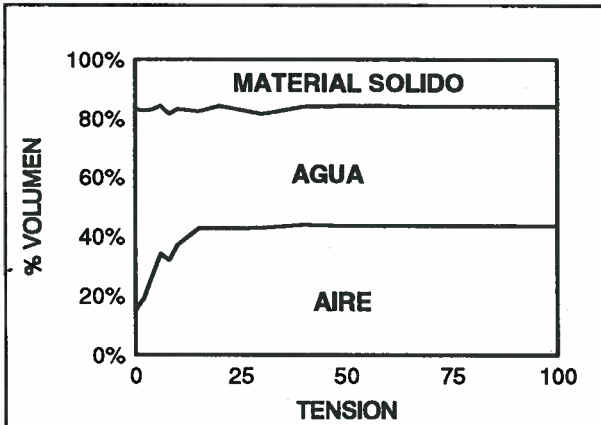


Fig.1: C100

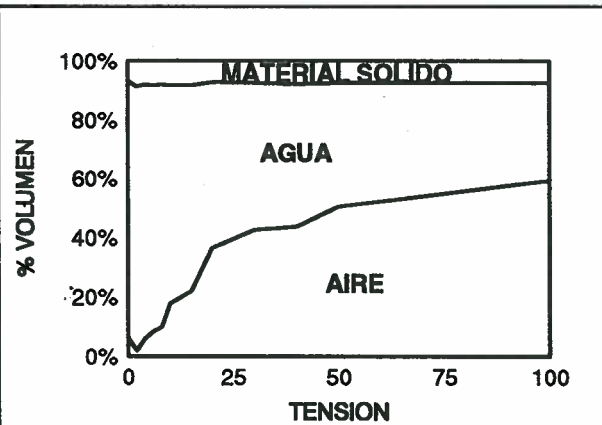


Fig.2: T100

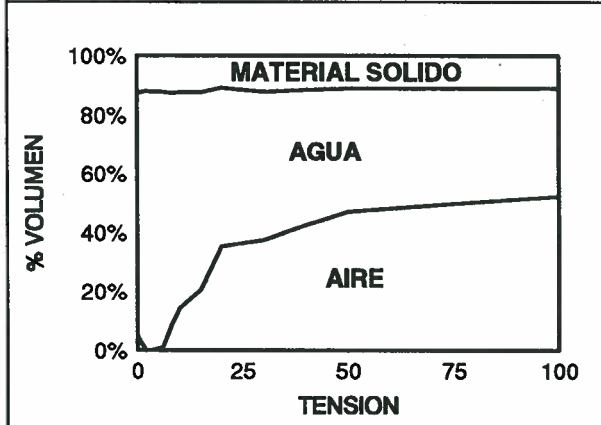


Fig.3: CY

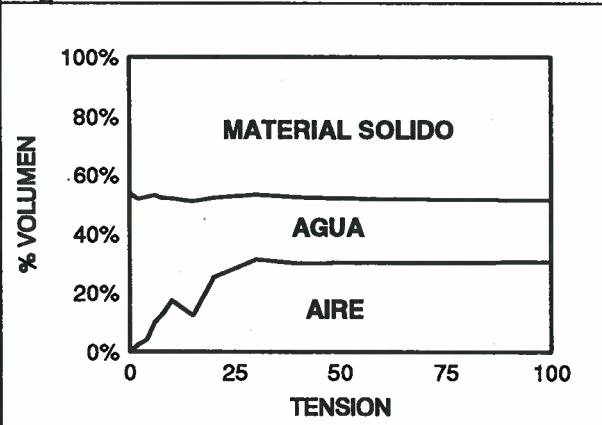


Fig.4: E100

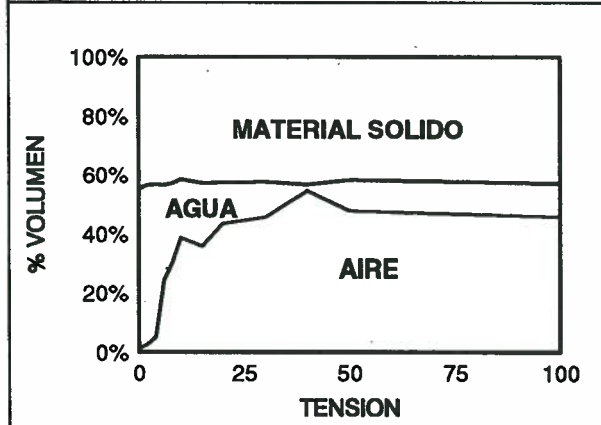


Fig.5: EG100

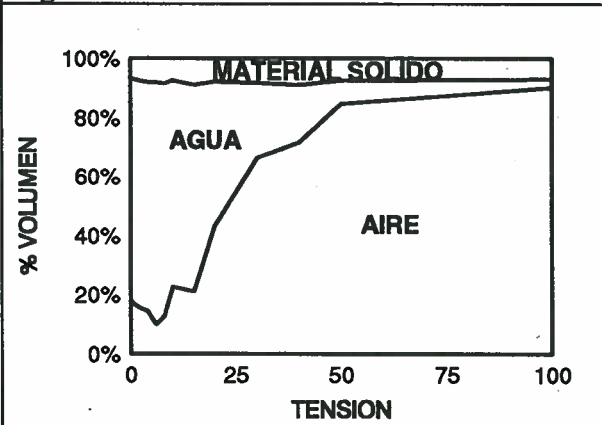


Fig.6: LE100

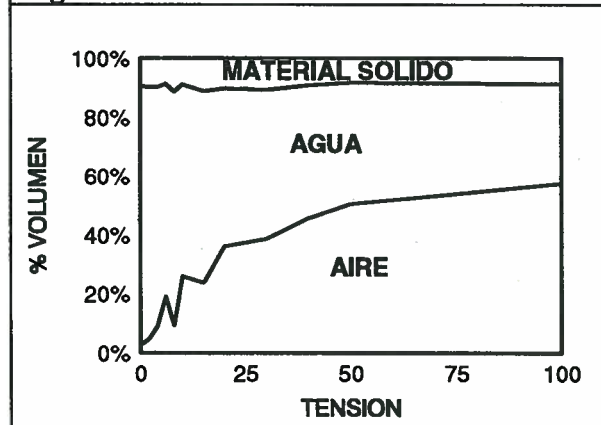


Fig.7: C25:T75

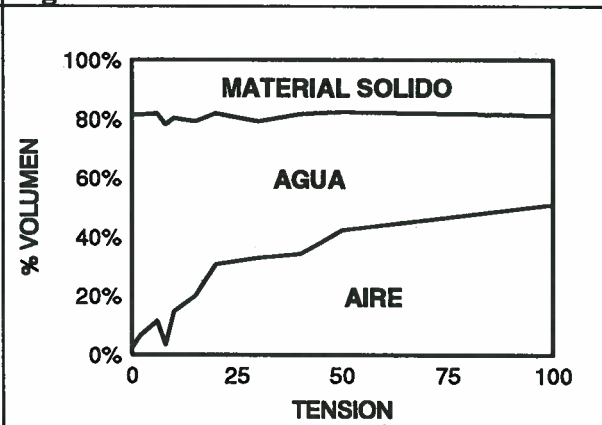


Fig.8: E25:T75

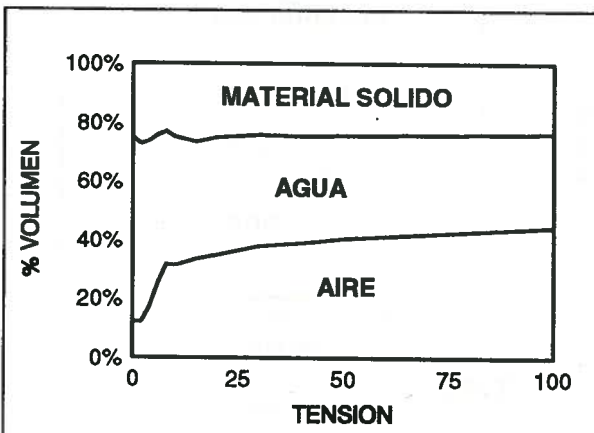


Fig.9: E25:C75

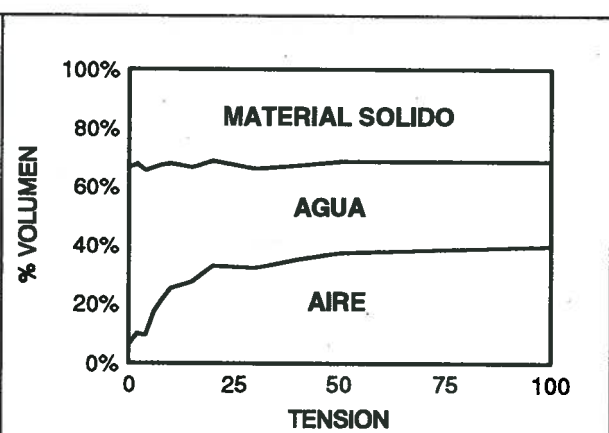


Fig.10: E50:C50

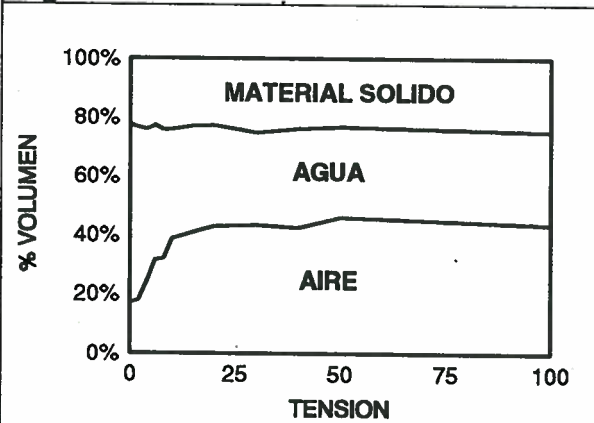


Fig.11: EG25:C75

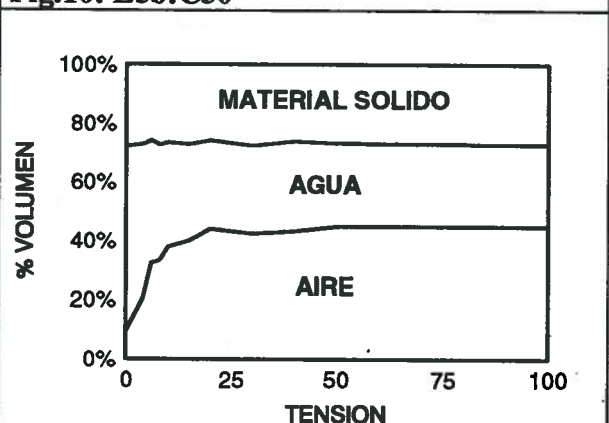


Fig.12: EG50:C50

**RESPUESTA DEL OLIVO EN CONDICIONES DE EXTREMA SEQUIA
A DISTINTAS DOSIS DE RIEGO**

**Response of the Olive tree in conditions of extreme drought
to different irrigation doses**

Martínez Raya. A¹ (P); Martínez Rascón. A¹; Sánchez Blánquez. J¹

RESUMEN:

En este trabajo se estudia la respuesta de una parcela de olivar, variedad Picual, a tres tratamientos de riego en condiciones de climatología adversa. Los tres tratamientos se han aplicado mediante riego localizado consistente en cuatro goteros por planta, a través de los cuales se incorporan los nutrientes en cantidades calculadas previamente para cubrir las necesidades de una cosecha óptima. Los dos años estudiados, climatológicamente suponen los últimos de un periodo de sequía con pluviometrías descendientes desde 277.1 mm (1992/93) hasta 183 mm, correspondiendo la más baja al del último año estudiado. Las producciones obtenidas se consideran como buenas comparándolas con las medias obtenidas en la zona en años de pluviometría normal, especialmente las correspondientes a la dosis mayor de las aplicadas.

PALABRAS CLAVE: Olivo, Riego, Sequía.

SUMMARY:

In this work the response of the olive Picual to three treatments of irrigation in conditions of adverse weather, is studied. The three irrigation doses have been applied through a drip irrigation system with four drippers by plant, through of there a previous calculated dose of fertilized has been applied to cover the needs of an optimun crop. The two years studied are from the weather point of wiew the last of a period of drought with rainfall decreasing from 277.1 mm (1992/93) until 183 mm, corresponding the latter to the last experimental year considered. The yield obtained are considered as good with respect to the current average of the area in normal rainfall years, particulary on the case of the highest irrigation dose applied.

KEY WORDS: Olive, Drip Irrigation, Drought.

¹ Centro de Investigación y Desarrollo Agrario de Granada

INTRODUCCION. OBJETIVOS.

Dentro de los cultivos extensivos, el del olivo actualmente es uno de los más rentables dadas las condiciones de mercado y la excelente demanda que tiene el aceite de oliva. Se admite que las necesidades hídricas para una óptima producción deben aproximarse a los 700 mm. La situación de sequía de los últimos años tiene como consecuencia que nos encontremos muy lejos de este valor. Se ha considerado desde el punto de vista del olivar, que en la cosecha del año van a influir las lluvias caídas entre diciembre y noviembre (ver *tabla n°1*). Estas pluviometrías han ido decreciendo a partir de 1990, llegando a un mínimo en la campaña diciembre 94 - noviembre 95 de 183 l/m², cantidades que han sido insuficientes para obtener fruto en los olivos de secano, y que incluso ha afectado al estado vegetativo del árbol. La respuesta del olivar al riego ha sido espectacular, lo que ha originado un incremento muy importante de las puestas en riego de olivares de secano con resultados económicos de apreciable rentabilidad.

MESES	CAMPAÑA 92/93	CAMPAÑA 93/94	CAMPAÑA 94/95
DICIEMBRE	19.8	10.2	5.5
ENERO	0.2	55.0	30.2
FEBRERO	9.8	53.2	7.0
MARZO	26.2	7.0	24.0
ABRIL	56.2	37.2	10.4
MAYO	48.2	25.4	0.0
JUNIO	0.4	0.0	33.2
JULIO	0.0	0.2	0.0
AGOSTO	0.0	0.0	20.1
SEPTIEMBRE	1.4	14.0	0.0
OCTUBRE	71.1	25.2	7.0
NOVIEMBRE	43.8	33.8	45.6
TOTAL ANUAL	277.1	261.2	183.0

Tabla n°1. Precipitaciones mensuales de las campañas 92/93, 93/94, y 94,95 en la finca de estudio (en mm).

Frecuentemente, debido a la escasez de recursos hídricos, el agricultor dispone de limitado caudal, lo cual justifica que demande información sobre un óptimo manejo del agua disponible. Este ha sido el motivo de plantearnos un estudio que permitiese dar respuesta a cuestiones tales como caudales necesarios por olivo, épocas de riego más eficaces, frecuencia del mismo, e interacciones con la fertilización.

Este estudio ha sido programado para cinco años, presentándose aquí los resultados de dos años completos que coinciden con las pluviometrías medias más bajas registradas en la zona.

MATERIALES Y METODOS.

Para el planteamiento de los trabajos, se ha seleccionado una parcela situada en el término municipal de Colomera, en la provincia de Granada, con una situación en ladera, representativa de los olivares de la zona. Esta ubicación topográfica hace que los suelos varíen entre Xerocept y Xerorthent en función de la posición geomorfológica en que se encuentren. La profundidad de suelo, varía entre más de 1.5 m y menos de 40 cm, encontrándose un horizonte petrocálcico en profundidad.

La variedad es Picual, con olivos plantados a un marco de 11 x 11 metros al tresbolillo, y de una edad de unos 35-40 años aproximadamente.

La instalación de riego localizado consta de una balsa de regulación de 150 m³ de capacidad, de un cabezal compuesto por una bomba, filtros de arena y de malla, bombas inyectoras de hasta 30 l/h para cada dosis de abonado, tubería general de 32 mm de diámetro y tuberías secundarias de 16 mm. Las tuberías están enterradas a unos 30-50 cm de profundidad. De cada línea secundaria salen 2 microtubos a la superficie, y mediante una T pasan a ser 4, que dispuestos en forma de estrella alrededor del tronco del olivo, portan en sus extremos goteros autocompensantes de hasta 4 l/h de caudal.

El riego se realiza desde marzo hasta octubre, ambos inclusive, regando un máximo de 8 horas en los meses de verano y principalmente por la noche, para que el coste de la energía eléctrica sea el menor posible. El control de las dosis de riego se realiza mediante un contador de horas, habiéndose evaluado previamente el caudal horario de los goteros.

El abonado se realiza todos los meses durante un determinado número de horas dependiendo estas de la solubilidad de los abonos sólidos empleados. Los fertilizantes utilizados son Nitrato Amónico (33.5%), Nitrato Potásico (13-0-46), y Acido fosfórico (50%), aprovechando de este último su acción limpiadora en líneas y goteros.

Los tres tratamientos de riego son *R1*, con una aportación real de 11164 l/olivo y año, *R2* con 16746 l/olivo y año, y *R3* con 22328 l/olivo y año. Las dosis indicadas son la media de los dos años, siendo ambas similares y con muy poca variación anual.

Dada la variabilidad de los suelos, se ha elegido un diseño de bloques al azar con parcela elemental de 12 árboles, con el fin de controlar los dos centrales manteniendo líneas guarda.

Se han dispuesto 4 bloques, es decir, 4 repeticiones por tratamiento, lo que supone un total de 3 (dosis) por 4 (repeticiones). Este número de repeticiones tiene como objetivo, entre otros, anular las variaciones posibles inducidas por los diferentes tipos de suelo.

En estos dos árboles centrales por parcela elemental, anualmente se ha controlado la producción, se han medido dos diámetros por olivo con el fin de calcular su volumen y superficie foliar (en enero de 1995 y en febrero de 1996), y se han tomado muestras de hojas en tres épocas.

La recolección de la aceituna se realizó en el mes de diciembre el primer año, por medio del vibrado; el segundo año se retrasó la recogida debido a las frecuentes lluvias hasta mitad de enero. Por este motivo, la única forma de recolección posible fué la del vareo tradicional. Al mismo tiempo se muestreó fruto para determinar el rendimiento y calidad del aceite en cada campaña.

RESULTADOS Y DISCUSION.

Los datos nos demuestran un fuerte incremento de la producción con el tratamiento mayoritario de agua. Partiendo de niveles del tratamiento *R1*, en años de extrema sequía, con pluviometrías por debajo de los 265 mm, existen respuestas de producción a los incrementos de caudales de riego, siendo estas respuestas superiores al doble a partir del tratamiento *R2*.

Parece que la eficiencia del agua de riego aumenta en cuanto a la producción a partir de un determinado umbral que éste árbol necesita para cubrir sus necesidades para el crecimiento vegetativo.

Los datos medios de los dos años de producción por planta, producción por superficie foliar, y rendimiento, se detallan en la *tablanº2*, manteniendo la producción por superficie, las mismas tendencias que la producción absoluta. El rendimiento tiende a disminuir ligeramente. En la *figura nº1* se representan las producciones medias por olivo y tratamiento.

El primer año se empezó a regar en mayo, tarde y después de unas cosechas muy bajas, por lo que como consecuencia del manejo del olivar, se obtuvo una respuesta más homogénea y uniforme.

Con este primer año se lograron medias de producción altas para la zona, situadas entre los 50-60 kg/olivo para los tres tratamientos. Los resultados del último año son sin embargo más espectaculares, existiendo grandes diferencias entre el tratamiento de dosis mayor respecto a los demás. Las producciones medias obtenidas considerando estos dos años, muestran que el incremento desde *R1* al *R2* supone un aumento en la producción de 8.95 kg, mientras que al pasar del *R2* al *R3*, la producción media aumenta en 14.9 kg, resaltándose este resultado en el último año estudiado. Esto supone que en el paso del *R1* al *R2*, la eficacia del agua es de 1.60 kg/m³w y de 2.67 kg/m³w en el segundo salto.

DOSIS DE RIEGO	Kg/Olivo	Kg/m ²	Rendimiento
R1	35.15	0.41	23.78
R2	44.10	0.47	23.12
R3	59.00	0.66	23.17
Testigo	1.25	---	---

Tabla nº2. Producciones absolutas, por superficie foliar, y rendimientos. Datos medios de los dos años estudiados.

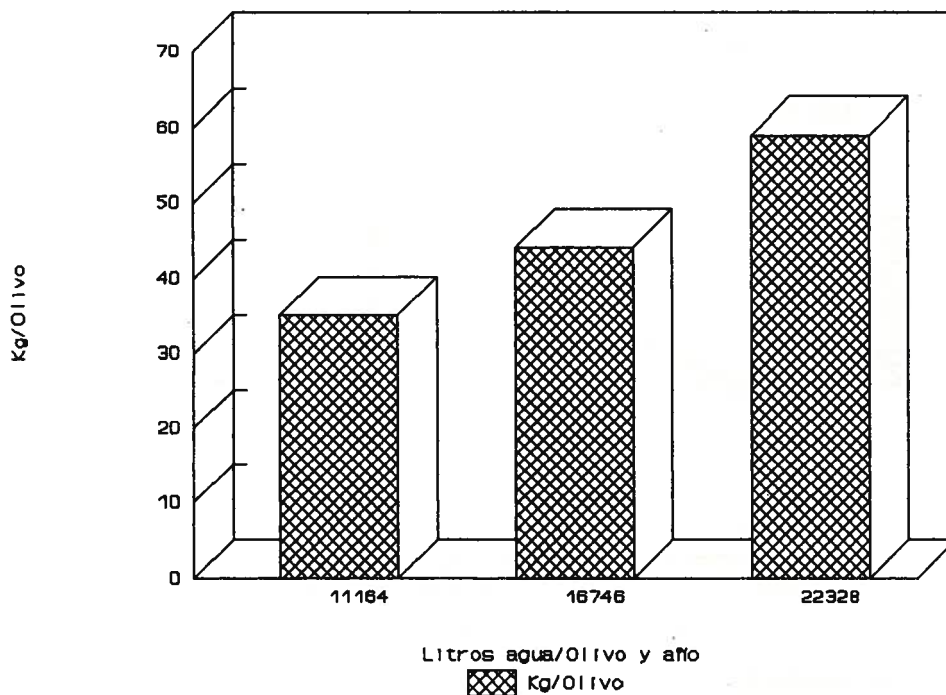


Figura nº1. Producción de aceituna con las dosis de riego R1, R2, Y R3.

Parece necesario calcular unos niveles mínimos de necesidades hídricas apartir de los cuales la eficacia del agua aplicada aumenta.

El estudio de la correlación existente entre las dosis de riego y las variables medidas como son la producción por olivo, la producción por superficie foliar, el rendimiento, y los niveles foliares, ponen de manifiesto, que existe una dependencia significativa entre la dosis de riego y la producción, tanto absoluta como por superficie foliar. Sin embargo no se ha encontrado correlación significativa entre la dosis de riego y el rendimiento y entre la dosis y los niveles foliares.

En las *figuras nº2a y 2b* se representan las curvas de regresión entre la dosis de riego y la producción absoluta por olivo y la producción por superficie foliar respectivamente.

Figuras n°2a y 2b. Curvas de regresión entre la dosis de riego y la producción absoluta por olivo (2a) y por superficie foliar (2b).

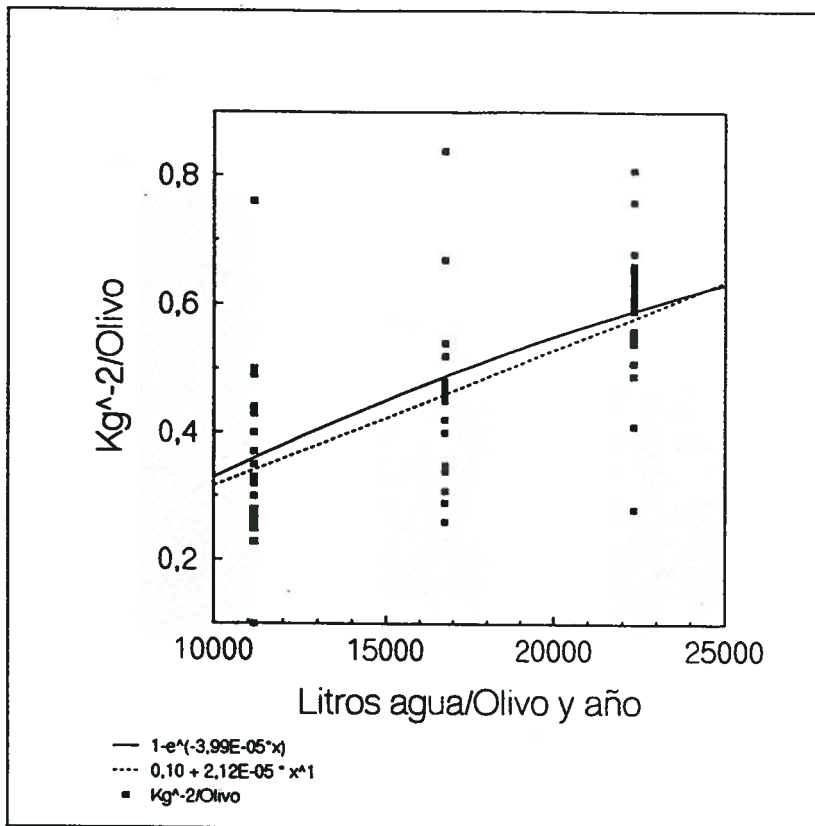


Figura 2a

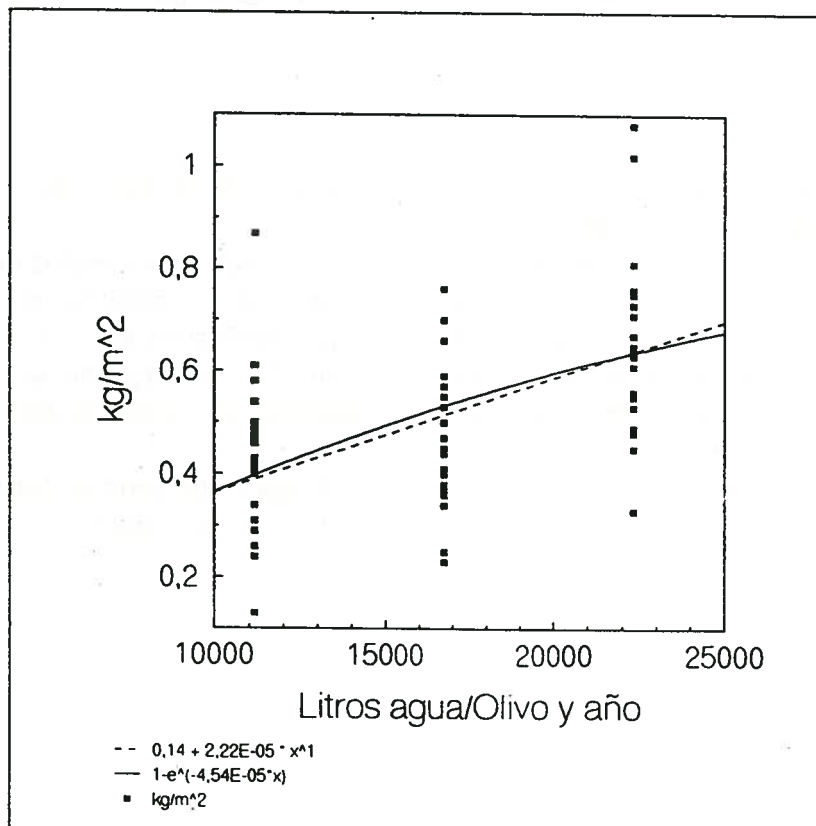


Figura 2b

En el caso de realizar un ajuste lineal entre la dosis de riego y la producción por planta, se obtiene un coeficiente de correlación $R^2=0.39$, siendo muy significativa la dependencia desde un punto de vista estadístico. En el caso de realizar un ajuste del tipo $y=1-e^{(a \cdot x)}$, siendo a una constante, la dependencia también es muy significativa, explicándose en este caso el 86% de la variación existente por medio de la curva obtenida, o de otro modo, $R^2=0.86$. Evidentemente nos quedaremos con este último ajuste, que como puede verse en la *figura n°2a*, tiende, en una posible extrapolación, a alcanzar una meseta a dosis mayores de riego, hecho este que se debería constatar experimentalmente.

De forma similar se comporta la producción respecto a la superficie foliar, mostrándose en la *figura n°2b*, los dos tipos de curvas, con ajustes significativos de coeficientes $R^2=0.29$ para la curva lineal, y de $R^2=0.84$ para el otro ajuste.

CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos se refieren a unas campañas caracterizadas por su extrema sequía. Es necesario continuar con los trabajos para llegar a resultados concluyentes, teniendo en cuenta las características del cultivo del olivo y con el fin de disponer de un mayor número de datos.

A pesar de ello, utilizando riego localizado, y de alta frecuencia, abonando a través del mismo, y aplicado desde abril a octubre, en estos años muy secos, que incluso han provocado la muerte vegetativa en algunas de las plantas, la respuesta del olivo al riego ha sido espectacular, obteniéndose medias de producción relativamente altas, de 35 a 59 kg por planta, incluso con dotaciones bajas de riego (equivalentes a 100 l/m²).

Estos resultados explican, en años secos, que los agricultores estén aprovechando caudales mínimos para el riego del olivar, ya que incluso permite la amortización de las inversiones realizadas, en un corto plazo.

RECONOCIMIENTOS.

Este estudio de 5 años de duración está cofinanciado por la Caja Rural de Granada, contando con la colaboración del Gabinete Técnico de la misma.

BIBLIOGRAFIA.

ANDRES CANTERO, F. DE (1970): Estudio de la relación entre la cosecha obtenida en el olivar de la provincia de Jaén y las lluvias caídas en el año agrícola, período octubre-mayo y año civil, anteriores a cada cosecha. Ministerio de Agricultura. Madrid.

AYERS, R. S. (1975): Utilisation de l'irrigation goutte á goutte en Californie. Sem. Irrigation. Inst. Nat. Agron. El Harrach-Alger.

BEUTEL, J., URIU, K., LILLELAND, O. (1983): Leaf analysis for California deciduous fruits. Soil and Plant Tissue Testing in California. University of California. Bull.1879.

CHAPMAN, H.D. (ED.). (1966): Diagnostic criteria for plants and soils. University of California, Div. of Agric. Science, 793 pp. Berkley. California.

DOORENBOS. J y KASSAM. AH. (1986): Efecto del agua sobre los rendimientos de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje n° 33, 212 pp.

- EL AMANI, S. (1975): Comportement de l'olivier irrigué à l'eau douce et à l'eau salée. Seminario Oleícola Internacional. Córdoba.
- FERNANDEZ ESCOBAR, R., D. BARRAGAN, y M. BENLLOCH. (1993): Estado nutritivo de las plantaciones de olivar en la provincia de Granada. ITEA (en prensa).
- FERREIRA, J., A. GARCIA ORTIZ, L. FRIAS y A. FERNANDEZ. (1984): Los nutrientes N, P, K en la fertilización del olivar. X Aniversario Red Cooperativa Europea de Investigación en Oleicultura, Córdoba.
- GUERRERO GARCIA, A. (1988): Nueva Olivicultura. Mundi Prensa. Madrid.
- HARTMANN, H. T. y C. PANETSOS (1962): Effet de la déficience de l'humidité du sol pendant la floraison et la fructification de l'olivier. Informations Oléicoles Internationales.
- LE BOURDELLES, J. (1975): Irrigation de l'olivier. Seminario Oleícola Internacional. Córdoba
- MARTIN ARANDA, J. y P. TOVARVELAS SANTOS (1975): Ensayos sobre consumo de agua en un olivar "Manzanillo", en Sevilla. Seminario Oleícola Internacional. Córdoba.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1979). Explotaciones olivareras colaboradoras: Riego, Ministerio de Agricultura. Madrid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACION, (1992). Resultados de los proyectos de investigación terminados en 1990. M. A. P. A. Madrid.
- SAMISH, R. M., y SPIEGEL, P. (1966): L'influence de l'irrigation sur la croissance de l'olivier pour la production d'huile, Informations Oléicoles Internationales, n. serie n° 34, abril-mayo-junio 1966, págs. 53-63.
- VERNET, A.; DAMAANEZ, J., Y DE VILLELE, O. (1964): Besoins en eau de l'olivier et action de l'irrigation sur la production. Influence de la salure. Informations Oléicoles Internationales, n. serie n° 27, julio-agosto-septiembre 1964, págs. 11-26.

EVALUACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE HOJAS DE PERAL Y SU USO EN LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN CONDICIONES DE DÉFICIT HÍDRICO

Marsal, J. (P); Girona, J.; Mata, M.; Arbonés, A.

Resumen:

En un ensayo de ciclos de desecamiento en perales de 2 años de edad se ha valorado la potencial utilidad de 3 parámetros de estado hídrico de hoja [potencial hídrico de hoja al alba, (Ψ_{pd}); potencial hídrico de hoja al mediodía, (Ψ_{md}) y potencial hídrico de tallo al mediodía (Ψ_{stem})] para la ayuda a la programación del riego en condiciones de déficit, como por ejemplo en una estrategia de Riego Deficitario Controlado. De los tres parámetros valorados, el Ψ_{stem} , ha sido el que ha permitido establecer una relación más fiable, proporcional y menos variable estacionalmente con la conductancia estomática al mediodía. Como que la influencia de un mismo valor de Ψ_{pd} sobre el estado hídrico de la hoja durante el día, resultó dependiente de la estación, parece más recomendable el uso del Ψ_{stem} que del Ψ_{pd} para la ayuda en el pilotaje del riego en condiciones de déficit.

Summary:

In a two drought cycles study, the suitability of 3 leaf water status parameters [predawn leaf water potential, (Ψ_{pd}); midday leaf water potential, (Ψ_{md}) and midday stem water potential (Ψ_{stem})] have been assessed in the scope to help in irrigation scheduling under deficit conditions, for instance, Regulated Deficit Irrigation. From the three parameters, Ψ_{stem} was the most proportional and day to day steady to stomatal conductance variations. Since the influences of a concrete Ψ_{pd} value on diurnal leaf water status is different depending on the season, it seems more recommendable the use of Ψ_{stem} than Ψ_{pd} for irrigation scheduling monitoring under limited water resources.

1. Introducción.

Uno de los problemas que se plantea en la aplicación del riego deficitario controlado (RDC) radica en la determinación del nivel de estrés hídrico que el cultivo puede tolerar durante el periodo de restricción hídrica. En consecuencia es necesario establecer un criterio evaluador de ese estrés en base a un parámetro con suficiente significado sobre la fisiología de la planta y que no cambie en el curso del ciclo anual del cultivo. En condiciones de riego sin limitación de agua es suficiente con mantener el suelo cerca de capacidad de campo o aplicar el método del balance hídrico (Goldhamer, 1989). Pero en situaciones de riegos deficitarios, el contenido de agua en el suelo no sería un buen indi-

Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA).
Area de Tecnologia Frutícola.
Centre UdL-IRTA.
Alcalde Rovira Roure, 177. 25189 LLeida.

cador, pues su efecto sobre el estrés hídrico de la planta variará en función de la demanda evaporativa del momento (Denmead y Shaw, 1962; citado por McCutchan y Shackel, 1991). De entre los parámetros basados en la planta, el potencial hídrico medido antes del alba (Ψ_{pd}) es de los que ha gozado de mayor difusión dentro del ámbito de investigación en relaciones hídricas (Jones, 1990). Su mayor ventaja está en representar la disponibilidad de agua en el suelo después del equilibrio entre los potenciales del suelo y la planta, al que se llega al final de la noche (Xiloyanis, 1980). Recientemente, se han redescubierto las virtudes del potencial hídrico de tallo (Ψ_{stem}), por su sensibilidad en revelar los efectos de los tratamientos de riego y su incidencia sobre el comportamiento de la planta (McCutchan y Shackel, 1991; Naor *et al.*, 1995).

En el presente estudio se han planteado diferentes ciclos de desecamiento en perales, utilizando como parámetro base para la programación del riego el Ψ_{pd} . En este contexto, se han valorado las consecuencias de dicha programación sobre el contenido de agua en el suelo, el potencial hídrico de hoja y tallo al mediodía, utilizando en este caso, la conductancia estomática como parámetro estimador del estrés en planta. Con el fin de asegurar que el contenido de agua medido en el suelo reflejase las condiciones en las que se encuentran las raíces, se restringió el aparato radicular mediante su disposición en contenedores de 120 litros de capacidad. Con todo ello se pretende discutir si el uso del Ψ_{stem} podría mejorar la programación de una estrategia RDC en peral durante el periodo de riego deficitario.

2. Materiales y métodos.

El trabajo se realizó en la Finca de Corbins (Lleida) de la "Estació Experimental de Lleida" donde se semi-enterraron un total de 30 contenedores de 120 litros de capacidad a un marco de plantación de 5x4 m. El substrato estaba formado por una mezcla 3:1 (v:v) de tierra y turba. En la parte inferior del contenedor se colocaron 10 cm de grava para evitar la acumulación de agua en el fondo del mismo.

En los contenedores se habían plantado perales (*Pyrus comunis* L.) de dos años de edad del cv. "Williams" con intermediario "Mantecosa Hardy" y portainjerto membrillero "BA-29". Se distribuyeron homogéneamente entre los contenedores, 6 polinizadores del cv. "Harrow sweet".

Se instaló un sistema de riego localizado usando 2 goteros autocompensantes de 4 l/h por contenedor e incrementándolos a 8 durante el verano para reducir la heterogeneidad del área humectada dentro del contenedor. El sistema se controló con un programador de riego y electroválvulas. Los árboles se cultivaron conforme a las prácticas de la zona.

Se definieron 4 tratamientos de riego. El tratamiento de referencia (**Control**) se mantuvo bajo condiciones óptimas, usándolo además, como guía para el establecimiento de la dosis de riego, en base al potencial hídrico al alba (Ψ_{pd}) y la ETo de Penman (Doorenbos y Pruitt, 1977) que se obtuvo de la estación agroclimática más cercana (Xarxa Agrometeorològica de Catalunya; Generalitat de Catalunya, 1994). El tratamiento **CSP** (ciclo de estrés de primavera) consistió en una progresiva limitación del riego durante 27 días dentro del mes de mayo, en base a reducciones progresivas (de 80% a 20%) del porcentaje de agua aplicada en el **Control**. En el tratamiento **CSV** (ciclo de estrés de verano) se aplicó una progresiva limitación del agua de riego dentro del mes de julio

(durante 23 días), con el mismo criterio que el CSP. Por último, el tratamiento CSPV (ciclo de estrés de primavera y verano) fue una combinación del CSP y CSV, es decir, una aplicación de un ciclo de estrés durante la primavera con el mismo criterio que CSP y otra adicional en verano de la misma forma que CSV.

El contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se determinó por el sistema TDR (Dalton *et al.*, 1984) utilizando un analizador de cables metálicos (1502C Metallic TDR cable tester, Tektronix Inc.) de acuerdo con las ecuaciones propuestas por Topp *et al.* (1980). Las sondas de TDR consistían en tres varillas paralelas de acero inoxidable de 0.5 m. de profundidad. Se colocaron dos sondas por contenedor en posiciones opuestas dentro del mismo. Se utilizó el promedio de los valores determinados en las dos sondas para calcular semanalmente el θ_v .

El potencial hídrico al alba (Ψ_{pd}) y al mediodía (14:00 h.) (Ψ_{md}) se controló con una frecuencia entre 4 y 7 días durante el ciclo de estrés, usando la técnica de la bomba de presión (Scholander *et al.*, 1965) y siguiendo las recomendaciones de Turner y Long (1980). Estas lecturas se tomaron con la consola Soilmoisture (Model 3005, Soil Moisture Equipment Corporation, Santa Barbara, Calif.). El potencial hídrico de tallo (Ψ_{stem}) se determinó en el mismo momento del día que el Ψ_{md} , midiendo el potencial hídrico de hojas localizadas cerca del tronco o de una rama principal, que habían sido previamente cubiertas con una bolsa de plástico, a su vez, envuelta en lámina de aluminio, con dos horas de antelación a la toma de lectura.

La conductancia estomática (g_s) se determinó en hojas maduras expuestas directamente a la luz del sol y bajo condiciones de saturación lumínica en los mismos días, momento y hojas que Ψ_{md} , usando para ello un IRGA portátil (Model ADC LCA-2, The Analytical Development Co Ltd., Hoddesdon, Herts, U.K.). Para el cálculo de g_s se utilizaron las ecuaciones de von Caemmerer y Farquhar (1981).

Los contenedores se dispusieron en un diseño completamente aleatorizado, con 5 árboles por tratamiento. Se muestrearon 5 y 10 hojas por tratamiento para la determinación de los parámetros de potencial y g_s , respectivamente.

3. Resultados y discusión.

El riego en base al mantenimiento de Ψ_{pd} constantes a lo largo del ciclo del cultivo, ha conducido a pautas diferenciales, tanto de θ_v como de Ψ_{md} y Ψ_{stem} , a lo largo del ciclo. Mientras que los niveles de Ψ_{pd} se mantuvieron alrededor de -0.2 MPa en primavera y en -0.3 MPa en verano, para el Control (Fig 1A), los valores de Ψ_{md} en Control oscilaron entre un intervalo de -1.6 a -2.0 MPa y de forma más acusada en Ψ_{stem} de -0.7 a -1.3 MPa (Fig 1B, C). Esta menor estabilidad en los parámetros medidos al mediodía está probablemente relacionada con la variabilidad dependiente del día, en la relación Ψ_{md} , Ψ_{stem} vs. Ψ_{pd} (Fig. 2A, B). El hecho de que los parámetros de mediodía están sometidos a condiciones atmosféricas cambiantes de un día a otro mientras que el Ψ_{pd} siempre se mide en condiciones muy parecidas entre días, podría ser la razón subyacente de esta dependencia. En general, para idénticos valores de Ψ_{pd} , se obtuvieron valores más negativos de Ψ_{md} y Ψ_{stem} durante el verano (Fig 2A, B) (Día 208), con condiciones de

temperatura y DPV (deficit de presión de vapor) más altos que en primavera (Días 152, 156) (Fig 3).

Por otro lado, el θ_v en Control se mantuvo alrededor de 0.29 en verano, pero en primavera este osciló de un 0.25 a un 0.3 (Fig. 1D). Respecto a los tratamientos de estrés (CSP, CSV, CSPV), los parámetros de Ψ_{pd} , Ψ_{md} , Ψ_{stem} y θ_v mostraron una generalizada tendencia a disminuir sus valores conforme se reducía el agua aplicada. En base a Ψ_{pd} y al final de cada ciclo de estrés, los valores más negativos fueron similares entre primavera y verano -2.0 MPa (Fig 1A), sin embargo el θ_v fue apreciablemente diferente al final de ambos periodos, siendo mayor en verano con valores de 0.19 respecto los de primavera 0.15 (Fig 1D). En general, los valores mínimos de Ψ_{md} y de Ψ_{stem} fueron más negativos al final del ciclo de verano que en el de primavera, a pesar del mayor contenido de θ_v agua en el suelo y de ser similares los valores de Ψ_{pd} registrados al final de verano (Fig 1A, B, C, D). Todo ello es indicativo del efecto estacional, de los niveles de θ_v , inferiores a los de capacidad de campo, sobre el estrés de la planta.

Uno de los requerimientos más importantes que debe reflejar un parámetro valorador del nivel de estrés, es su incidencia sobre los procesos productivos de la planta. En este estudio, se ha estimado el funcionamiento de la planta mediante la g_s medida al mediodía. Las correlaciones lineales establecidas entre los parámetros de hoja con la g_s indicaron al Ψ_{stem} como el parámetro mejor relacionado con g_s (Tabla 1). El menor coeficiente de correlación de los otros parámetros se debe a que presentaron una respuesta del tipo

Tabla 1. Correlaciones lineales entre los parámetros de estado hídrico de la hoja y la conductancia estomática.

Relación entre parámetros	Coefficiente de correlación	Probabilidad
g_s vs. Ψ_{stem}	0.814	0.0001
g_s vs. Ψ_{md}	0.706	0.0001
g_s vs. Ψ_{pd}	0.737	0.0001
g_s vs. $\Psi_{md} - \Psi_{stem}$	0.749	0.0001

umbral, con relaciones del tipo potencial negativa (Fig 3A, B, C). Este tipo de respuesta umbral no permite establecer un adecuado discernimiento entre los diferentes niveles de estrés hídrico. En el caso de Ψ_{pd} solo se podría establecer una distinción entre dos estados: condiciones óptimas de riego con valores de Ψ_{pd} superiores a -0.5 MPa y riego deficiente con valores más negativos de -1.0 MPa (Fig. 3C). Por

contra, el tipo de relación más lineal entre Ψ_{stem} y g_s si que permitió una mejor gradación de los diferentes niveles de g_s . Cabe señalar, sin embargo, que las relaciones Ψ_{stem} vs. g_s , Ψ_{md} vs. g_s y Ψ_{pd} vs. g_s presentaron una clara dependencia sobre tipo de las características ambientales del día (Fig 3A, B). De las tres relaciones citadas, y a tenor de la distancia entre sus curvas con los diferentes días, parece ser, la relación Ψ_{pd} vs. g_s , la más afectada por las diferencias entre días. Ello no es de extrañar pues se está relacionando dos parámetros con una sensibilidad muy diferente sobre las condiciones ambientales diurnas.

4. Conclusiones.

Aunque la utilización del Ψ_{pd} es un excelente indicador para la programación de riegos, en condiciones de déficit hídrico, el uso de Ψ_{stem} puede aportar una información más fiable del nivel de estrés que sufre la planta durante el día.

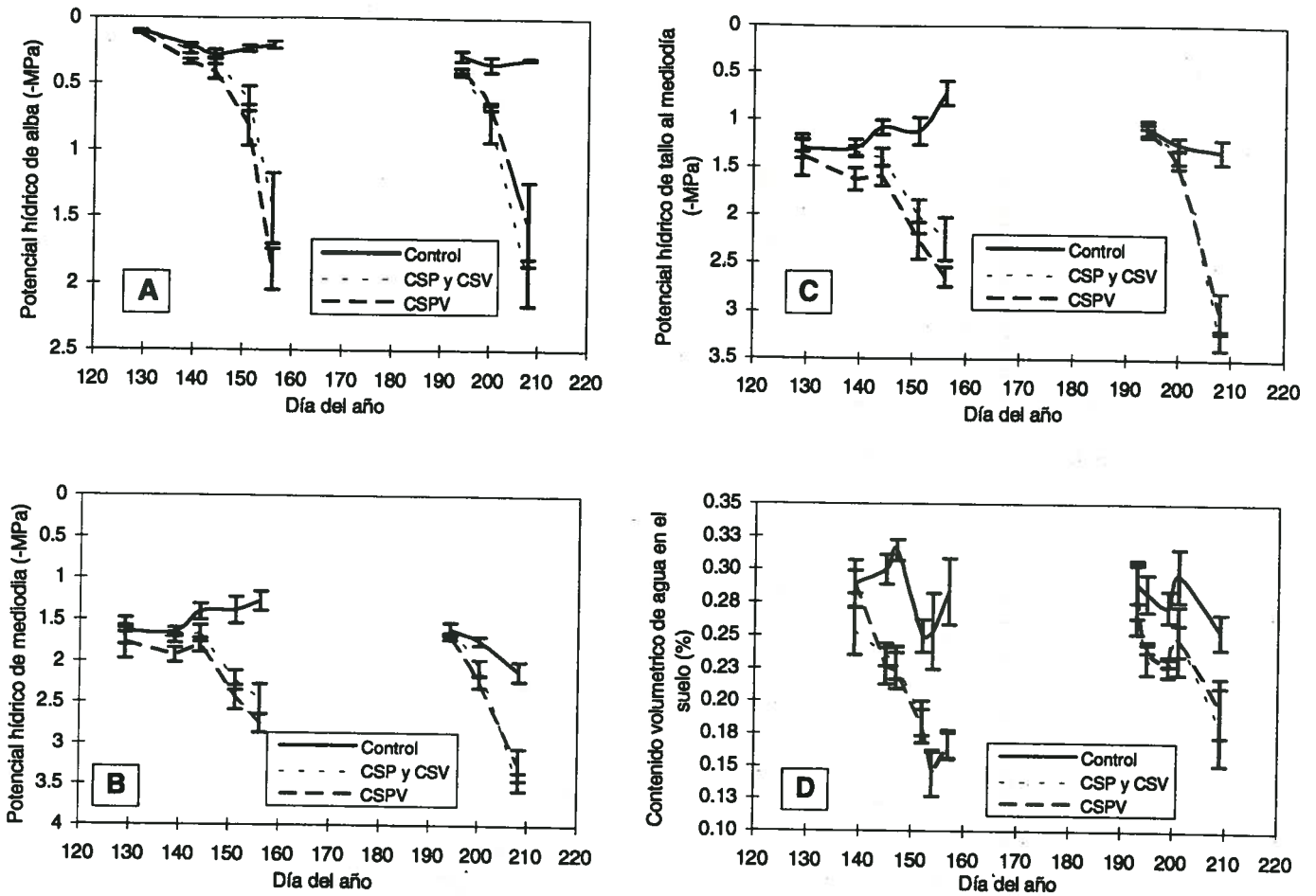


Figura 1. Evolución de los parámetros: (A) Potencial hídrico de hoja al alba (Ψ_{pd}); (B) Potencial hídrico de hoja al mediodía (Ψ_{md}); (C) Potencial hídrico de tallo al mediodía (Ψ_{stem}); (D) Contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) en respuesta a los diferentes tratamientos de riego en los dos ciclos de desecamiento. La línea gruesa continua representa el tratamiento Control, la línea gruesa discontinua el CSPV y la línea delgada discontinua los tratamientos CSP y CSV. Cada punto es la media de 5 lecturas \pm Error estándar.

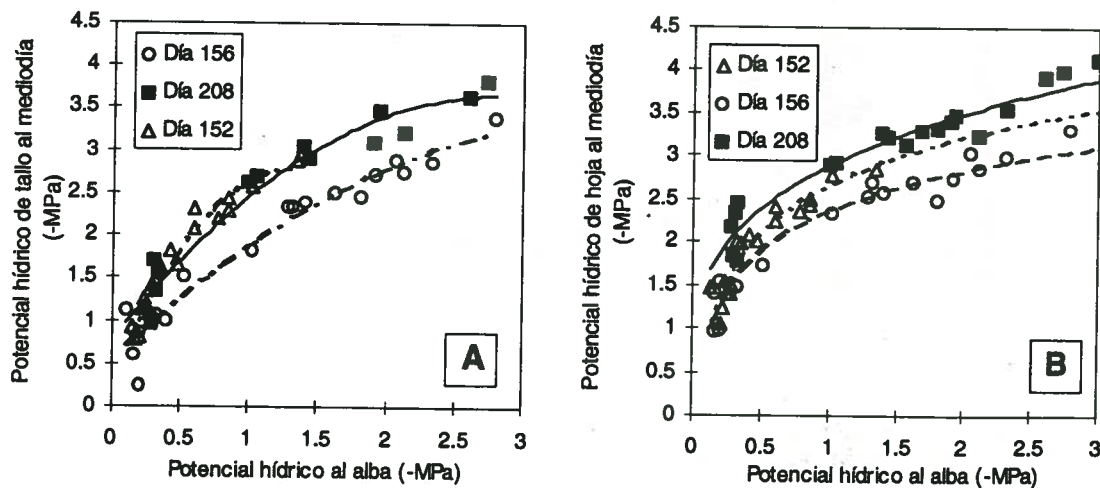


Figura 2. Relación entre el potencial hídrico al alba (Ψ_{pd}) vs. el potencial hídrico de tallo al mediodía (Ψ_{stem}) (A) y el potencial hídrico de hoja al mediodía (Ψ_{md}) (B) en diferentes días. Cada punto representa un único árbol.

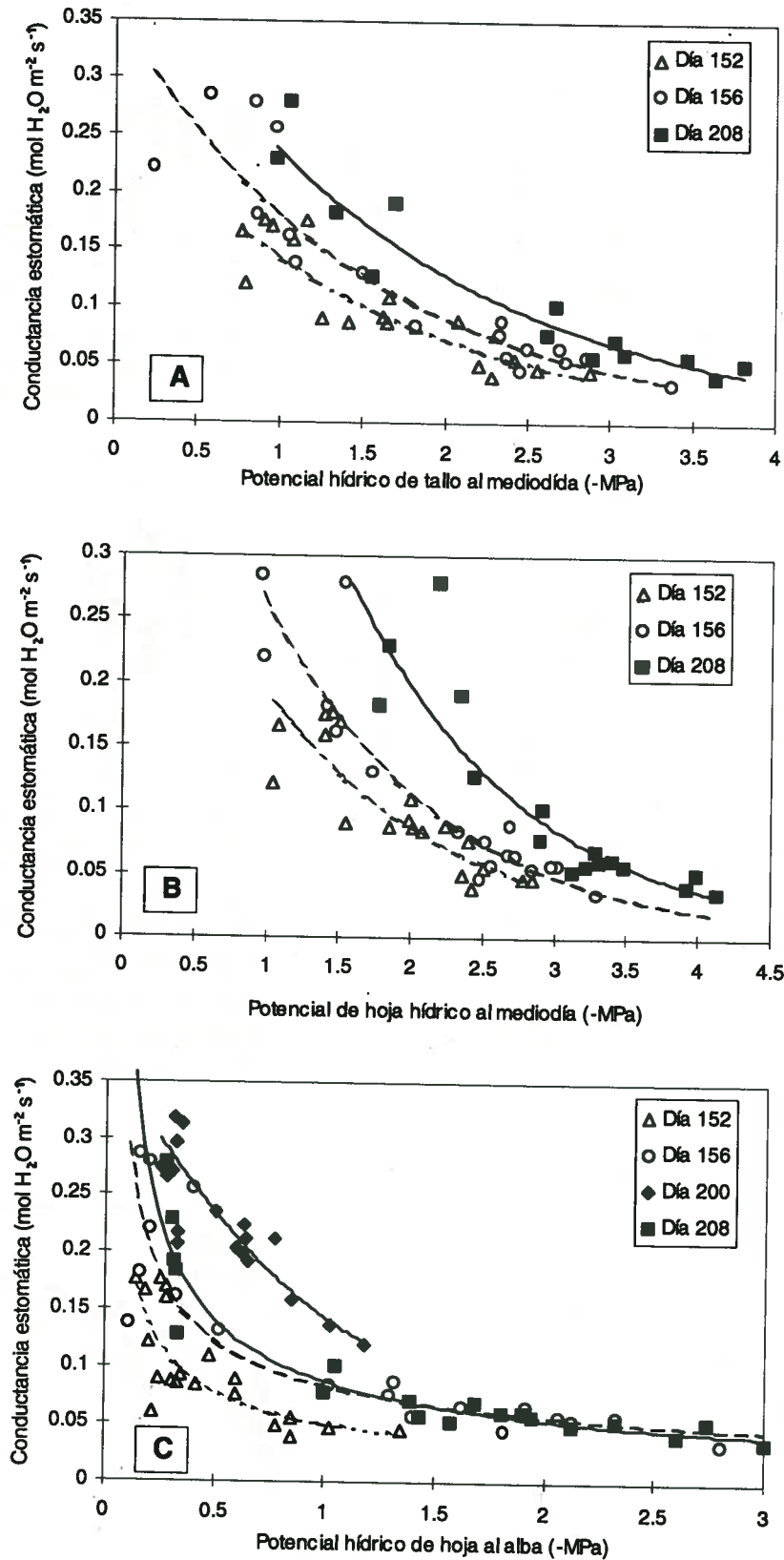


Figura 3. Relación entre la conductancia estomática al mediodía y el potencial hídrico de tallo al mediodía (A), el potencial hídrico de hoja al mediodía (B) y el potencial hídrico al alba (C) en tres (A,B) y cuatro días del año (C). Los trazos curvilíneos son los ajustes para cada día, de funciones exponenciales negativas para (A,B) y potenciales negativos para (C). La media horaria a las 14:00 h. de temperatura y déficit de presión de vapor, respectivamente, son: Día 152 (23.4 °C, 1.86 kPa); Día 156 (27.8 °C, 2.31 kPa); Día 200 (37.9 °C, 3.75 kPa); Día 208 (32.7 °C, 2.81 kPa).

Bibliografia:

- Chalmers DJ, Mitchell PD, van Heek L. 1981. Control of peach growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106(3):307-312.
- Dalton, F.N., W.N. Herkelrath, D.S. Rawlins, y J.D. Rhoades, 1984. Time-Domain Reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science* 224 (June, 1984): 989-990.
- Doorenbos J, and Pruitt WO. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper N°24. FAO, Rome, Italy, pp 194.
- Garnier, E. and A. Berger. 1985. Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. *J. Hort. Sci.* 60(1):47-56.
- Generalitat de Catalunya. 1994. PAC-COM. Version 2.00 (Manual reference). Survey Center of "Xarxa Agrometeorològica de Catalunya.
- Girona, J., M. Mata, D.A. Goldhammer, R.S. Johnson and T.M. DeJong. 1993. Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118(5):580-586.
- Goldhamer, D. 1989. Irrigation scheduling: A guide for efficient on-farm water management. Univ. of California. Div. of Agr. and Nat. Res. Publ. 21454.
- Jones, H.G. 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience* 20(1):19-26.
- McCutchan, H. and Shackel, K.A. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French) *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117(4):607-611.
- Naor, A., I. Klein, y I. Doron. 1995. Stem water potential and apple size. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120(4):577-582.
- Scholander P, Hammel H, Bradstreet E, Hemmingsen E. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148:339-345.
- Topp, G.C., J.L. Davis, y A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16:574-582.
- Turner NC, Long MJ. 1980. Errors arising from rapid water loss in the measurement of leaf water potential by the pressure chamber technique. *Austral. J. Plant Physiol.* 7:527-537.
- von Caemmerer S, Farquhar GD. 1981. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153:376-387.
- Xiloyanis, C., K. Uriu, y G.C. Martin. 1980. Seasonal and diurnal variations in abscisic acid, water potential, and diffusive resistance in leaves from irrigated and non-irrigated peach trees. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 105:412-415.

COMPARACION DE LOS VALORES DE LAS DOTACIONES NETAS DE RIEGO EN LAS CUENCAS DEL DUERO, TAJO JUCAR Y EBRO

Metodologías: Blaney-Criddle, Penman y Penman-Monteith

H. Castillo Hernando¹
C. Notario Bodelón² (P)

CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRAFICOS del
CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS (CEDEX) del
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTES Y MEDIO AMBIENTE
(MOPTMA)

Resumen

Se pretende dar a conocer los resultados obtenidos en la determinación de dotaciones de riego máximas en las cuencas del Duero, Tajo, Júcar y Ebro por los métodos propugnados por la FAO, el de Blaney-Criddle y el de Penman, Modificados, así como su comparación entre sí, y en relación a la nueva metodología Penman-Monteith, recientemente incorporada como "método combinado", que parece ser da valores más próximos a los valores reales de las dotaciones.

Los cuadros comparativos, de los valores de dotaciones tanto para la hectárea representativa de una zona regada determinada, como los valores medios o promedios de un grupo de cultivos en concreto, permiten establecer ciertas conclusiones, aunque no definitivas hasta no constatarlos en otras cuencas, como se está haciendo en la actualidad.

Summary

The aim is to communicate the results obtained in the calculation of the maximum irrigation provisions in the Duero, Tajo, Júcar and Ebro Basins by the methods proposed by the FAO, namely the Modified Blaney-Criddle and Penman methods, as well as the comparison between the two, and also the new Penman-Monteith methodology, recently incorporated as a "combined method", and which would seem to give the closest to the real provision values.

¹ Doctor Ingeniero Agrónomo y Economista. Jefe de la División de Regadíos del C.E.H.

² Ingeniero Agrónomo. Jefe de Sección de la División de Regadíos del C.E.H.

The comparative tables of provision values, both for the representative hectare of a given irrigated zone, and the mean or average values of a specific crop group, allow us to draw certain conclusions, although they shall not be definitive until they can be verified in other Basins, a task which is currently being carried out.

1. Introducción

Este trabajo que se presenta a este XIV Congreso Nacional de Riegos, pretende ser un aporte que permita la comparación entre los resultados obtenidos, en el cálculo de dotaciones netas, por tres de las metodologías más al uso.

En las Jornadas celebradas en Pamplona, se mostraron en una comunicación los valores de las dotaciones netas obtenidas para las Cuencas del Duero y del Tajo, según las 3 metodologías: Blaney-Criddle Modificado, Penman Modificado y el más moderno de Penman-Monteih.

Concluidos los trabajos de "Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la Cuenca del Júcar", y encontrándose en avanzado estado de gestación los trabajos correspondientes al de "Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la Cuenca del Ebro", cuya realización le ha sido encomendada al Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX por el MOPTMA, a través de convenio suscrito con la Dirección General de Obras Hidráulicas, nos ha parecido oportuno presentar esta comunicación desde el Sector de Regadíos del citado Centro de Estudios Hidrográficos, que es quien ha materializado la elaboración de los trabajos citados.

Disponiendo pues, de los valores de las dotaciones de riego de estas cuatro Cuencas, Duero, Tajo, Júcar y Ebro (esta con valores provisionales), heterogéneas en los aspectos meteorológicos y culturales, estimamos interesante que, a efectos sobre todo de planificación, se analicen aunque sea someramente por las limitaciones administrativas que demanda la Organización del XIV Congreso Nacional de Riegos, los resultados obtenidos por las metodologías, Blaney-Criddle Modificado, Penman Modificado y Penman Monteih, tanto comparando los valores hallados para cada método, para una misma cuenca, como las variaciones que se puedan dar entre los resultados encontrados en las diferentes cuencas para un mismo método.

Al tener la posibilidad de comparar los valores de dotaciones netas reales aplicadas en zonas concretas de cada cuenca, con las obtenidas para esa misma zona y cuenca por las metodologías que amparan procedimientos heurísticos, nos permite contrastar valores reales con valores teóricos, hallados científicamente, y establecer los grados de aproximación y validación de cada uno de los métodos.

2. Materiales y métodos

Con esta comunicación lo que se trata, fundamentalmente, es dar a conocer los valores de las dotaciones netas de riego en las cuatro cuencas citadas obtenidas por la nueva metodología Penman-Monteih. Además, la comparación de estos valores con los

calculados por las otras metodologías, ya clásicas, como la de Blaney-Criddle y Penman, posibilitan el conocimiento de sus afinidades y discordancias en determinados supuestos.

Por otra parte, como ya ha quedado indicado, el conocimiento de valores reales de dotaciones netas en zonas de riego concretas, permite efectuar el contraste de dichos valores con los de los valores hallados por las tres metodologías empleadas. Así se pueden inducir, por comparaciones, cual de los métodos empleados se aproxima más a la realidad.

No obstante, los resultados así obtenidos, por ser inferidos, producto de una "muestra", no dan conclusiones ciertas en la extrapolabilidad a otras zonas. La información básica utilizada, concretada en datos meteorológicos históricos y aplicados a las fórmulas de los diferentes métodos, son los que corresponden a cada estación meteorológica ubicada en los lugares más idóneos de la zona en estudio. Así, cada método obtiene sus propios valores de ET_0 .

Con los datos de dedicación productiva de la zona (la histórica, la prevista tentativamente, considerando las limitaciones de PAC, .., etc). y el conocimiento de los ciclos y fases de desarrollo vegetativo de cada cultivo, se obtienen los correspondientes K_c , y mediante el producto $ET_0 \times K_c$ se hallan las ET_c , evapotranspiración correspondiente a cada cultivo.

A partir del balance hídrico, en el que se tienen en cuenta la P_e (Precipitación efectiva) y A_a (Agua aportada por el suelo), se deducen los valores de las dotaciones de riego o necesidades hídricas de un cultivo determinado. Este balance hídrico que no es más que la diferencia entre las ET_c (que se identifica como las "pérdidas" o "demandas" de agua) y $P_e + A_a$ (que se identifica con las "ganancias" u "ofertas" de agua) calculada en términos mensuales, constituye la demanda mensual neta para cada cultivo, siendo su suma mensual el valor de la dotación anual neta de riego del cultivo en cuestión.

Los trabajos que respaldan lo que aquí se quiere sintetizar referidos a "Dotaciones Duero", "Dotaciones Tajo", "Dotaciones Júcar" y "Dotaciones Ebro" que se indican como títulos abreviados de los referidos en el apartado 1. Introducción, constan, en general, de los documentos: Memoria, Anejos (31) y Mapas. La enorme cantidad de datos referidos a los aspectos meteorológicos y agronómicos implicados en fórmulas complejas, su tratamiento informático, y la consideración de algunas eventualidades, hace que los resultados y su consiguiente análisis y conclusiones tengan en muchas ocasiones connotaciones no todo lo rigurosas que se hubiesen deseado.

En coherencia con estas indicaciones, parece lógico puntualizar lo siguiente:

1. Los resultados, extraídos de los documentos citados, deben concebirse en el contexto general de una Planificación, o sea, su validez queda limitada por su objetivo que es el de obtener unos valores de demandas unitarias que posibiliten el cálculo de las demandas globales de agua en regadíos, de utilidad para la planificación hidrológica de una cuenca concreta.

2. Los valores hallados no deben ser necesariamente coincidentes con los que resultasen de un cálculo puntual, en un lugar determinado y para una explotación y cultivo que reúna unas características singulares.
3. En cuanto al concepto manejado de DOTACIÓN DE RIEGO (m^3/ha y año) es el de uso habitual en planificación, diseño y explotación de regadíos y se identifica con las necesidades hídricas de un cultivo o grupo de ellos, en condiciones óptimas de desarrollo y que, consecuentemente, produce rendimientos máximos (Kg/ha y año). Este rendimiento máximo se concibe como el que le corresponde a una variedad de gran producción adaptada a un ambiente dado, que no tiene limitaciones en los factores de desarrollo (agua, nutrientes, plagas, enfermedades, condiciones físicas del suelo, ..., etc.) que evapotranspira la evapotranspiración máxima ET_c , que genera la "dotación de riego máxima".

3. Resultados

En el siguiente cuadro nº 1, se incluyen para cada Cuenca analizada y para cada uno de los tres métodos aplicados, los valores obtenidos para los cultivos mas representativos, comunes a las cuatro cuencas, con objeto de posibilitar una comparación coherente basada en la mayor homogeneidad posible.

Las cifras halladas, quieren expresar los valores promedios de las dotaciones netas de riego, en m^3/ha , en las Cuencas del Tajo, Duero, Júcar y Ebro. Dichos valores se han extraído de las respectivas Memorias de los documentos elaborados para cada cuenca, cuya estructura de trabajo ya se ha indicado someramente en los apartados anteriores.

De la comparación realizada se deduce que para las cuencas del Duero y del Tajo, en todos los cultivos estudiados, los valores mas pequeños se han dado con la metodología Penman-Monteith, con la única excepción de los obtenidos para patata temprana que en ambas cuencas son ligeramente inferiores los hallados por método Blaney-Criddle, y para lechuga, que en la Cuenca del Tajo son también ligeramente mas pequeños en Blaney-Criddle.

Las diferencias mas acusadas para los valores de estas dos cuencas, al comparar Penman y Penman-Monteith, se dan en alfalfa ($2.290 m^3/ha$) C. del Duero, y las diferencias mínimas en coliflor ($311 m^3/ha$) también en la Cuenca del Duero. No obstante las relaciones por cociente no son tan significativas, resultando respectivamente 1,47 y 1,37.

Estas relaciones por cociente, que reflejan mejor que las que resultan por diferencia, tienen para estas dos cuencas (Duero y Tajo) unos valores máximos para el olivo 1,76 en Cuenca Duero y para lechuga 1,64 también en Cuenca Duero. Los valores mínimos, han resultado ser para maíz forrajero 1,19 en Cuenca Tajo y para maíz grano 1,21 en Cuenca Tajo. Todas estas relaciones son consecuencia de comparar las metodologías que dan valores máximos en las dotaciones frente a la de valores mínimos, es decir, Penman "VS" Penman-Monteith.

Analizando las cuencas (Júcar y Ebro) se observa una característica común a las otras dos cuencas estudiadas (Duero y Tajo) y es que para todos los cultivos en las 4 cuencas los valores más altos de las dotaciones se han obtenido por la metodología Penman Modificado. Pero para Júcar y Ebro los valores más bajos no resultan ser siempre para la metodología Penman-Monteith (como ocurría para Duero y Tajo, con la excepción señalada), sino que para la Cuenca Júcar, en 7 cultivos de los 20 estudiados, dan valores inferiores para metodología Blaney-Criddle Modificado, y estos son mayoritarios en Cuenca Ebro, 14 de los 20 analizados (aunque, 7 u 8 de ellos sus valores son prácticamente los mismos en Blaney-Criddle que en Penman-Monteith).

Las relaciones más significativas por cociente entre los valores más altos de dotaciones (siempre Penman Modificado) y los mas bajos (unas veces los de Blaney-Criddle Modificado y otras los de Penman-Monteith) se han dado en los siguientes cultivos:

	<u>Máx.</u>	<u>Mín.</u>	<u>Cultivo</u>	<u>Metodología</u>
Cuenca del Júcar	1,61	-	Patata Temprana	Blaney-Criddle
	1,43	-	Lechuga	Blaney-Criddle
	-	1,16	Arroz	Penman-Monteith
	-	1,20	Coliflor	Blaney-Criddle
Cuenca del Ebro	1,96	-	Patata Temprana	Blaney-Criddle
	1,49	-	Lechuga	Blaney-Criddle
	-	1,14	Arroz	Penman-Monteith
	-	1,22	Maíz grano	Penman-Monteith

También, observando el cuadro nº 1, al que nos estamos refiriendo, se puede analizar los valores de las dotaciones para cada cultivo en cada una de las cuatro Cuencas, comparándolos entre sí independientemente de cual sea la metodología empleada, viendo por ejemplo que para el girasol los valores mas altos se dan en la Cuenca Tajo, como así ocurre prácticamente para todos los cultivos, y, además en casi todas las metodologías.

Veamos en cada una de las cuencas analizadas, la comparación de los resultados obtenidos para los valores medios de dotaciones netas de riego, en la hectárea representativa de determinadas zonas de riego.

Se ha elegido en el caso de la cuenca del Ebro, provincias con una dedicación cultural igual o superior a las 1000 has., en riego, y en ella, aquellas zonas con mayor peso específico en cuanto a superficie cultivada y regada.

Para las otras cuencas (Duero, Tajo y Júcar) se han seleccionado zonas, ubicadas en provincias cuyas superficies representativas en ambas, reúnan similares características a las indicadas para la cuenca del Ebro.

Cuadro 1: Valores promedio de dotaciones netas de riego (m³/ha) en las Cuencas del Duero, Tajo, Ebro y Júcar

Cultivos	Blaney-Criddle Modificado				Penman Modificado				Penman-Monteih			
	Duero	Tajo	Júcar	Ebro	Duero	Tajo	Júcar	Ebro	Duero	Tajo	Júcar	Ebro
	Arroz	-	14.948	12.164	13.518	-	16.356	13.885	15.056	-	14.192	11.982
Girasol	3.108	4.511	4.049	3.960	3.783	5.090	4.568	4.860	2.644	3.971	3.576	3.889
Maíz grano	4.018	5.946	4.035	4.364	4.937	6.522	4.738	5.325	3.388	5.384	3.800	4.353
Patata tem.	1.143	1.615	1.244	1.050	2.020	2.534	2.001	2.063	1.166	1.700	1.477	1.444
Patata m.e.	2.837	4.110	3.089	3.271	3.523	4.979	3.944	4.507	2.369	3.795	2.958	3.375
Remolacha azucarera	4.824	6.530	5.287	3.411	6.040	7.204	6.149	4.448	4.113	5.866	5.032	3.522
Tabaco	-	5.381	3.611	3.128	-	6.280	4.726	4.395	-	4.883	3.612	3.046
Alfalfa	5.341	7.542	6.114	5.817	7.118	8.960	7.626	7.821	4.828	7.132	5.994	6.024
Maíz forrajero	3.292	4.998	3.463	2.459	4.066	5.431	4.050	3.027	2.758	4.537	3.241	2.466
Cebolla	3.214	5.525	3.701	3.751	4.118	6.224	4.631	4.976	2.792	4.998	3.557	3.783
Coliflor	874	2.922	801	2.200	1.149	3.443	965	2.773	838	2.869	889	2.317
Judía verde	2.132	3.116	2.324	2.447	2.748	3.434	2.838	3.151	1.810	2.772	2.162	2.425
Lechuga	1.291	1.208	623	1.001	1.838	1.753	890	1.495	1.123	1.236	680	1.058
Melón	3.238	4.104	3.104	3.171	3.991	4.685	4.009	3.800	2.738	3.706	3.088	3.074
Pimiento	3.042	4.439	2.647	3.677	3.756	4.900	3.387	4.766	2.586	3.943	2.552	3.692
Tomate	3.161	4.984	3.461	3.585	3.886	5.429	4.231	4.699	2.677	4.431	3.275	3.617
Cítricos	-	5.285	4.010	4.602	-	6.415	5.234	5.921	-	5.064	4.086	4.711
Frutales hoja caduca	4.780	6.677	4.743	5.059	6.218	7.715	5.832	6.629	4.143	6.133	4.515	5.138
Olivo	2.249	3.789	2.943	3.349	3.092	4.597	3.995	4.730	1.752	3.526	3.096	3.640
Vid	4.003	5.096	4.030	4.248	5.219	5.884	5.070	5.338	3.461	4.712	4.035	4.241

Los cuadros siguientes, 2 a 5, recogen pues, los valores medios de las dotaciones netas de la hectárea representativa en las zonas de riego de las cuencas del Duero (cuadro nº 2), cuenca del Tajo (cuadro nº 3), cuenca del Júcar (cuadro nº 4) y cuenca del Ebro (cuadro nº 5), para los tres métodos: Blaney-Criddle modificado, Penman modificado y Penman-Monteith. También se incluyen en dichos cuadros, las relaciones existentes, por cociente y por diferencia, entre las metodologías Blaney-Criddle y Penman y la nueva de Penman-Monteith denominada "método combinado".

En la Cuenca del Duero (cuadro nº 2), en todas las zonas seleccionadas, los valores Penman son superiores a los obtenidos por las otras dos metodologías; también se puede constatar que los valores Penman-Monteith son, también para todas las zonas, inferiores a las demás dotaciones halladas por los otros dos métodos.

Estos resultados se corresponden con los valores de las relaciones por cociente y por diferencia, pues respecto a las primeras, dicha relación es siempre mayor que la unidad, lo que conlleva valores más bajos de dotaciones para todas las zonas obtenidos por la metodología Penman-Monteith. Las relaciones más extremas entre "Blaney-Criddle y Penman-Monteith" se dan en la "Zona Segovia" (cociente 1,19) y en la "Zona Avila" (cociente 1,01), y analizado por las diferencias en m^3/ha , los valores máximos y mínimos son los de "Zona Toro-Zamora" (diferencia 766) y "Zona Avila" (diferencia 52).

Las otras relaciones extremas, las dadas en la comparación entre "Penman y Penman-Monteith", se encuentran en "Zona Toro-Zamora" (cociente 1,38) y "Zona Porma M.I." (cociente 1,51); analizando la relación por diferencias en m^3/ha , los valores máximos y mínimos corresponden respectivamente a "Zona Campillo" (diferencia 1848) y "Zona Segovia" (diferencia 1121).

En la Cuenca del Tajo (cuadro nº 3), para todas las zonas seleccionadas, también los valores de las dotaciones por método Penman son superiores a la metodología Penman-Monteith. Igualmente, con la nueva metodología Penman-Monteith, se han obtenido los valores más pequeños en todas las zonas seleccionadas en comparación con las de los otros dos métodos. No obstante, en general, los valores, tanto en la relación por cociente, como por diferencia, están más próximos que en los hallados para la Cuenca del Duero, y en las relaciones por cociente son todas superiores a la unidad pero más próximas a ella.

Las relaciones más extremas entre "Blaney-Criddle y Penman-Monteith" se dan en la "Zona Cáceres" (cociente 1,10) y en las "Zonas Bornova y Henares" (cociente 1,00) donde prácticamente se identifican los valores obtenidos por ambos métodos; analizados por la diferencia, en m^3/ha , los valores máximo y mínimo corresponden respectivamente a "Zona Cáceres" (diferencia 465) y "Zona Henares" (diferencia 9).

Comparando las relaciones Penman "VS" Penman-Monteith en sus valores extremos por cociente y por diferencia, se tiene un máximo en "Zona Montes Navahermosa" (cociente 1,31) y "Zona Cáceres" (cociente 1,22) siendo los correspondientes a la relación por diferencia en m^3/ha "Zona Montes Navahermosa" (diferencia 1316) y "Zona Campiña" (diferencia 996).

Analizando la Cuenca del Júcar (Cuadro nº 4) se puede observar que, a diferencia de las otras dos cuencas estudiadas -Duero y Tajo-, en ésta no existe unanimidad en cuanto a que los valores obtenidos por metodología Penman-Monteith, sean en todas las zonas los que resulten con los valores de dotaciones mas pequeñas. Existen 3 zonas (Sierra Alcaraz, Plana Baja y Sierra Albarracín) donde por el método Blaney-Criddle las dotaciones requeridas son las menores. Se sigue manteniendo en esta cuenca el hecho de que los valores mas elevados se corresponden al método Penman.

Las relaciones por cociente y diferencia de las 3 zonas donde han resultado ser menores los "valores Blaney-Criddle" que los "valores Penman-Monteith" son, respectivamente:

Sierra Alcaraz	0,91	-290 m ³ /ha
Sierra Albarracín	0,97	-112 "
Plana Baja	0,98	- 96 "

Por último veamos los resultados obtenidos por los tres métodos en sus valores medios de dotaciones de la hectárea representativa en la Cuenca del Ebro (cuadro nº 5). De las 10 zonas seleccionadas y analizadas, solo en 4 de ellas los valores hallados por método Penman-Monteith son inferiores a los obtenidos por los otros métodos, siendo en una de las zonas su valor prácticamente igual al obtenido por el método Blaney-Criddle.

En las 5 zonas restantes los valores mas pequeños de las dotaciones se han dado en los cálculos por el método Blaney-Criddle.

En todas las zonas seleccionadas y estudiadas, los valores de las dotaciones de menor cuantía han resultado ser los hallados por el método de Blaney-Criddle. También, como era de esperar, los mayores valores para todas las zonas de la cuenca se han obtenido en las dotaciones correspondientes a la metodología Penman.

Las relaciones por cociente y diferencia máximos y mínimos entre los valores de las 3 metodologías, tomando por comparación con la de Penman-Monteith, corresponden a la "Zona Lleida", 1,11, y a "Zona Ejea de los Caballeros" 0,90 en relación por cociente entre Blaney-Criddle y Penman-Monteith y a la "Zona Lleida", 462 m³/ha, y -490 m³/ha, en su relación por diferencia. Estas relaciones extremas entre Penman y Penman-Monteith, corresponden a la "Zona Espejo", 1,47, y a "Zona Amposta" 1,17 en su relación por cociente; en la relación por diferencia, la máxima se da en "Zona Sariñena", 1833 m³/ha, y la mínima a la "Zona Espejo" con 748 m³/ha.

Son significativos los valores absolutos de las dotaciones correspondientes a la "Zona Amposta", "Zona de Sariñena" y en menor grado a la "Zona Alcañiz", que se apartan mucho de las demás Zonas relacionadas y analizadas. En el caso de la "Zona Amposta" la justificación viene dada por el peso específico, alrededor del 60% sobre el total de su superficie, que representa el cultivo del arroz. Para las otras dos zonas, es el propio cultivo del arroz en mucha menor proporción, y el cultivo de la alfalfa, que tiene un consumo hídrico más elevado, las razones de sus mayores valores obtenidos en el cálculo de sus dotaciones.

Cuadro 2: Valores medios dotaciones netas de riego (m³/ha) de la ha. representativa en zonas de la C. Duero

Zona	Blaney-Criddle (1)	Penman (2)	Penman-Monteih (3)	Relaciones			
				(1)/(3)	(2)/(3)	(1)-(3)	(2)-(3)
Avila	4.257	5.878	4.205	1,01	1,40	52	1.673
Arlanzón	3.438	4.362	3.021	1,14	1,44	417	1.341
Porma M.I.	3.186	4.516	2.997	1,06	1,51	189	1.519
Castilla Norte	3.412	4.903	3.273	1,04	1,50	139	1.630
Villagonzalo	4.417	5.483	3.771	1,17	1,45	646	1.712
Segovia	3.317	3.916	2.795	1,19	1,40	522	1.121
Campillo	4.181	5.714	3.866	1,08	1,48	315	1.848
Tordesillas	4.040	5.330	3.561	1,13	1,50	479	1.769
Toro-Zamora	4.939	5.764	4.173	1,18	1,38	766	1.591

Cuadro 3: Valores medios dotaciones netas de riego (m³/ha) de la ha. representativa en zonas de la C. Tajo

Zona	Blaney-Criddle (1)	Penman (2)	Penman-Monteih (3)	Relaciones			
				(1)/(3)	(2)/(3)	(1)-(3)	(2)-(3)
Cáceres	5.107	5.683	4.642	1,10	1,22	465	1.041
Bomova	3.970	4.985	3.959	1,00	1,26	11	1.026
Henares	4.013	5.045	4.004	1,00	1,25	9	1.041
Campaña	4.029	4.881	3.885	1,04	1,26	144	996
Alcarria Baja	3.883	4.814	3.802	1,02	1,27	81	1.012
Area M. Madrid	4.966	6.114	4.947	1,00	1,24	19	1.167
Sagra-Toledo	4.621	5.778	4.454	1,04	1,30	167	1.324
Montes Mavahermosa	4.374	5.569	4.273	1,02	1,31	101	1.316

Cuadro 4: Valores medios dotaciones netas de riego (m³/ha) de la ha. representativa en zonas de la C. Júcar

Zona	Blaney-Criddle (1)	Penman (2)	Penman-Monteih (3)	Relaciones			
				(1)/(3)	(2)/(3)	(1)-(3)	(2)-(3)
Centro	4.200	5.219	4.147	1,01	1,26	53	1.072
Mancha-Manchuela	4.420	5.420	4.318	1,02	1,26	102	1.102
Sierra Alcaraz	2.979	4.347	3.269	0,91	1,33	-290	1.078
Almansa	4.579	5.615	4.442	1,03	1,26	137	1.173
Bajo Vinalopó	4.409	5.471	4.334	1,02	1,26	75	1.137
Plana Baja	3.981	4.181	4.077	0,98	1,03	-96	104
Serranía Cuenca	5.044	5.429	4.066	1,24	1,34	978	1.363
S. Albarracín	3.163	4.245	3.275	0,97	1,30	-112	970
Valencia	5.593	6.733	5.529	1,01	1,22	64	1.204

Cuadro 5: Valores medios dotaciones netas de riego (m³/ha) de la ha. representativa en zonas de la C. Ebro

Zona	Blaney-Criddle (1)	Penman (2)	Penman-Monteih (3)	Relaciones			
				(1)/(3)	(2)/(3)	(1)-(3)	(2)-(3)
Espejo	1.620	2.327	1.579	1,03	1,47	41	748
Belorado	2.608	3.500	2.610	1,00	1,34	-2	890
Sarriena	6.165	8.322	6.489	0,95	1,28	-324	1.833
Lleida	4.811	5.741	4.349	1,11	1,32	462	1.392
Tudela	3.597	4.886	3.851	0,93	1,27	-254	1.035
Logroño	3.837	5.426	4.064	0,94	1,34	-227	1.362
Arcos de Jalón	4.218	5.709	4.202	1,00	1,36	16	1.507
Amposta	9.649	11.166	9.581	1,01	1,17	68	1.585
Alcañiz	5.668	7.598	5.949	0,95	1,28	-281	1.649
Ejea de los Caballeros	4.414	6.225	4.904	0,90	1,27	-490	1.321

4. CONCLUSIONES

Del análisis efectuado, realizado en los resultados obtenidos en el apartado anterior, se pueden extraer dos tipos de conclusiones: A) Según se consideren los valores promedio de las dotaciones netas de riego para los 20 cultivos estudiados, comunes a las 4 cuencas, Duero, Tajo, Ebro y Júcar, y B) según se comparen los valores medios de dotaciones netas de riego para la hectárea representativa de determinadas zonas en cada una de las cuencas indicadas.

De lo anterior, se colige lo siguiente:

- A.1. En todos los cultivos estudiados, y para todas las cuencas, los valores máximos de dotaciones se han dado siempre con la aplicación de la metodología Penman Modificada.
- A.2. Para las cuencas del Duero y del Tajo, siempre, salvo la excepción indicada en apartado 3, los valores mínimos de dotaciones han sido siempre los obtenidos por la metodología Penman-Monteith.
- A.3. Las otras cuencas estudiadas, Júcar y Ebro, han dado valores de dotaciones mínimas con metodología Penman-Monteith en 13 cultivos (C. Júcar) y solo 7 cultivos (C. Ebro). No obstante, salvo excepciones, las diferencias con las dotaciones mínimas, que en esos casos han sido con metodología Blaney-Criddle, no resultan significativas, pues las cifras sólo se diferencian en las unidades o decenas en mas del 50% de estos resultados.
- B.1. En todas las zonas seleccionadas para cada cuenca, y en todas las cuencas, los valores máximos de las dotaciones se han dado siempre con el método de Penman Modificado.
- B.2. Para las cuencas del Duero y del Tajo, siempre sin excepción alguna, los valores mínimos se han dado en todas las zonas de cada cuenca, con la aplicación de la metodología Penman-Monteith.
- B.3. Las otras cuencas estudiadas, Júcar y Ebro, han dado valores mínimos de dotaciones con el método Penman-Monteith, en 6 zonas, de las 9 seleccionadas para su estudio, en la Cuenca del Júcar y en solo 3 zonas, de las 10 seleccionadas en la Cuenca del Ebro. No obstante hay que resaltar el hecho de que en ambas cuencas los valores obtenidos por Blaney-Criddle y por Penman-Monteith están muy próximos.

5. BIBLIOGRAFIA

- Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la Cuenca del Duero - CEDEX 1992.
- Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la Cuenca del Tajo - CEDEX 1994.
- Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la Cuenca del Júcar - CEDEX 1995.
- Determinación de las dotaciones de riego en los planes de regadío de la Cuenca del Ebro - CEDEX 1996.

APLICACIÓN DE LA FÓRMULA DE PENMAN-MONTEITH (FAO) PARA EL CÁLCULO DE LAS NECESIDADES DE AGUA Y PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN LA ZONA REGABLE DEL RÍO FRANCOLÍ Y DE LAS AGUAS PROCEDENTES DE LA EDAR DE TARRAGONA

Josep García, Joan R. Gispert y Gabriel Sanz *

Resumen:

El estudio se realizó en base a la climatología y edafología (tipos de suelos, su aptitud para el riego, etc.). También se consideraron las características y distribución de los cultivos (situación actual y para dos hipótesis futuras) y del agua de riego y las eficiencias (aplicación y utilización). Se calcularon las dotaciones mensuales y anuales medias ponderadas. Se hace especial mención a la calidad del agua depurada.

Summary:

The study was carried out based on the climatic and edaphic conditions of the area (type of soils, irrigation suitability, etc) The characteristics and distribution of crops (current situation and two futures hypothesis) and of the irrigation water are also considered. In addition, the assessment of the water average requirements for month and year is presented. It is particularly stressed the control of purified sewage water quality.

La zona regable se encuentra muy afectada urbana y industrialmente

El área de estudio corresponde básicamente al oeste de la comarca del Tarragonés (la mayor parte del término de Constantí, parte de Vilallonga, Morell, Pobla de Mafumet y una pequeña superficie de Tarragona y Perafort), junto al extremo este de Selva del Camp (Baix Camp).

La superficie objeto de estudio, no urbano-industrial, es de 4.251 Ha dentro de un ámbito geográfico de 15.941 Ha, es decir el 26,67 %.

Se trata de una zona prácticamente periurbana con una fuerte afectación industrial (complejos petroquímicos y polígonos industriales en los términos del Morell, la Pobla, Constantí y Tarragona) y urbana, fundamentalmente Tarragona.

La superficie agrícola útil (SAU) es de 3.826 Ha, es decir un 90 % de la no urbano-industrial.

El cultivo más importante es el avellano.

Corresponde a un 67 % de la SAU de l'área, seguido de la viña (10 %) y el olivo (8%), y otros cultivos (almendro, melocotonero, nogal y huerta). Hay un 10 % de terreno abandonado.

Un clima típicamente mediterráneo que permite una gran variedad de cultivos, pero donde el agua de riego es básica para la producción agrícola.

La temperatura media anual es 15,7 °C i la pluviometría de unos 544 mm.

El área estudiada se sitúa geológicamente entre la Sierra Pre-litoral y el mar, dentro de la Depresión Pre-litoral.

El cuaternario se encuentra regularmente distribuido, aunque de forma muy variable en composición y desarrollo.

* Departamento de Arboricultura Mediterránea. Centro de Mas Bové (IRTA) Apto. 415 43280 Reus

En cuanto a la geomorfología, la pendiente es suave y continua, estabilidad incrementada en algunos lugares por la presencia de una costra calcárea de grosor muy variable. La cota varía entre los 125 m s.n.m. al N del área i los 17 m al S, en las terrazas inferiores del río Francolí.

A nivel hidrológico, se trata de un material permeable, pero con un drenaje superficial deficiente, debido a la costra calcárea; no obstante, la percolación profunda es aceptable.

La edafología se caracteriza per la existencia de depósitos alóctonos pedregosos y de material calcáreo

Los suelos son de una gran heterogeneidad, debido al material originario y a las aportaciones de deyecciones procedentes de las montañas.

Los tipos de suelo, según la clasificación *Soil Taxonomy*, pertenecen a los órdenes Entisol i Inceptisol.

La textura es variada, a pesar de ser fundamentalmente franco-arenosa (más al N), franco-limosa (parte central del área) y franco-arcillo-limosa (al S), pero con predominio de 1ª primera (un 55 %).

La profundidad del suelo es función de la existencia de horizontes de acumulación de carbonato cálcico, de su grado de consolidación y profundidad. Hay un predominio de suelos con horizonte petrocálcico en la parte central del área (un 42 % sobre el total), pero con potencia i profundidad variable.

En cuanto a potencial de los suelos, el índice de fertilidad más alto corresponde a Morell.

Respecto a la aptitud del suelo para el riego (USBR), hay un predominio de la clase IV (39 %), seguida de la II (31 %) i la III (30 %).

Se habría de realizar un estudio definitivo y riguroso de las diferentes series de suelos existentes en el área y de un trabajo complementario que estudiara el comportamiento hidrológico del suelo, mediante pruebas de campo, lo cual sería de gran utilidad para el diseño y manejo del riego.

Se tendrá que hacer un seguimiento riguroso de la calidad del agua depurada

Tanto en cuanto a la su tolerancia por parte del medio ambiente, como de la sanidad pública (sodicidad, salinidad, cloruros, elementos fertilizantes, microelementos, microbiología, biodegradabilidad, etc.)

A nivel de los cultivos del área, el avellano es la especie más sensible a la salinidad.

Un mejor conocimiento de los acuíferos del área, desde el punto de vista de la cualidad física, química i biológica del agua a lo largo de les diferentes estaciones, permitirá evaluar su aprovechamiento y la evolución de su contaminación.

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y de las necesidades de agua de los cultivos, y la programación de riego, se realiza mediante el programa de ordenador de la FAO (1993), basado en el cálculo de la ET_o en el estudio de Penman-Monteith.

Para la situación actual se calcula una eficiencia total de riego del 65 % y para una situación futura deseable del 73 %.

Se realiza una **programación de riegos**, teniendo en cuenta las características climáticas, edafológicas, de los cultivos y del agua de riego. Se define un calendario de riego y se calculan las dotaciones mensuales i anuales para los diferentes cultivos, en base, también, a unas frecuencias y dosis de riego establecidas, y a la textura del suelo.

De acuerdo con la distribución de texturas de suelo, se calculan las dotaciones medias ponderadas para la situación actual y para una posible futura:

Tabla núm. I.- DOTACIONES MENSUALES I ANUALES ACTUALES, MEDIAS PONDERADAS SEGÚN TEXTURA (EFICIENCIA TOTAL 65 %) (m³/Ha)

Mes	Cultivo				
	Avellano	Olivo	Almendro	Nogal	Huerta
Febrero-marzo	338	463	342	341	300
Abril	302	254	598	596	598
Mayo	837	779	1.079	1.261	1.452
Junio	1.366	1.298	1.814	1.946	1.934
Julio	1.535	1.535	2.023	2.133	3.545
Agosto	1.112	1.111	1.747	1.907	2.565
Setiembre	749	691	1.121	1.112	1.105
Octubre	148	152	350	454	----
	-----	-----	-----	-----	-----
Total . . .	6.387	6.283	9.074	9.750	11.499

Tabla núm. II.- DOTACIONES MENSUALES I ANUALES FUTURAS, MEDIAS PONDERADAS SEGÚN TEXTURA (EFICIENCIA TOTAL 73 %) (m³/Ha)

Mes	Cultivo				
	Avellano	Olivo	Almendro	Nogal	Huerta
Febrero-marzo	312	412	304	304	268
Abril	227	226	533	530	533
Mayo	745	694	960	1.123	1.293
Junio	1.216	1.156	1.615	1.733	1.722
Julio	1.370	1.367	1.801	1.899	3156
Agosto	992	989	1.556	1.699	2.285
Setiembre	667	615	999	990	984
Octubre	132	136	312	404	----
	-----	-----	-----	-----	-----
Total . . .	5.661	5.595	8.080	8.682	10.241

Finalmente, se calculan las dotaciones medias ponderadas (mensuales y anuales), teniendo en cuenta la distribución de los cultivos para la situación actual y para dos alternativas futuras.

Tabla núm. III.- DISTRIBUCIÓN DE CULTIVOS ACTUAL I FUTURA (%)

Cultivo	Situación actual	Situación futura	
		Alternativa I	Alternativa II
Avellano	67	20	40
Olivo	8	25	30
Almendro	2	20	10
Nogal	2	15	8
Total huerta	1	20	12
Total . . .	80 (*)	100	100

(*) Corresponde al porcentaje de SAU regada, el resto se trata de viña (10 %) y terrenos abandonados (el otro 10 %).

Tabla núm. IV.- DOTACIONES MENSUALES I ANUALES, MEDIAS PONDERADAS, DE ACUERDO CON LA DISTRIBUCIÓN DE CULTIVOS ACTUALES Y PREVISIBLES (m³/Ha)

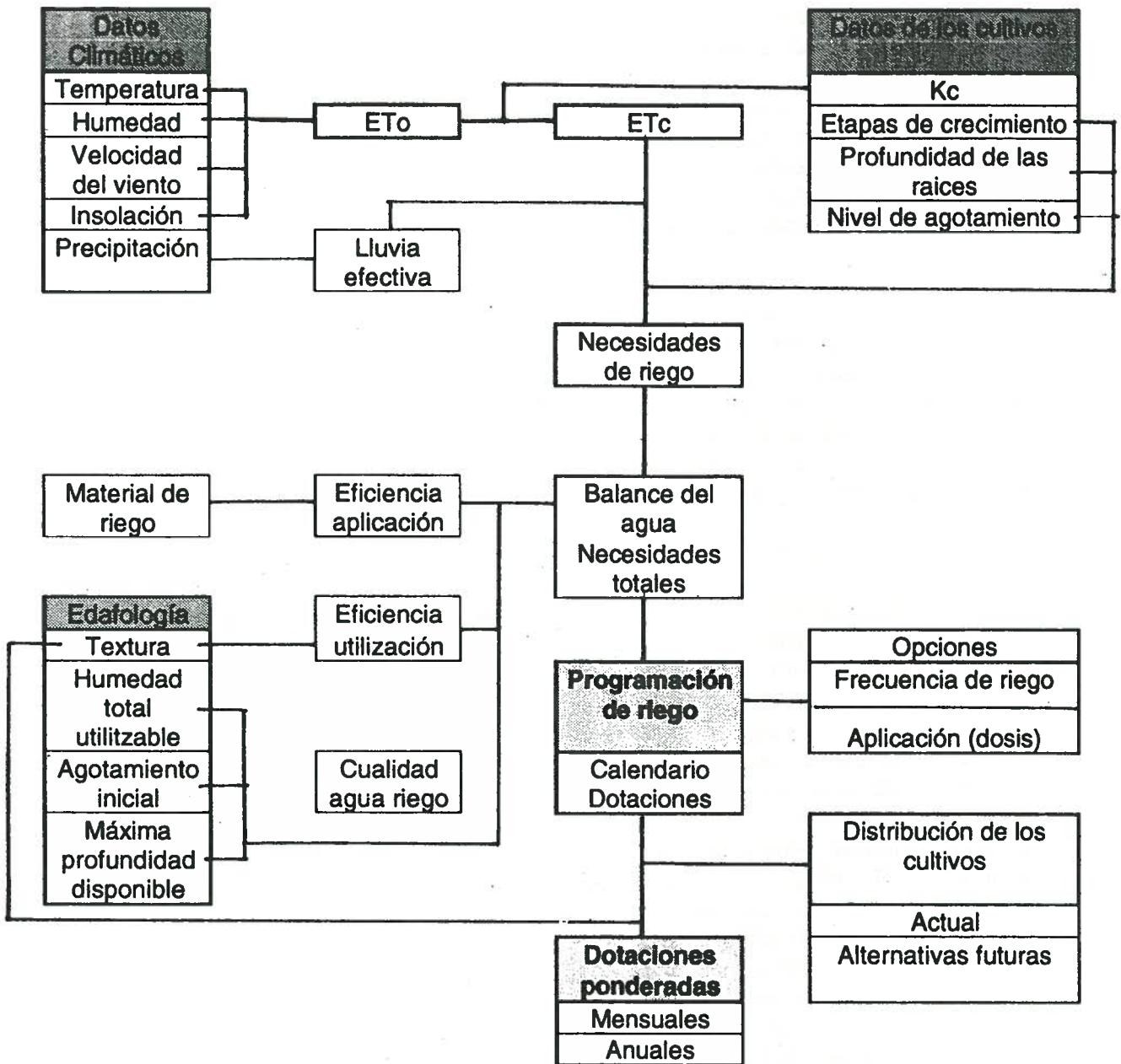
Mes	Situación actual	Situación futura	
		Alternativa I	Alternativa II
Febrero-marzo	280	325	335
Abril	253	395	318
Mayo	684	949	851
Junio	1.114	1.460	1.340
Julio	1.270	1.892	1.669
Agosto	933	1.468	1.269
Setiembre	613	832	748
Octubre	127	183	157
	-----	-----	-----
Total . . .	5.274	7.504	6.687

No obstante, comparando el cálculo de la ET_o según el estudio de Penman-Monteith, con otras fórmulas, se puede considerar que las necesidades de agua son un poco inferiores a las que resultan de aplicar la metodología basada en ese estudio; además, se ha de tener en cuenta la existencia de plantaciones en fase juvenil, por lo que es recomendable ajustar las dotaciones anteriores, aplicando un coeficiente corrector global de 0,8.

Tabla núm. V.- DOTACIONES MENSUALES Y ANUALES AJUSTADAS ACTUALES Y FUTURAS (m³/Ha)

Mes	Situación actual	Situación futura	
		Alternativa I	Alternativa II
Febrero-marzo	224	260	268
Abril	202	316	254
Mayo	547	759	681
Junio	891	1.168	1.072
Julio	1.016	1.514	1.335
Agosto	746	1.174	1.015
Setiembre	490	666	598
Octubre	102	146	126
	-----	-----	-----
Total . . .	4.218	6.003	5.349

ESQUEMA GENERAL DE LA PROGRAMACIÓN DE RIEGO



ETo = Evapotranspiración de referencia

ETc = Evapotranspiración del cultivo

Kc = Coeficiente de cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R.G., SMITH, M., PERRIET, A. i PEREIRA, L.S.- *Updated reference evapotranspiration definition and calculation procedures* . 1993.
- CÁNOVAS, J.- *Calidad agronómica de las aguas de riego*. MAPA-SEA.. 1986.
- COBERTERA, E.- *Los suelos cultivados de la provincia de Tarragona*. Diputació de Tarragona. 1986.
- CONESA, V.- *Riegos a presión, media y alta frecuencia*. Prensa 21. 1987.
- DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA (DARP).- Sección de Programas y Estadística. Servicios Territoriales de Tarragona. 1995.
- ELIAS, F. I RUIZ, L.- *Agroclimatología de España*. MAPA-INIA. 1977.
- FAO.- *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudio FAO: Riego y Drenaje 24. 1976.
- FAO.- *La calidad del agua en la agricultura*. Riego y Drenaje 29. 1987.
- FAO.-*Programa de ordenador para planificar y manejar el riego* Estudio FAO: Riego y Drenaje 46. (CROPWAT). 1993.
- GARCIA, J. I GISPERT, J.R.- *El volumen húmedo del suelo. Aspectos agronómicos relacionados con la microirrigación*. Riegos y Drenajes XXI (núm. 76 y 77). 1994.
- GISPERT, J.R.- *Las necesidades de agua en el riego localizado*. DARP. 1991.
- GISPERT, J.R. I SANZ, G.- *Programación del riego en una finca hortofrutícola situada en el t.m. de Mont-roig (Baix Camp)*. Programa de doctorado. Universidad de LLeida. 1995.
- IBAÑEZ, V. Y NAMESNY, A.- *Evaluación de la clasificación de aguas para riego*. INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA.- *Ortofotomapes 446-1-2 i 473-1-2*. 1993.
- INSTITUT CARTOGRÀFIC DE CATALUNYA.- *Mapas comarcales de Catalunya. Baix Camp i Tarragonès*. 1994.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA.- *Mapa geotécnico general de Tarragona (H-9-5/42)*. Ministerio de Industria. 1976.
- IRTA.- *Banco de datos de la estación agroclimática del Centro de Mas Bové*. Constantí. Tarragona. 1995.
- MARTIN, F. I DE JUAN, J.A.- *Agronomía del riego*. Mundi-Prensa. 1993.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN (MAPA).- *Mapa de cultivos y aprovechamientos*. Tarragona H-473 i Valls H-446. 1990
- MUJERIEGO, R.- *Riego con agua residual municipal regenerada. Manual práctico*. Universidad Politécnica de Catalunya. 1990.
- PIZARRO, F.- *Riego localizado de alta frecuencia*. Mundi-Prensa. 1987.
- PORTA, J.- *'Introducció al coneixement del sòl dels Països Catalans'*. Associación de Ingenieros Agrónomos de Catalunya. 1987.
- PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M. i ROQUERO, C.- *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. 1994.
- SEONEZ, M.- *Aprovechamiento y tratamiento agrarios de las aguas residuales urbanas*. MAPA-INIA. 1978.

RECUPERACIÓN DEL OLIVO DESPUÉS DE UNA SEQUÍA EXTREMA

Fereres, E.^{1,2} (P), Ruz, C.², Castro, J.³, Gómez, J.A.¹ y Pastor, M.³

Resumen

Se describen dos experimentos de recuperación de olivos después de la sequía estival, realizados en 1983 y 1995. En ambos casos se estudió la rehidratación de los árboles después de sufrir sequías que redujeron su potencial hídrico entre -4.0 y -8.0 MPa. Los árboles se recuperaron en pocos días en cuanto a su potencial hídrico y al intercambio gaseoso cuando el potencial hídrico previo fue menor de -5.0 MPa. Los árboles que sufrieron un estrés severo tardaron en recuperar su conductancia estomática varias semanas.

Introducción

El olivo, al haber evolucionado bajo un clima mediterráneo, debe disponer de mecanismos de adaptación que le permitan tolerar los períodos de sequía estival que son habituales en este clima. El hecho de que el cultivo del olivar persista en zonas de baja pluviometría y suelos de escasa capacidad de retención avala la capacidad de este cultivo de resistir la sequía. A pesar de dicha capacidad las fluctuaciones del clima producen períodos de sequía extremos, tales como el sufrido recientemente, que podrían afectar no sólo a la producción sino incluso a la supervivencia de los árboles. La tendencia de los agricultores a utilizar marcos de plantación muy distantes (conservadores) y a controlar con frecuencia el crecimiento de las malas hierbas, que compiten por los escasos recursos hídricos, sugiere que desde la más remota antigüedad las sequías extremas afectaron a la producción y a la supervivencia del olivar. Ha habido siempre una preocupación generalizada por la capacidad de recuperación de los árboles frutales después de sequías extremas. Fereres *et al.* (1979) publicaron resultados en cítricos donde se evaluó la capacidad de recuperación de esta especie después de una situación de sequía extrema. En este estudio Fereres *et al.* (1979) observaron una rehidratación casi inmediata después de regar, si bien la conductancia estomática no se recuperó a niveles similares a los de los árboles en buen estado hídrico incluso dos meses después de la rehidratación.

No se conocen estudios similares realizados en el olivar por lo que parece deseable evaluar la capacidad de recuperación de esta especie una vez que las sequías extremas se cortan por lluvia o riego. El objetivo de este trabajo es dar un avance de

¹ Instituto de Agricultura Sostenible. C. S. I. C. Córdoba.

² Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.

³ Centro de Investigación y Formación Agraria. Córdoba

los resultados obtenidos en un olivar en Córdoba al estudiar su recuperación tras la caída de las primeras lluvias del otoño de 1995, año que culminó un período de sequía extrema en esta zona. Esta información se contrasta con los resultados de un estudio de recuperación realizado en 1983 en el mismo olivar, donde se evitó la infiltración de las lluvias primaverales y estivales mediante la colocación de plásticos sobre el suelo.

Materiales y Métodos

En los otoños de 1983 y de 1995 se realizaron dos experimentos de recuperación. Los árboles estudiados pertenecen a la variedad 'Picual' y tenían 10 y 22 años, respectivamente. El suelo es de textura franco-arenosa, con una profundidad variable que oscila entre 1 y más de 2 m, y con hasta un 20% de elementos gruesos en determinadas zonas del olivar. En 1983 se impermeabilizó la superficie del suelo con plástico negro en primavera, en un área alrededor de 2 árboles de secano. En dichos árboles, y en otros árboles cercanos regados por goteo, se midió periódicamente el potencial hídrico (PH) al amanecer, así como la conductancia estomática. Las determinaciones del PH se realizaron en hojas siguiendo las precauciones recomendadas por Hsiao (1990). En 1983 las medidas de conductancia estomática (CE) se realizaron utilizando un porómetro de régimen permanente construido en el Laboratorio de Relaciones Hídricas del Prof. Hsiao de la Universidad de California, Davis. Las medidas de CE en 1995 se realizaron con un porómetro de régimen transitorio, Delta T Modelo AP4. En 1995 se estudió la recuperación después del verano coincidiendo con las primeras lluvias en árboles de un ensayo de sistemas de laboreo en secano. Se pretendía comprobar la hipótesis de que los árboles en no laboreo, al tener el sistema radicular no alterado por las labores veraniegas, podrían recuperarse más rápidamente que los árboles en el tratamiento labrado. En este ensayo se realizaron determinaciones de densidad radicular en los días siguientes al humedecimiento del suelo por la lluvia y de flujo de savia en dos árboles utilizando el método del pulso de calor (Greenspan, Ltd; Australia). Las medidas de PH se realizaron entre las 10 y las 12 de la mañana, que es el momento en que el olivo alcanza su máxima CE y mínimo PH en su ciclo diurno. En 1995 los testigos utilizados para contrastar los valores de PH y CE fueron árboles regados con círculos de goteros (12 goteros/árbol) y que tenían una alta densidad foliar. En todos los casos los árboles estaban en descarga, salvo algunos árboles del experimento de laboreo. A continuación se presentan los resultados referentes a las relaciones hídricas de los árboles en el período de recuperación.

Resultados y discusión

En 1983 los árboles sometidos a sequía alcanzaron un PH mínimo de -4.0 MPa. La Figura 1 muestra los resultados del estudio de recuperación realizado 14 días después de que comenzaran las lluvias y que el perfil se rehidratase. Como puede observarse, la evolución diurna del PH en los árboles sometidos a sequía fue similar a la de los árboles regados. Así mismo, la CE se recuperó notablemente de los bajos valores observados antes de las lluvias, observándose tasas de intercambio gaseoso similares a las de los árboles que habían estado bien regados durante todo

el verano. Todo ello sugiere que la recuperación de los olivos cuyo PH al amanecer disminuyó hasta -4.0 MPa fue rápida y total en un plazo no superior a las 2 semanas.

En 1995 se siguió con más detalle la recuperación después de las primeras lluvias de otoño, tanto en los olivos labrados como en los sometidos a no laboreo. La Figura 2 muestra la evolución del PH antes y después de las lluvias. Como puede observarse en la Figura 2, el PH de los árboles de este experimento había disminuido hasta valores cercanos a los -8.0 MPa antes de las lluvias. A pesar de esto se produjo una rápida rehidratación, hasta niveles similares a los de los árboles regados, en un período menor de 4 días. La recuperación de la CE fue más lenta como puede observarse en la Figura 3. Sólo las determinaciones realizadas al final del ciclo (día 329) muestran valores similares de CE en todos los árboles, incluidos los regados.

Conclusiones

El olivo tiene una notable capacidad de recuperación de niveles de sequía extrema que causarían la defoliación e incluso la muerte de la gran mayoría de las especies cultivadas. A pesar de que se alcanzan valores cercanos a -8.0 MPa, los olivos se rehidrataron completamente en pocos días e incrementaron su apertura estomática inmediatamente después de las lluvias. La sequía extrema se manifestó con posterioridad a las lluvias en unos niveles bajos de conductancia estomática que persistieron durante varias semanas.

Referencias

Hsiao, T.H. 1990. Measurements of Plant Water Status. En: Irrigation of Agricultural Crops. pp. 243-279. R.R. Bruce, M.H. Niehaus, E.T. Kanemasu y J.R. Gilley (eds.), ASA, CSSA y SSSA. Wisconsin. USA.

Fereres, E., G. Cruz-Romero, G.J. Hoffman y S.L. Rawlins. 1979. Recovery of Orange Trees Following Severe Water Stress. *J. Appl. Ecol.* 16:833-842.

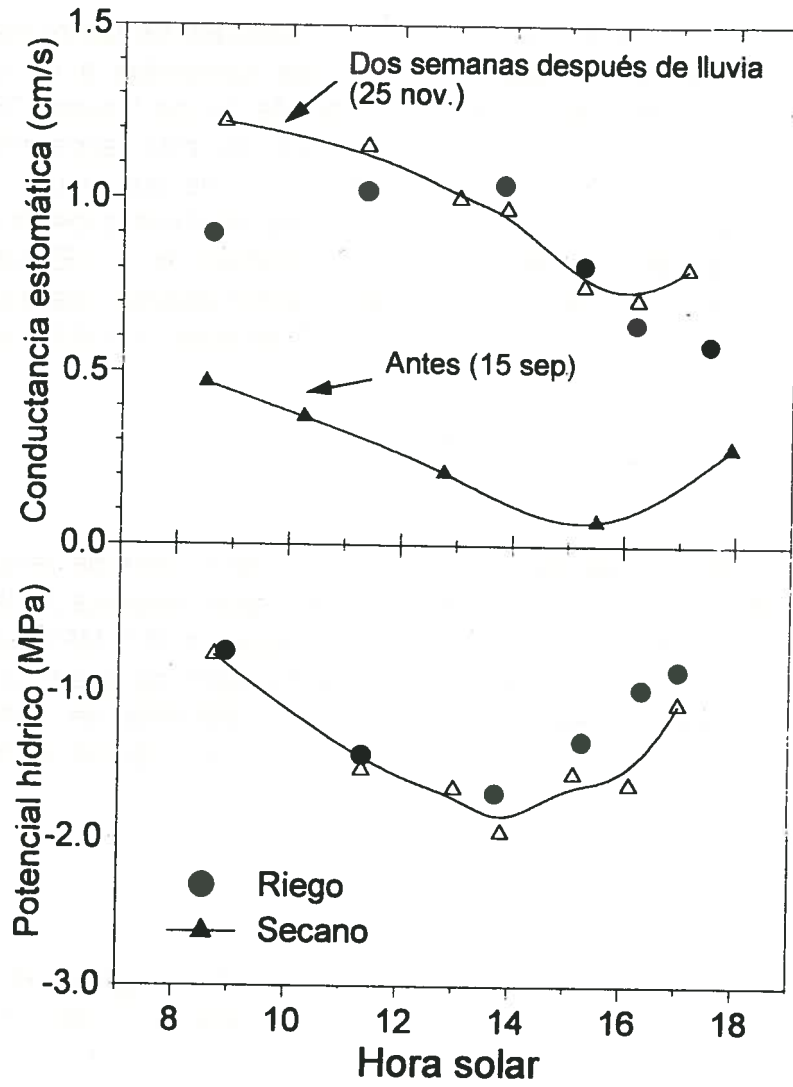


Fig. 1.- Evolución del potencial hídrico y de la conductancia estomática en olivo. Córdoba 1983.

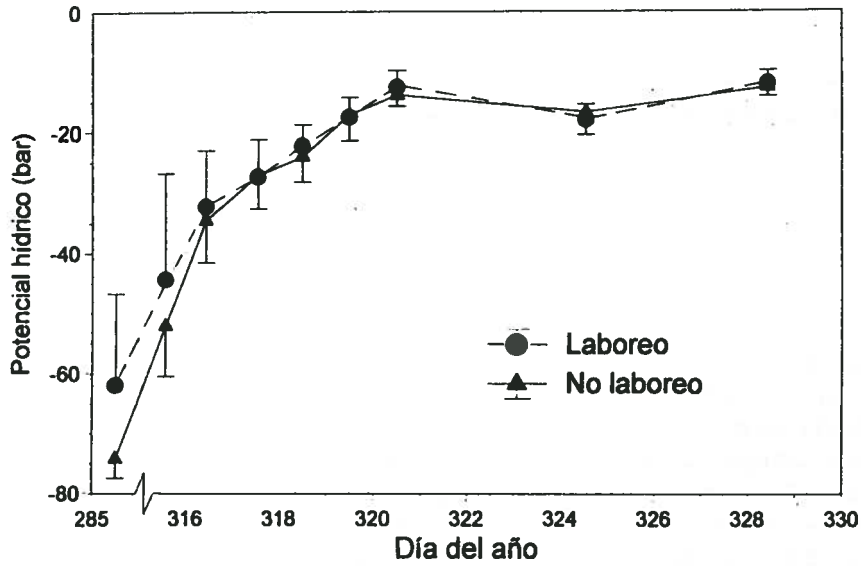


Fig. 2.- Evolución del potencial hídrico en olivos de secano después de lluvia. Córdoba 1995.

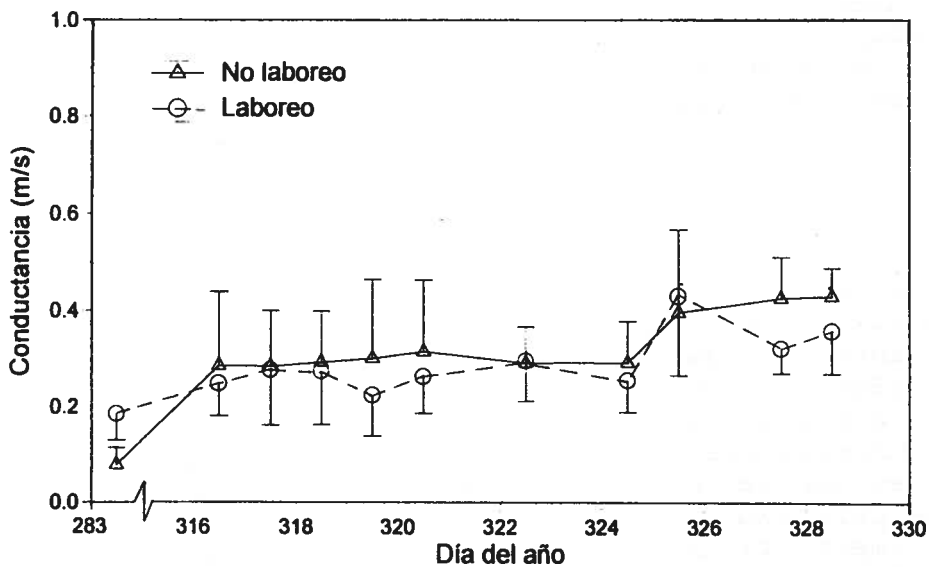


Fig.3.- Evolución de la conductancia estomática en olivos de secano después de lluvia. Córdoba 1995

MEDIDA DE LA EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA POR COVARIANZA DE TORBELLINOS

F.J. Villalobos, Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC) y Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba. Apartado 4084, 14080 Córdoba

RESUMEN

La evapotranspiración (ET) puede ser medida en lisímetros de pesada o por covarianza de torbellinos (eddy correlation). El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento de un sistema de covarianza de torbellinos para medir la ET de una pradera de gramíneas en Córdoba (España). Se realizaron medidas horarias de los componentes del balance de energía en el centro de una pradera de 1.5 ha durante Mayo de 1995. El análisis de errores de cierre en el balance de energía muestra que el sistema infraestimó la ET horaria en torno a un 5% y que la raíz del error cuadrado medio fue de 44 W m^{-2} , lo puede ser considerado como satisfactorio para numerosas aplicaciones.

ABSTRACT

Measurements of evapotranspiration (ET) may be performed using weighing lysimeters or the eddy covariance method (eddy correlation). The objective of this work was to test the performance of an eddy covariance system to measure grass ET at Córdoba (Spain). Hourly measurements of the energy balance components were obtained in the middle of an 1.5-ha grass plot during May, 1995. Closure error analysis of the energy balance shows that eddy covariance underestimated hourly ET by around 5% while the Root Mean Square Error of 44 W m^{-2} which may be acceptable for most purposes.

INTRODUCCION

La determinación de las necesidades hídricas de los cultivos y la evaluación de recursos hídricos a distintas escalas requieren conocer la evapotranspiración (ET). La ET puede ser medida mediante lisímetros de pesada o por covarianza de torbellinos (Stewart and Nielsen, 1990). Los primeros presentan los inconvenientes del alto coste y la imposibilidad de medir en distintas localidades. El segundo método presenta los inconvenientes de la fragilidad de los instrumentos y de la necesidad de parcelas de gran tamaño para realizar las medidas, pero es fácilmente transportable. La tecnología de medida de la ET por covarianza de torbellinos ha avanzado enormemente en los últimos años y ya se dispone de sensores comerciales. El método de covarianza de torbellinos permite evaluar por separado los flujos de calor latente (LE) y calor sensible (H). Por lo tanto, si se dispone además de medidas de radiación neta (R_n) y flujo de calor al suelo (G) es posible evaluar el error en la medida de LE a partir de la ecuación del balance de energía.

Además de los métodos de medida de la ET existen varios métodos de estimación basados en el balance de energía:

- a) Método de balance de energía-renovación en superficie (surface renewal) (BE-RS) (Snyder y Spano, 1994).
- b) Método de balance de energía-temperatura de la cubierta (BE-TC) (Hatfield, 1990).
- c) Método de balance de energía-relación de Bowen (BE-RB) (Hatfield, 1990).

En los dos primeros se determina la evaporación como:

$$LE = R_n - G - H$$

y H se estima a partir de las fluctuaciones de la temperatura del aire (método a) o el gradiente de temperatura entre cubierta y aire (método b). En el método c el reparto entre LE y H se calcula a partir del gradiente de temperaturas y presiones de vapor medidos a dos alturas sobre la cubierta. La principal ventaja de estos métodos de estimación estriba en la mayor robustez de los sensores lo que permitiría obtener medidas continuas para períodos largos. Los principales inconvenientes son:

a) Método de balance de energía-renovación en superficie: Se trata de un método en fase experimental (ver por ejemplo Pau U et al., 1995) que sólo ha demostrado ser adecuado cuando H es despreciable (Snyder y Spano, 1994).

b) Método de balance de energía-temperatura de la cubierta: Requiere conocer la resistencia aerodinámica de la cubierta para flujo de calor sensible. Aunque existen métodos de cálculo en función de la altura de la cubierta y de la velocidad del viento, los errores pueden ser importantes en situaciones en las que H es elevado y perfil no neutro.

c) Método de balance de energía-relación de Bowen: La aplicación del método conduce a una singularidad cuando la relación de Bowen se aproxima a -1, es decir, cuando LE tiende a -H. Además este método se basa en la suposición de que los coeficientes de transporte turbulento para calor y vapor de agua son idénticos, lo que puede llevar a importantes errores para situaciones de atmósfera no neutra. Así, en situaciones de advección, el método infraestima la ET de cultivos con buen suministro de agua.

d) Todos los métodos: La precisión en la estimación de la ET depende en gran parte de la bondad en la medida de R_n y G.

Las ventajas teóricas del método de covarianza de torbellinos no han sido aún comprobadas en nuestras condiciones. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento de un sistema comercial de medida de evaporación mediante correlación de turbulencias sobre una pradera de gramíneas.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se realizó durante Mayo de 1995 en la Finca Experimental del CIDA de Córdoba (38°N, 4°W). Se realizaron medidas de los componentes del balance de energía sobre una parcela de gramíneas de aprox. 1.5 ha de extensión. La pradera tenía una altura entre 5 y 15 cm durante el experimento. Los instrumentos se colocaron cerca del centro de la parcela a una distancia aproximada de 60 m del borde. Se midieron los componentes del balance de energía del modo siguiente:

- Radiación neta: Se midió con un radiómetro neto modelo Q-7 (REBS, Seattle, WA) colocado a 1 m sobre el suelo.
- Flujo de calor al suelo: Se obtuvo por el método de combinación colocando una placa de flujo modelo HFT3.1 (REBS, Renton, WA) a 5 cm de profundidad y un termopar de cobre-constantán a 2.5 cm de profundidad. El flujo de calor en la superficie se obtuvo a partir de la expresión:

$$G = CA + J_5$$

donde J_5 es el flujo medido a 5 cm de profundidad y CA es la cantidad de calor almacenada en el horizonte de 0 a 5 cm durante el período considerado (Δt):

$$CA = C_v \cdot 0.05 \Delta T / \Delta t$$

siendo C_v el calor específico volumétrico del suelo (1.2 MJ/m³/K) e ΔT el incremento de temperatura medido a 2.5 cm de profundidad. El valor de 0.05 se corresponde al espesor (m) de la lámina considerada.

Tanto la radiación neta como el flujo de calor y la temperatura del suelo se midieron cada 30 s. Estos valores se promediaron para períodos de 10 minutos, con los que se calculó G. Los valores de G y R_n se promediaron luego para períodos horarios.

- Flujo de calor sensible: Se midió por el método de Eddy-Correlation a partir de medidas de temperatura (t_i) y velocidad vertical del viento (w_i) obtenidas con un termopar de respuesta rápida modelo 127 y un anemómetro sónico CA27 (Campbell Scientific, Logan, Utah), respectivamente. Las medidas se realizaron con una frecuencia de 8 Hz. El valor de H se obtuvo para intervalos de 10 minutos a partir de la siguiente expresión:

$$H = \rho C_p \sum_1^n (t_i - \bar{t}) (w_i - \bar{w})$$

donde ρ es la densidad del aire, C_p es el calor específico a presión constante del aire y n es el número de datos del período (8x60x10= 4800). Para los cálculos se consideró un valor de 1216 para el producto ρC_p . Los valores correspondientes a 10 minutos luego se promediaron para intervalos horarios.

- Flujo de calor latente: Se obtuvo de forma análoga a la de H a partir de medidas de la densidad de vapor de agua medida con un higrómetro KH20 (Campbell Scientific, Logan, Utah):

$$\lambda E = \lambda \sum_1^n (\rho_{wi} - \bar{\rho}_w) (w_i - \bar{w})$$

En las dos ecuaciones anteriores las variables cubiertas con barra horizontal son los valores medios del período.

El anemómetro sónico y el higrómetro se colocaron a 40 cm de altura, con una distancia entre ambos de 20 cm. La altura de colocación se eligió para mantener una relación altura:fetch superior a 1:100 recomendada por diversos autores. Los valores de LE se corrigieron a partir de la expresión de Koprov y Sokolov (1973) que depende de la separación horizontal entre el higrómetro y el anemómetro (y) y la altura de colocación (z):

$$c_1 = 0.93 e^{(-y/z)}$$

$$\lambda E_m = \lambda E_m / c_1$$

luego se aplicaron las correcciones propuestas por Tanner et al. (1993) para corregir los efectos del flujo de calor sensible sobre la densidad de vapor (K_E y K_H) y el del oxígeno sobre la respuesta del higrómetro (K_O):

$$K_O = 0.23 \frac{k_o}{k_w} \frac{\lambda}{T} \frac{H}{\lambda E_m}$$

$$K_E = \frac{e}{P - e}$$

$$K_H = 0.622 \left(\frac{P}{P - e} \right) \left(\frac{e}{P - 0.378e} \right) \frac{\lambda}{C_p T} \frac{H}{\lambda E_m}$$

donde:

e: Presión de vapor del aire (KPa)

P: Presión atmosférica (KPa)

$$P = 101.3 \left(1 - \frac{110}{44308} \right)^{5.2568}$$

donde 110 es la altitud de Córdoba.

Por último, el flujo de calor latente corregido se calculó como:

$$\lambda E = (1+K_O) (1+K_E+K_H) \lambda E_m$$

Las medidas de los sensores fueron obtenidas con un datalogger CR10 (Campbell Scientific, Logan, Utah). El anemómetro sónico CA27, el termopar 127 y el higrómetro KH20 recibieron alimentación desde una batería de 12 v. Las medidas se obtuvieron en días aislados desde el día 122 hasta el día 144. En general los instrumentos se colocaban al amanecer y se mantenían en el campo hasta última hora de la tarde. En ocasiones se mantuvo el equipo durante más de 24 horas seguidas. En este trabajo vamos a seguir la convención de signos de considerar positivos los flujos que se alejan de la superficie.

La bondad del sistema se evaluó comparando los valores horarios de energía disponible (R_n-G) con los de energía empleada ($H+LE$). Idealmente se debería obtener una relación:

$$H+LE = R_n-G$$

Se hizo el ajuste lineal de $H+LE$ frente a (R_n-G) .

RESULTADOS Y DISCUSION

EVOLUCION DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE DE ENERGIA

Los componentes del balance de energía para intervalos horarios se muestran como ejemplo en la Figura 1 para el día 128.

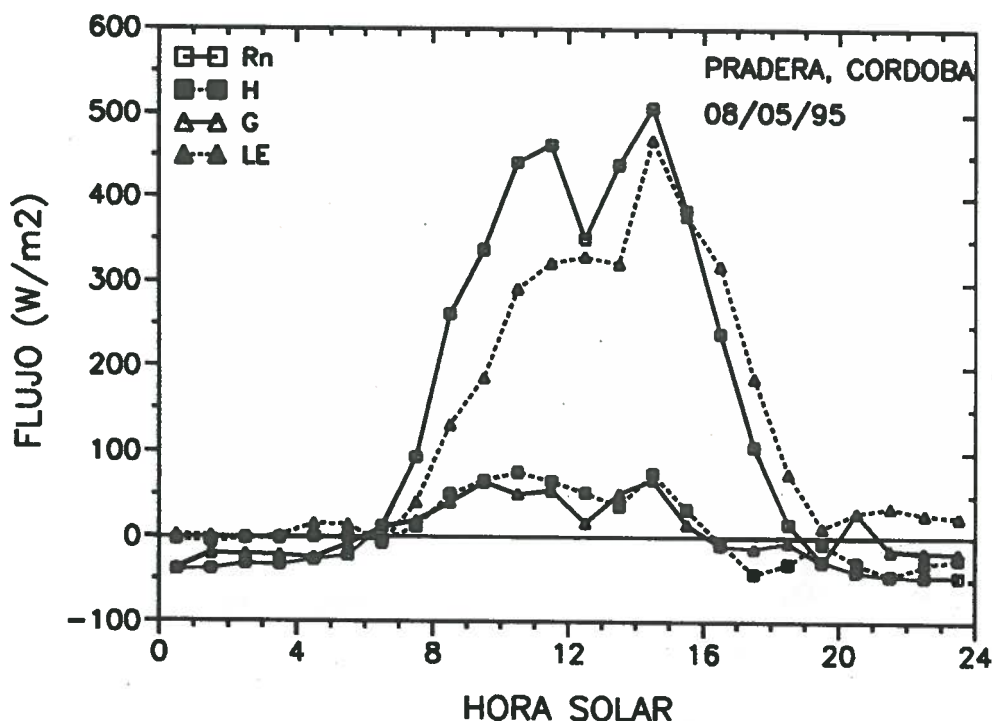


Figura 1. Evolución temporal de los componentes del balance de energía sobre una pradera de gramíneas en Córdoba (España) el 8 de Mayo de 1995. R_n : Radiación neta. LE: Flujo de calor latente. H: Flujo de calor sensible. G: Flujo de calor al suelo.

En ese día hubo alguna nubosidad después del mediodía, lo que se observa por la caída de la radiación neta. El resto del día estuvo prácticamente despejado. Durante la mañana el flujo de calor latente fue aumentando en paralelo con la radiación neta si bien una parte de la energía disponible se invirtió en calentamiento del aire (H) y calentamiento del suelo (G). A partir de las 16 horas, tanto H como G se hacen negativos: el suelo empieza a perder energía y el aire empieza a ceder calor a la pradera. Esto permite mantener un flujo de calor latente superior a la radiación neta. Los flujos máximos alcanzados durante ese día fueron de aproximadamente 500 W m^{-2} para radiación neta y λE , mientras que G y H no superaron los 100 W m^{-2} .

ERRORES EN LA ESTIMACION DE H Y LE

Todos los datos horarios disponibles de LE+H se representaron frente a los correspondientes de R_n-G (Figura 2). La relación entre LE+H y R_n-G se aproximó mucho a la línea 1:1, también mostrada en la Figura 2, lo que indica la bondad en las estimaciones de los flujos de calor latente y calor sensible.

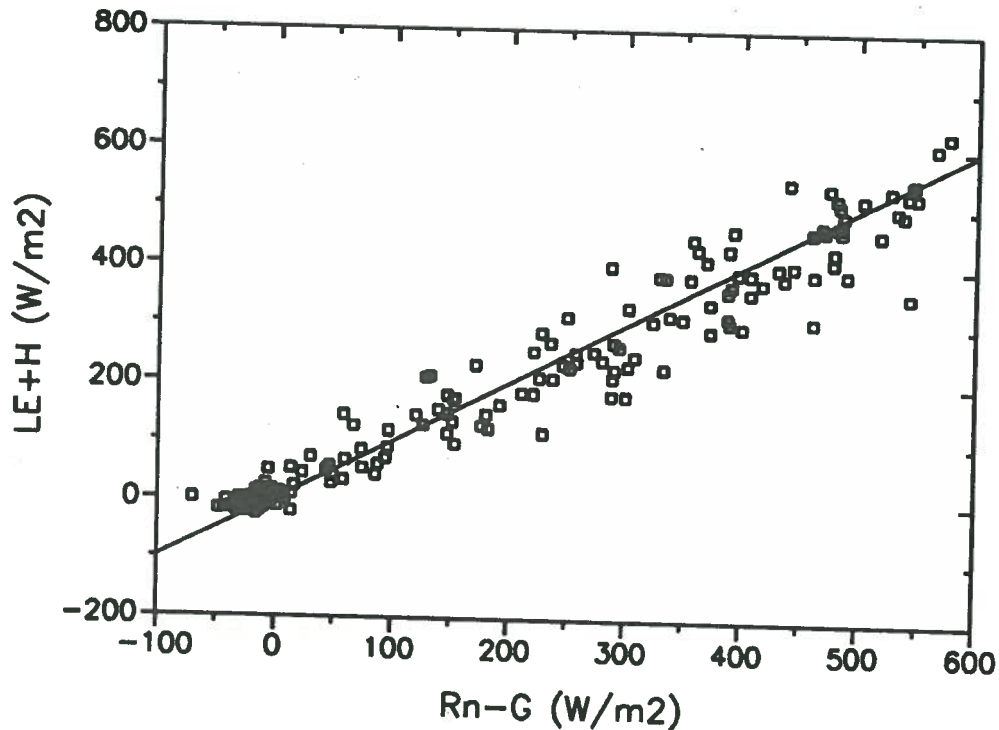


Figura 2. Relación entre la suma de flujos de calor sensible y calor latente determinados por covarianza de torbellinos y energía disponible (radiación neta menos flujo de calor al suelo) sobre una pradera de gramíneas. Valores horarios. Córdoba (España). Mayo, 1995.

La recta de regresión obtenida fue:

$$y = 11.98 + 0.92 x, r^2 = 0.95$$

Los coeficientes de la recta fueron significativamente distintos de 0 y 1, respectivamente. La recta ajustada por el origen fue:

$$y = 0.95 x$$

La raíz del error cuadrado medio fue de 44 W m^{-2} . Estos resultados indican que los flujos fueron infraestimados en un 5% por término medio, lo que se considera un error despreciable para flujos horarios. Por lo tanto, el sistema de Eddy-Correlation demuestra ser una alternativa adecuada para la medida de los flujos de calor latente y calor sensible sobre pradera en las

condiciones de Córdoba.

Además de la precisión en las estimaciones de los flujos el equipo empleado presenta una serie de ventajas respecto a otras alternativas (fundamentalmente relación de Bowen y lisímetro):

- Portabilidad y rapidez de instalación: La instrumentación se puede colocar en el campo en menos de una hora. El conjunto de instrumentos se puede transportar en un maletero amplio.

Estas características le confieren las principales ventajas frente a los lisímetros de pesada.

- Comportamiento en diversas condiciones atmosféricas: Las estimaciones de flujo en las primeras o últimas horas del día son fiables (lo que no ocurre con equipos de relación de Bowen). Sin embargo, el equipo de Eddy-Correlation (sobre todo el anemómetro sónico) es muy delicado y no debe ser expuesto a la lluvia o a condiciones de muy alta humedad, lo que puede limitar considerablemente sus posibilidades de empleo.

REFERENCIAS

- Hatfield, J.L. 1990. Methods of estimating evapotranspiration. En: Stewart, B.A. y Nielsen, D.R. (Eds.) Irrigation of agricultural crops. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI. pp. 435-474.
- Koprof, B.M. y Sokolov, D.Y. 1973. Spatial correlation functions of velocity and temperature components in the surface layer of the atmosphere. Izv. Atmospheric and Oceanic Physics, 9:178-182.
- Paw U, K.T., Qiu, J., Su, H., Watanabe, T. y Y. Brunet. 1995. Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes. Agric. For. Meteorol. En prensa.
- Snyder, R.L. y Spano, D. 1994. Using surface renewal analysis to estimate evapotranspiration. En: M. Borin and M. Satin (Eds.). Proceedings of the 3rd Congress of the European Society for Agronomy. ESA, Colmar Cedex, Francia. p. 410-411.
- Stewart, B.A. y Nielsen, D.R. (Eds.) 1990. Irrigation of agricultural crops. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI. 1218 p.
- Tanner, B.D., Swiatek, E. y Greene, J.P. 1993. Density fluctuations and use of the krypton hygrometer in surface flux measurements. Proc. Nat. Conf. Irrig. Drain. Eng. Irrig. Drain. Div. ASCE. Park City, Utah. 21-23 Julio, 1993.

EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD ESTACIONAL DEL ALMENDRO (*Prunus amygdalus* L) AL DÉFICIT HÍDRICO. RESPUESTA FISIOLÓGICA Y PRODUCTIVA.

J. Girona (P), J. Marsal, M. Mata, A. Arbonés, C. Miravete ¹

Resumen

En una parcela comercial de almendros (cv "Marcona") se estudia el efecto de la supresión del riego en diferentes fases del ciclo anual. Se aplican 5 tratamientos de riego (Control: riego durante toda la campaña; T-1: corte de riego del 15 de marzo al 15 de mayo; T-2: corte de riego del 15 de mayo al 15 de junio; T-3: corte de riego del 15 de junio al 1 de agosto y T-4: corte de riego del 15 de agosto hasta la cosecha (\approx 15 de septiembre)). Se observa la gran sensibilidad a la falta de agua que presentan los tratamientos T-2 y T-3 todos los años del ensayo, y la sensibilidad extrema del tratamiento T-1 en los años de pluviometría muy restringida en los meses de invierno y primavera. Se analizan los efectos del corte de riego sobre el estado hídrico de la planta (potencial hídrico de hoja al alba) y el intercambio de gases (conductancia estomática y fotosíntesis), el crecimiento vegetativo (perímetro del tronco), la evolución estacional del crecimiento del fruto (peso fresco y seco del fruto y del grano) y sobre la producción y sus componentes.

Summary

In a commercial almond plot (cv "Marcona") the effect of stopping irrigation water on different annual phases is analyzed. Five irrigation treatments were applied (Control: irrigation through-out of the season; T-1: to cutoff irrigation from March 15 to May 15; T-2: to cutoff irrigation from May 15 to June 15; T-3: to cutoff irrigation from June 15 to August 1st; T-4: to cutoff irrigation from August 1st to harvest (\approx September 15th)). T-2 and T-3 showed the highest sensitivity to lack of water in all of the experiment seasons, while T-1 showed a very extreme sensitivity to water deficit, but only years without rainfall during winter and spring time. The effects of irrigation cutoff have been analyzed being based on tree water status (predawn leaf water potential); leaf gas exchange (stomatal conductance and photosynthesis); vegetative growth (trunk circumference); seasonal patterns of fruit growth (fresh and dry weights of fruit and kernel); yield and its components.

1. Introducción.

El almendro es una especie que se adapta a situaciones de disponibilidades hídricas muy diversas, de tal forma que se encuentran plantaciones productivas en condiciones tan opuestas como las del Valle de San Joaquín (California) donde los suelos son fértiles, profundos y los almendros reciben cantidades de agua de riego muy importantes (1000 mm/año)(Micke y Kester, 1978), y las de los secanos del litoral mediterráneo, donde los almendros reciben únicamente agua de lluvia y los suelos son normalmente pobres y superficiales (Vargas, 1975; Grassely y Crossa-Reynaud, 1984). Evidentemente en estas condiciones de cultivo la repercusión productiva es muy considerable, con una ratio medio de 1/10 favorable a las condiciones de regadío (Girona, 1992).

Parece evidente que la práctica del riego podría mejorar la situación de los almendros de secano y aumentar los beneficios que los agricultores reciben por este cultivo. Aunque en las zonas tradicionales de cultivo las disponibilidades de agua de riego sean muy reducidas, una buena gestión de los recursos hídricos existentes (a pesar de que éstos sean muy limitados) aplicando el riego en aquellos momentos

¹ Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA)
Àrea de Tecnologia Frutícola
Centre R+D, Lleida. Rovira Roure 177, 25198- Lleida.

del ciclo anual en que el efecto sobre la producción y calidad del fruto sea más notorio, podría mejorar considerablemente los resultados productivos.

Para ello se precisa de un conocimiento en profundidad de los requerimientos hídricos estacionales y totales de la especie (Girona *et al.*, 1993; Girona *et al.*, 1994), de la respuesta del almendro a la aplicación de estrategias de riego deficitario controlado (Goldhamer y Shackel, 1990; Girona *et al.*, 1994; Goldhamer y Smith, 1995), donde el agua tan solo se aplica en las fases más sensibles al déficit hídrico, y muy especialmente del conocimiento de su sensibilidad estacional al déficit hídrico.

Con el objetivo de determinar la sensibilidad estacional del almendro al déficit hídrico se ha planteado este ensayo experimental.

2. Material y métodos.

El experimento se desarrolló durante los años 1992, 1993 y 1994 en una parcela comercial de 1 ha, situada en el término municipal de Reus (Tarragona), donde la variedad principal era "Marcona" y el polinizador "Garrigues". En este trabajo se utilizaron un total de 360 almendros de 15 años de edad, plantados a un marco de 5 x 5 m., sobre un suelo de textura limo-arcillo-arenosa con abundancia de elementos gruesos y de profundidad media de 50 cm, limitado en su parte inferior por un horizonte petrocálcico.

El sistema de riego pre-instalado en la parcela comercial se modificó para adaptarlo a los requerimientos del ensayo, instalando un tubería principal de PE en cada hilera de árboles y colocando una válvula manual para el control de cada parcela elemental. Los árboles sometidos a corte de riego se veían restringidos del aporte hídrico mediante el cierre manual de la válvula de paso que controlaba la parcela elemental.

La parcela se cultivó siguiendo las prácticas comerciales habituales, incluyendo la aplicación de herbicidas en la línea de los árboles y el cultivo del suelo en medio de las calles.

Se definieron 4 tratamientos de corte de agua y un tratamiento control donde no se aplicó ninguna interrupción de los aportes hídricos (Tabla 1). El planteamiento estadístico correspondía a un diseño de bloques al azar con 4 repeticiones. Cada parcela elemental constaba de 15 árboles (5 x 3), donde los tres centrales se utilizaron para la realización de todos los controles y el resto sirvió de árboles guarda.

Tabla 1. Tratamientos de corte de agua en almendro.

Tratamiento	Descripción	Corte de Riego	
		Período	Nº de días
T-1	CR durante el período más importante de crecimiento vegetativo.	--- al 15 de mayo	45
T-2	CR durante la fase del crecimiento de la parte externa del fruto.	15/05 al 15/06	31
T-3	CR durante la primera fase de crecimiento del grano	15/06 al 01/08	45
T-4	CR durante la segunda fase de crecimiento del grano	01/08 a Cosecha	35-40
Control	Riego sin cortes		

CR Corte de riego

La cantidad de agua aplicada a cada tratamiento se determinó en base a la lectura semanal de contadores volumétricos de agua localizados al inicio de cada fila de árboles.

Mensualmente se midió el diámetro de tronco para determinar el efecto del corte de agua en el crecimiento del árbol (Veihmeyer, 1975).

El potencial hídrico de hoja se determinó con la técnica de la bomba de presión (Scholander *et al.*, 1965) siguiendo las recomendaciones de Turner y Long (1980). Las lecturas se realizaron con la consola SoilMoisture (SoilMoisture Equipment Corporation, Model 3005). Se realizaron controles antes de la salida del sol. La tasa neta de asimilación de CO₂ (A) y la conductancia estomática (g_s) se determinaron con un sistema IRGA portátil (ADC Ltd., Model ADC LCA-2), de acuerdo con la ecuación propuesta por von Caemmerer y Farquhar (1981). Los controles se realizaron mensualmente a las 8:00, 11:00 y 14:00 h.

Semanalmente se tomó una muestra de 60 frutos/ tratamiento (15 frutos/repetición), donde se determinaban los parámetros de longitud, anchura y altura de los frutos, y el peso fresco y seco del fruto entero, de la cáscara y del grano.

3. Resultados y discusión.

Las cantidades totales de agua aplicadas anualmente a cada tratamiento siguieron las pautas impuestas por la definición de los mismos (Tabla 2). El tratamiento Control recibió el 100% de las cantidades de agua (un promedio de 313 mm/año), mientras que T-3 recibió la menor cantidad de agua (una media de 201 mm/año, un 64% del agua aplicada al Control).

Tabla 2. Cantidades de agua aplicadas a los diferentes tratamientos de riego en almendro (mm).

Años	Tratamientos de riego				
	T-1	T-2	T-3	T-4	Control
1992	219	221	91	156	229
1993	335	308	259	242	373
1994	234	258	254	296	336
Promedio	263	262	201	231	313
% Control	84	84	64	74	100

El potencial hídrico de hoja medido al alba (Ψ_{pd}) puso de manifiesto el grado de estrés al que se sometían los diferentes tratamientos de riego; así cabe destacar que en los tratamientos en que el corte de riego se efectuaba los meses de verano (T-3 y T-4) los valores de Ψ_{pd} eran próximos a los -2 MPa (Tabla 3). Resulta evidente que las cantidades de agua aportadas, incluso en el tratamiento Control, no eran suficientes para cubrir las necesidades máximas de este cultivo ya que dotaciones anuales de 313 mm están muy lejos de los requerimientos máximos del almendro, evaluados, en unos 650 mm/año (Girona *et al.*, 1994). Así mismo los valores tan bajos de Ψ_{pd} confirman esta situación, pues valores normales en almendros bien regados se podrían situar en -0.4 MPa (Castel y Fereres, 1982; Torrecillas *et al.*, 1989; Marsal *et al.*, 1994).

El desarrollo secundario del tronco del almendro se vió afectado por los tratamientos de corte de riego, especialmente cuando las restricciones hídricas se aplicaban el mes agosto (T-4)(fig. 1). También los tratamientos T-1 y T-3 se vieron afectados por el corte de agua. No obstante T-2 mostró las mismas tendencias de crecimiento que el tratamiento Control (fig. 1).

Las restricciones hídricas aplicadas en los meses de máxima demanda redujeron considerablemente los valores de asimilación neta de CO₂ (A) y de conductancia estomática (g_s) (fig. 2), en los tratamientos sometidos a corte de riego en aquella fase. En los tratamientos con riego los valores de A fueron muy semejantes a los obtenidos en condiciones óptimas de riego, aunque los de g_s eran ligeramente inferiores (Marsal *et al.*, 1994), lo cual sugeriría que en estos árboles, cuando no estaban sujetos a corte de riego, la eficiencia en el uso de agua, a nivel de hoja, era superior a la que podían mostrar los árboles en condiciones teóricamente óptimas de riego.

Tabla 3. Estado hídrico del almendro en respuesta a la restricción del riego en diferentes fases del ciclo anual.

Tratamiento	Potencial hídrico de hoja medido al alba (MPa)		
	Final Fase T3	Final Fase T2	Final Fase T3
	27-07-92	15-06-93	02-08-93
T-1		-0.46 a	
T-2	-1.13 a ^z	-1.80 b	-0.84 a
T-3	-2.01 b	-0.50 a	-2.24 b
T-4	-1.06 a		-0.86 a
Control	-1.20 a	-0.51 a	-1.04 a
ANOVA ⁽¹⁾	***	***	***

⁽¹⁾ *** se corresponde con análisis de la varianza significativos para valores de $\alpha \leq 0.01$.

^z Separación de medias según el test de Duncan para $\alpha \leq 0.05$

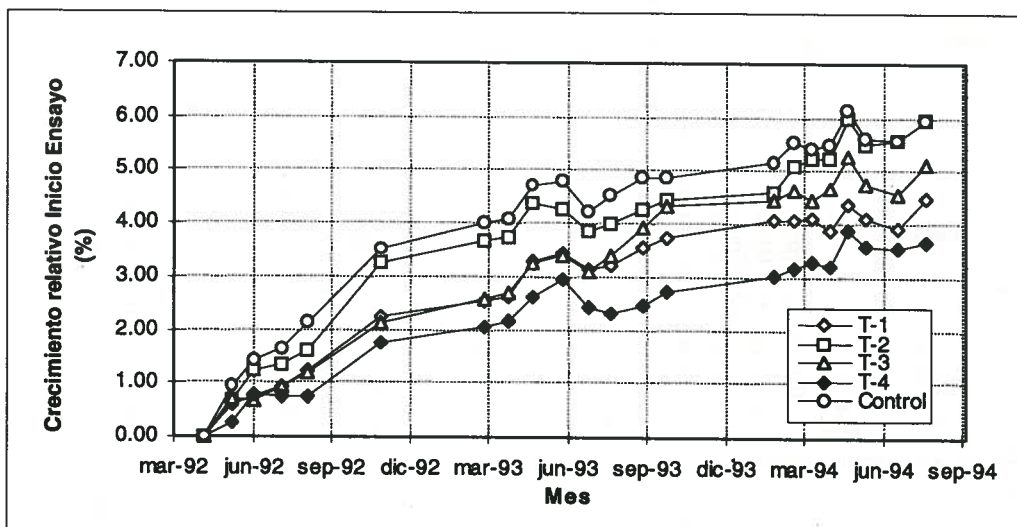


Figura 1. Evolución estacional del crecimiento relativo (al inicio del ensayo) del perímetro de tronco del almendro en respuesta a los tratamientos de corte de riego aplicados. Cada punto representa la media de 4 repeticiones (3 árboles/repetición).

Teniendo en cuenta la climatología de los tres años de ensayo, el análisis de los resultados medios de producción y número de frutos/árbol (Tabla 4), se puede concluir que las fases más sensibles del almendro a la falta de agua de riego son las que se corresponden con los T-2 y T-3 (de mediados de mayo a finales de julio). En estos tratamientos se observó una importante caída de frutos durante sus respectivos cortes de riego.

Los efectos de los diferentes tratamientos de corte de riego sobre el peso medio del fruto y del grano (Tabla 5) fueron mínimos, a pesar de las importantes implicaciones que las restricciones hídricas indujeron en el número de frutos y crecimiento vegetativo, como se ha comentado anteriormente. No obstante, algunos casos puntuales rompen esta tónica, y así se observa como el peso medio del grano y del fruto en el T-1 en 1994 presentaron valores absolutamente menores al resto de los tratamientos. Ello se debió a que 1994 fue el único año (de la serie de 3 del estudio) en el que las precipitaciones de invierno y primavera fueron muy escasas, afectando significativamente al crecimiento de la cáscara y pellejo (envolvente) de la almendra (fig. 3 A,B). Al crecer el grano (aunque en el período de dicho crecimiento no hubiese limitación hídrica) éste se vió limitado por el tamaño del envolvente lo que se tradujo en una parada brusca en su crecimiento (fig. 3 C,D).

El efecto más negativo de aplicar déficit hídrico en el tratamiento T-4 (mes de agosto) se parece centrar en la disminución del crecimiento del diámetro de tronco, ya sea por falta de carbohidratos o simplemente por falta de rehidratación durante este mes (fase típica del crecimiento vegetativo

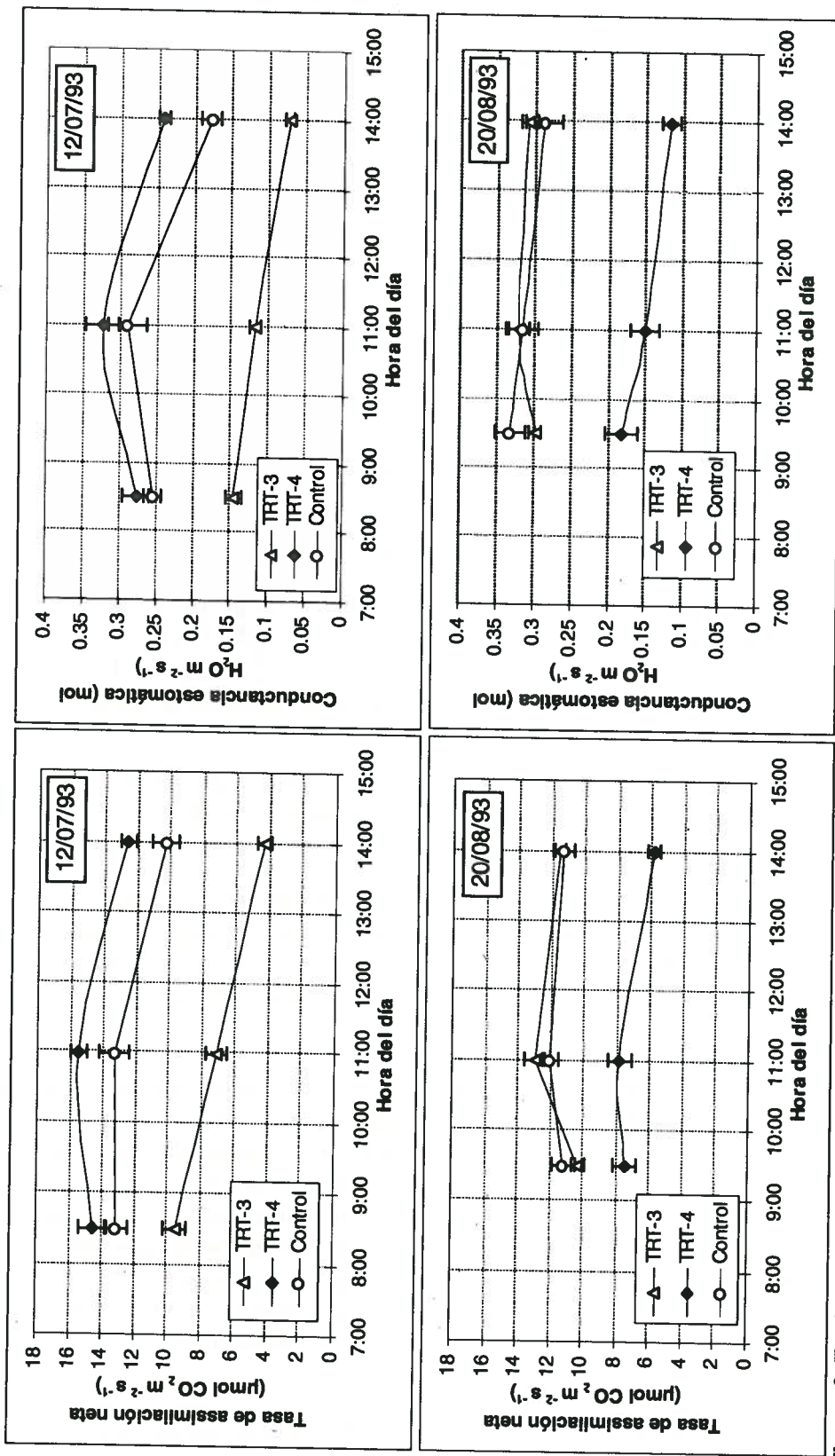


Figura 2. Evolución diaria de la tasa neta de asimilación de CO₂ (A) y de conductancia estomática (g_s), los días 12/07/93 y 20/08/93, de las hojas de almendro en respuesta a los tratamientos de corte de riego aplicados. Cada punto representa la media de 12 observaciones (±ES)

secundario en almendro (Kester *et al.*, 1994) y melocotonero (Girona *et al.*, 1995). Un efecto que podría considerarse positivo es el incremento en el número de frutos/árbol observado en T-4 en 1993, como consecuencia de la restricción hídrica aplicada en la fase de diferenciación floral en 1992, lo que propició un aumento del número de yemas que se diferenciaron a productivas. Aunque este efecto, ampliamente observado con anterioridad en el género *Prunus* (Larson *et al.*, 1988; Patten *et al.*, 1988; Goldhamer y Sackel, 1990), se manifestara en 1993, ni en 1994, ni en la media de los 3 años se detecta de forma consistente. En 1994 un fuerte viento acaecido en el mes de abril ocasionó una caída de un 40% de los frutos de todos los árboles, pero considerablemente menor en el T-1 (observaciones visuales, no controladas).

Tabla 4. Respuesta productiva del almendro a la restricción hídrica en diferentes fases del ciclo anual.

Tratamiento	Producción (kg grano/ha)				Número de Frutos / Árbol			
	1992	1993	1994	Media	1992	1993	1994	Media
T-1	2151 a ^z	2712 ab	1488	2191 a	3770 a	5137 a	3573	4594 a
T-2	1516 bc	1827 c	1309	1575 b	2589 bc	3483 b	2507	3105 b
T-3	1306 c	1967 c	1550	1644 b	2261 c	3608 b	2955	3206 b
T-4	1596 bc	3141 a	1625	2180 a	2704 bc	5929 a	3042	4290 a
Control	1734 ab	2645 ab	1596	2005 a	3093 ab	4966 a	3117	4013 a
ANOVA ⁽¹⁾	***	***	NS	***	***	***	NS	***

⁽¹⁾ NS, *, **, *** se corresponden con análisis de la varianza no significativos, o significativos a valores de $\alpha \leq 0.10$, 0.05 o 0.01 respectivamente.

^z Separación de medias según el test de Duncan para $\alpha \leq 0.10$

Tabla 5. Respuesta del fruto del almendro a la restricción hídrica en diferentes fases de su ciclo anual.

Tratamiento	Peso fresco medio del fruto (g)				Peso fresco medio del grano (g)			
	1992	1993	1994	Media	1992	1993	1994	Media
T-1	5.68 bc	4.80 a	4.19 b	4.89 c	1.44	1.32 a	1.14 b	1.30 c
T-2	5.91 ab	4.56 a	5.58 a	5.35 ab	1.48	1.32 a	1.45 a	1.41 ab
T-3	5.55 bc	4.76 a	5.35 a	5.22 ab	1.45	1.37 a	1.46 a	1.43 a
T-4	6.11 a	4.74 a	5.54 a	5.46 a	1.51	1.34 a	1.47 a	1.44 a
Control	5.43 c ^z	4.71 a	5.18 a	5.11 bc	1.40	1.34 a	1.42 a	1.39 b
ANOVA ⁽¹⁾	**	***	***	***	NS	***	***	***

⁽¹⁾ NS, *, **, *** se corresponden con análisis de la varianza no significativos, o significativos a valores de $\alpha \leq 0.10$, 0.05 o 0.01 respectivamente.

^z Separación de medias según el test de Duncan para $\alpha \leq 0.10$

Aunque la reducción de los aportes hídricos en verano (Girona *et al.*, 1994) o incluso los cortes de riego, no tan estresantes como los aquí expuestos, parecen no tener una incidencia importante sobre la producción del almendro (Andriani *et al.*, 1989; Goldhamer y Shackel, 1989), se ha observado en este trabajo como el tratamiento T-3 se vió afectado de forma considerable por la supresión de los aportes hídricos, aunque estos se produjeran en una fase del ciclo anual teóricamente poco sensible. Algunas consideraciones se apuntan como las más razonables para entender este efecto drástico sobre la producción: un efecto varietal, que el corte de riego se haya realizado antes del período crítico de la caída de frutos (Girona, 1992), o la combinación de la severidad del estrés (valores de Ψ_{pd} inferiores a los -2 MPa) y la variedad base del estudio.

4. Conclusiones.

El trabajo experimental pone de manifiesto la extrema sensibilidad del almendro en la fase T-1 a déficits hídricos extremos en los años de escasa o nula pluviometría en primavera, con sus efectos negativos sobre el fruto, mientras que la falta de agua en los períodos de corte correspondientes a los tratamientos T-2 y T-3 parece reflejarse en el número de frutos/árbol

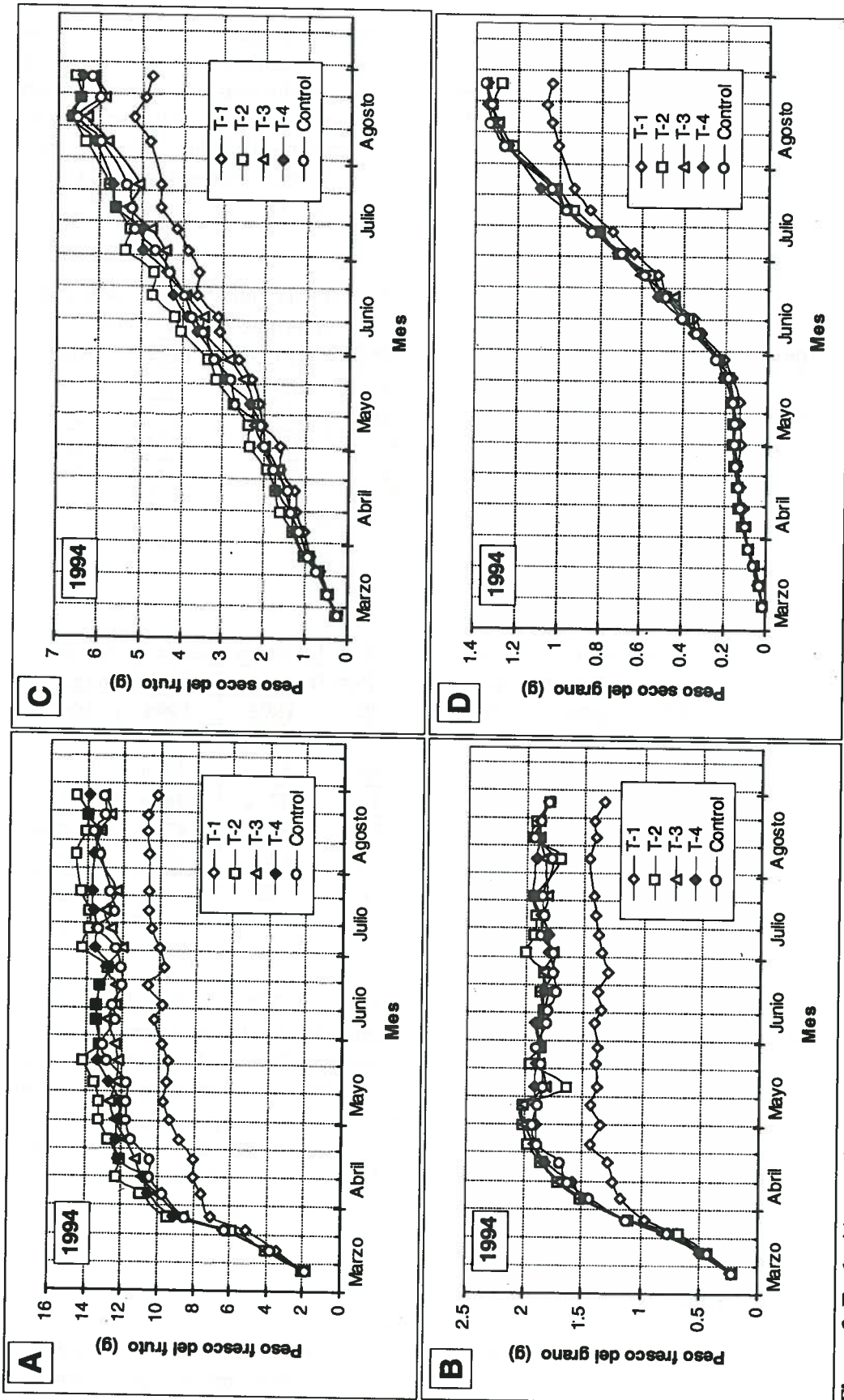


Figura 3. Evolución estacional del peso medio (fresco y seco) del fruto y del grano del almendra en respuesta a los tratamientos de corte de riego aplicados. Cada punto representa la media se cuatro repeticiones (1.5 frutos/repeticion).

5. Reconocimientos.

Este trabajo experimental fue parcialmente financiado por el proyecto CEE 8001-CT91-0301.

6. Bibliografía.

- Andriani, M.G.; L. Gatto; G. Miali y D. Tagliente, 1989. Influenza del método e del regime irriguo sulle rese del mandorlo (cv "Genco") nel tavoliere di Puglia. Irrigazione e Drenaggio. Anno XXXVI, Oct.-Dic. 1989:109-112.
- Castel, J.R. y E. Fereres, 1982. Responses of young almond trees to drought periodes in the field. Journal of Horticultural Science 57(2):175-187.
- Girona, J., 1992. Estrategias de riego deficitario en el cultivo del almendro. Fruticultura Profesional. 47:38-45.
- Girona, J.; J. Marsal; M. Cohen; M. Mata y C. Miravete, 1993a. Physiological, growth and yield responses of almond (*Prunus dulcis* L.) to different irrigation regimes. International Symposium Horticultural Irrigation. ISHS-SECH. Almeria (Spain) 1992. Acta Horticulturae 335:389-398.
- Girona, J.; M. Mata; D.A. Goldhamer; R.S. Johnson y T.M. DeJong, 1993b. Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 118(5):580-586.
- Girona, J.; M. Mata; J. Marsal y C. Miravete, 1994. Efectos acumulados de 3 años de un riego deficitario controlado en almendro (*Prunus dulcis* L.). XII Jornadas Técnicas sobre Riegos. Pamplona 1994. Comunicaciones, Anejo I:1-8.
- Goldhamer, D.A. y K. Shackel, 1989. Irrigation cutoff and drought irrigation strategy effects on almond: 1st year results. 17th Annual Almond Research Conference. Modesto 1989:35-37.
- Goldhamer, D.A. y K. Shackel, 1990. Irrigation cutoff and drought irrigation strategy effects on almond: 2nd year results. 18th Annual Almond Research Conference. Fresno 1990:30-35.
- Goldhamer, D.A. y T.E. Smith, 1995. Single-season drought irrigation strategies influence almond production. California Agriculture 49(1):19-22.
- Grasselly, C. y P. Crossa-Reynaud, 1984. El almendro. Ed. Mundi-Prensa. 465 pp.
- Kester, D.E.; G.C. Martin y J.M. Labavitch, 1994. Growth and Development. (Chapter 14). En: Syllabus for the Almond Short Course, W.C. Micke (T.Ed.) ANR Publications. University of California. Draft:(14-1)-(14-7).
- Larson, K.D.; T.M. DeJong y R.S. Johnson, 1988. Physiological and growth responses of mature peach trees to postharvest water stress. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 113(3):296-300.
- Marsal, J.; J. Girona; M. Mata y C. Miravete, 1994. Efectos de un riego deficitario controlado sobre la capacidad fotosintética del almendro (*Prunus dulcis* L.). XII Jornadas Técnicas sobre Riegos. Pamplona, 1994. Comunicaciones : 187-194.
- Micke, W. y D. Kester, 1978. Almond Orchard Management. Division of Agricultural Science. University of California, Publication 4092.
- Patten, G.; G. Nimr y E. Neuendorff, 1989. Fruit doubling as affected by water stress. Acta Horticulturae 254:319-321.
- Scholander, P.F.; H.T. Hammel; E.D. Bradstreet y E.A. Hemmingsen, 1965. Sap pressure in vascular plants. Physiol. Plant. 37:167-174.
- Torrecillas, A.; M.C. Ruíz-Sánchez y A. Hernansaez, 1989. Response of leaf water potential to estimated transpiration in almond trees. Journal of Horticultural Science 64(6):667-671.
- Turner, N.C. y M.J. Long, 1980. Errors arising from rapid water loss in the measurement of leaf water potential by the pressure chamber technique. Aust. J. Plant Physiol. 7:527-537.
- Veihmeyer, F.J., 1975. The growth of fruit trees in response to different soil moisture conditions measured by widths of annual rings, and other means. Soil Science 119(6):448-460.
- von Caemmerer y G.D. Fraquhar, 1981. Some relationships between biochemistry of photosynthesis and gas exchange of leaves. Planta 153:376-387.
- Vargas, F.J., 1975. El almendro en la provincia de Tarragona. Ed. Diputación de Tarragona. 165 pp.

EVAPOTRANSPIRACION Y COEFICIENTES DE CULTIVO DE LA LECHUGA EN RIEGO POR SURCOS

L. Rincón

J. Sáez

Dpto de Riegos. Centro de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (CIDA).
30.150 La Alberca . Murcia.

RESUMEN

Se ha estudiado en riego por surcos la respuesta productiva de un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L. va capitata) cv Coldward a cuatro niveles de riego correspondientes a 0,5 Ev, 0,75 Ev, Ev y 1,25 Ev en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. Dos coeficientes de cultivo K (ET_c/E_v) y K_c (ET_c/ET_o) fueron determinados mediante la medición directa de la ET del cultivo en dos lisímetros de drenaje. En el período de cultivo, la ET_c fue de 282,2 mm, el coeficiente de cultivo K varió desde 0,6 a 0,95 y el coeficiente K_c desde 0,7 a 1,2.

PALABRAS CLAVE: *Lactuca sativa*
Riego por surcos
Evapotranspiración
Coeficientes de cultivo

SUMMARY

Yield response of lettuce (*Lactuca sativa* L. va capitata) cv Coldward to four different furrow irrigation rates, was determined in 1990 at Cartagena country (Murcia). Treatments were arranged in a gradient irrigation design replicated four times and irrigated with amounts of water ranging from 50, 75, 100 and 125 % of evaporation data from "CLASS A" pan. Two crop coefficient curve K (ET_c/ev) and K_c (ET_c/ET_o) for furrow irrigated lettuce were defined, using two drainage lisimeters for measuring ET_c directly. Unrestricted ET_c was found to be 282,2 mm, the crop coefficient K changed from 0,6 to 0,95 and the K_c from 0,7 from 1,2 in the growth period.

KEY WORDS: *Lactuca sativa*
Furrow irrigation
Evapotranspiration
Crop Coefficients

INTRODUCCION

El conocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos, estableciendo los coeficientes de cultivo en las distintas fases vegetativas para cada zona de cultivo, constituye la información básica más importante a partir de la cual es posible conseguir el manejo adecuado del agua de riego y la máxima eficiencia (Ferer 1987).

Son bastante escasos los datos existentes sobre evapotranspiración en lechuga y prácticamente nula la disponibilidad de coeficientes de cultivo para nuestras condiciones de cultivo. La mayoría de los estudios realizados se han centrado en la eficiencia de los distintos sistemas de riego utilizados, basándose en el mantenimiento de distintos niveles de humedad en el suelo (Bert, Honma, 1975; Sammis, 1980; Sutton, Merit, 1993) y los efectos del déficit hídrico en la producción (Behboudian, Holsteijn, 1977; Sammis *et al.*, 1988).

El objetivo del presente trabajo ha sido el de determinar la evapotranspiración y los coeficientes de cultivo para las distintas fase vegetativas de un cultivo de lechuga con riego por surcos.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en la finca experimental Torreblanca del CIDA, situada en la comarca del Campo de Cartagena (37° 40' N - 0° 58' W) en Murcia, zona más importante de cultivo de la lechuga iceberg.

Las plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L. va *Capitata*) cv Colguard se obtuvieron en semillero aparte y se trasplantaron a la parcela de ensayo el 3 de Enero de 1991 a una densidad de 6,66 plantas/m² (líneas pareadas a 1 m de distancia, 0,3 m entre las dos filas de cada línea y 0,3 m entre las plantas de cada fila).

Las características del suelo a la profundidad de 45 cm eran: textura franco arcillosa; carbonatos totales 31,68 %; caliza activa 9,38 %; materia orgánica 1,83 %; P(Olsem) 438 ppm; K(AC-NH₄) 241,43 ppm; pH 7,76; CEes (25° C) 4,68 dS/m. El agua de riego tuvo una Conductividad Eléctrica de 1,26 dS/m.

El sistema de riego por surcos fue de gateras (tubería de PVC de 200 mm de diámetro y gateras situadas a un metro de distancia), con control en cabecera de volúmenes de riego aportados.

La superficie total de cultivo fue de 1200 m², dentro de la cual se estableció un diseño de bloques aleatorios con cuatro repeticiones. Cada parcela elemental consistió en 4 líneas de plantas de 10 m de longitud (40 m²), actuando las dos laterales como guardas de parcelas (tratamientos) colindantes.

Se ensayaron cuatro tratamientos diferenciales de aportación de agua del 50 %, 75 %, 100 % y 125 % de la evaporación producida en un tanque CLASE A. La dosis práctica de riego según capacidad de retención de agua en el suelo y profundidad

radicular fue de 37,5 mm, produciéndose el riego en cada tratamiento cuando la altura de agua acumulada en mm alcanzaba el valor de la dosis de riego:

En dos bloques del tratamiento de mayor aporte hídrico, se instalaron dos lisímetros de drenaje de 3 m² de superficie (3 m x 1 m) y 0,65 m de profundidad, con capacidad para 20 plantas. En ellos se calculó la ET del cultivo mediante balance hídrico según la expresión:

$$ET = P + R - D \pm \Delta W$$

donde, ET = evapotranspiración del cultivo; P = precipitación; R = riego; D = drenaje y ΔW la variación de humedad del suelo en el ciclo de cultivo.

El riego de los lisímetros se realizó juntamente con el tratamiento de mayor aportación hídrica. La evaporación se midió diariamente en un tanque CLASE A dotado de tornillo micrométrico y situado en una estación agroclimática con cubierta verde situada a 250 m de la parcela de ensayo.

Para la evaluación de la ETo, se tuvo en cuenta el coeficiente de tanque Kp (Doorembos, Pruit, 1977), corrigiéndose mediante la ecuación de Frevert *et al.*, 1986.

RESULTADOS

El período de cultivo se desarrolló durante 104 días después del trasplante (3/1/90), presentándose en la tabla 1 los parámetros de producción obtenidos en los tratamientos ensayados. Las cantidades de agua aportadas en los tratamientos de 0,5 Ev y 0,75 Ev, resultaron insuficientes, principalmente en la segunda fase vegetativa del cultivo en la que la planta es más sensible a la falta de agua (Sammis *et al.*, 1988), resultando menor peso unitario de fruto, causa de la menor producción total de materia fresca conseguida. Las plantas de los tratamientos de mayor aportación de agua (Ev y 1,25 Ev) y lisímetros no presentaron diferencias apreciables en los parámetros analizados, denotándose la similitud de las condiciones dentro y fuera del lisímetro.

En el ciclo de cultivo comercial de la lechuga iceberg, se diferencian dos fases vegetativas (Maroto 1989). La primera fase se desarrolla durante los primeros 65-75 días después del trasplante (variable según época de cultivo) en la que se forma una roseta de hojas y la segunda fase denominada de acogollado entre los 65-70 y la recolección (95-120 días después del trasplante), en la que se forma un cogollo más o menos compacto de hojas que constituye la parte comercial de la planta. En la segunda fase (acogollado) se produce el máximo crecimiento vegetativo y extracción máxima de nutrientes (Zink, Yamaguchi, 1962; Rincón *et al.*, 1991). En las condiciones del ensayo la fase de formación de roseta de hojas se produjo en los primeros 68 días después del trasplante y la fase de acogollado desde el 68 hasta el 104 día después del trasplante en el que se realizó la recolección comercial del cultivo.

Las figuras 1 y 2 presentan la evolución de los valores medios semanales de Ev, ETo y Etc (medida en lisímetro) y valores acumulados respectivamente. La evaporación total en el período de cultivo fue de 317,1 mm, la evapotranspiración de referencia

(ET_o) de 264,4 mm y la ET_c de 282,2 mm. El agua total (P + R) aportada a los lisímetros fue de 450 mm.

Tabla 1. Parámetros de producción de la lechuga iceberg.

Tratamiento	Pt ¹ kg/ha	Nf _t /ha ² : 1.000	Pc ³ t/ha	Nf _c /ha ⁴ : 1.000	Pf _c ⁵ gr	Ic ⁶ %	R ⁷ mm	Ef ⁸ Kg/m ³
0,50Ev	43,07	66,70	19,16	64,06	299,09	44,50	158,55	19,60
0,75 Ev	59,54	66,70	28,72	64,87	442,73	48,25	237,82	16,80
1,00 Ev	65,68	66,70	40,48	65,56	617,44	61,64	317,10	13,79
1,20 Ev	66,70	66,70	38,79	60,06	645,85	58,15	380,52	11,16
LSD _{0,05}	4,54	---	2,02	1,55	30,06	3,17	---	0,64
Lisímetros	65,39	66,70	39,72	64,38	653,46	60,74	380,52	10,43

1. Producción total de materia verde.

2. Números de frutos totales por hectárea.

3. Producción comercial de materia verde = producción total - (deshojado + frutos destriados).

4. Número de frutos comerciales por hectárea.

5. Peso de fruto comercial.

6. Índice de cosecha = $100 \times \frac{\text{Producción comercial}}{\text{Producción total}}$

7. Altura de agua aportada en el riego.

8. Eficiencia del agua de riego = Cantidad de cosecha comercializada (kg) por unidad de agua aportada (m³) en el riego.

La medición de valores reales de la ET de la lechuga iceberg por medio de lisímetros, permitió obtener los valores de los coeficientes K y K_c al poder relacionar la ET del cultivo con la evaporación en tanque CLASE A y la evapotranspiración de referencia (ET_o). La figuras 3 y 4 presentan las curvas que establecen las relaciones de ET_c con Ev y ET_o respectivamente.

En la figura 5 se presentan las curvas y ecuaciones de regresión lineales que relacionan los coeficientes de cultivo K (ET_c/Ev) K_c (ET_c/ET_o) con el desarrollo vegetativo desde la plantación hasta la recolección (104 días después del trasplante).

El consumo de agua fue de 137,4 mm en la primera fase vegetativa (0-68 días después del trasplante) y de 144,8 mm en la fase de acogollado (68-104 días después del trasplante). El coeficiente de cultivo K_c aumentó desde 0,7 (15 días después del trasplante) a 1 en la primera fase vegetativa y de 1 a 1,2 en la segunda fase (tabla 2), valores estos últimos más elevados que los reflejados por Doorembos y Pruitt (1977).

CONCLUSIONES

Los valores de los coeficientes de cultivo K (ETc/Ev) y Kc (ETc/ETo) para períodos de quince días se presentan en la tabla 2. Los valores más elevados se producen en la fase vegetativa del acogollado, donde la planta es extremadamente sensible a la falta de agua.

Tabla 2. Coeficientes de cultivo de la lechuga Iceberg en riego por surcos.

	Días después del trasplante						
	15	30	45	60	75	90	105
K (ETc/Ev)	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
Kc (ETc/ETo)	0,7	0,8	0,87	0,95	1	1,1	1,15

BIBLIOGRAFIA

- BEHBOUDIAN, M.H., VAN HOLSTEIJN, H.M 1977. *Water relations of lettuce. I. Internal physical aspects for two cultivars.* Scientia Horticulturae, 7:9-17.
- BERT, J., HONMA, S 1975. *Effect of soil moisture and irrigation method on tipburn and edgeburn severity in greenhouse lettuce.* J. Ame. Soc. Hort. Sci. 100(3): 278-282.
- FERERES, E 1987. *Necesidades hídricas de los cultivos.* Simposio sobre necesidades hídricas de los cultivos y su abastecimiento. AERYD. Madrid. 40 pp.
- FREVERT, D.K., HILL, R.W., BRAATEN, B.C 1983. *Estimation of evapotranspiration coefficients.* Journal of irrigation and Drainage Engineering, 109 (2) 265-270.
- RINCON, L., BALSALOBRE, E., SAEZ, J., MADRID, R 1991. *Extracción de macronutrientes en lechuga iceberg.* Actas del II Congreso Nacional de Fertirrigación: 213-220.
- SAMMIS, T.W., KRATKY, B.A., WU, I.P 1988. *Effects of limited irrigation on lettuce an chinese cabbage yields.* Irrig Sci 9: 187-198.
- ZINK, F.W., YAMAGUCHI, M 1962. *Studies on the growth rate and nutrient absorption of head lettuce.* Hilgardia, Vol. 32, nº 11.

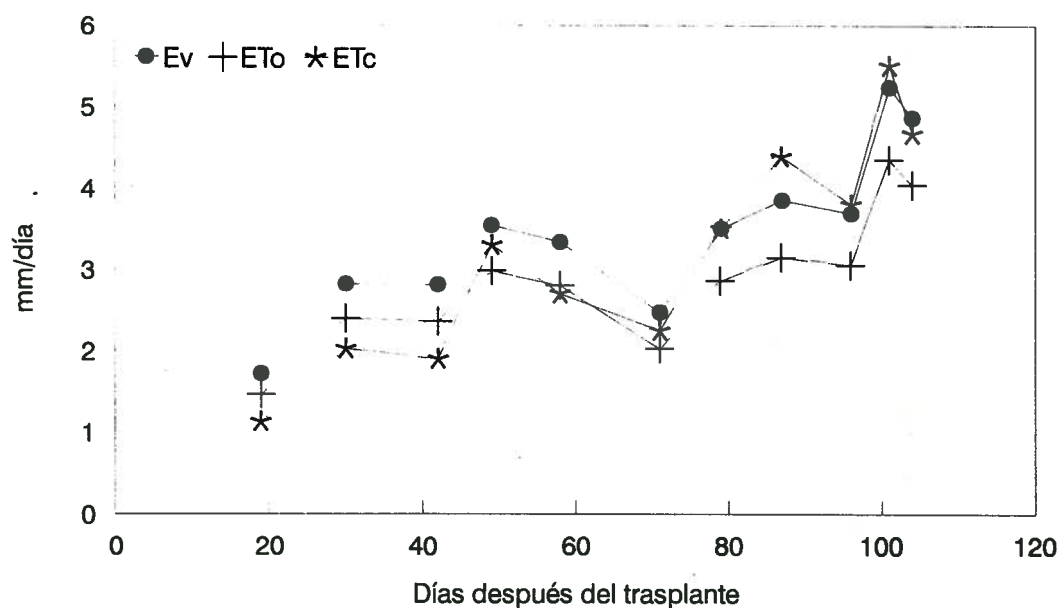


Fig. 1. Medias semanales de Ev, ETo (Ev x Kp) y ETc en mm/día.

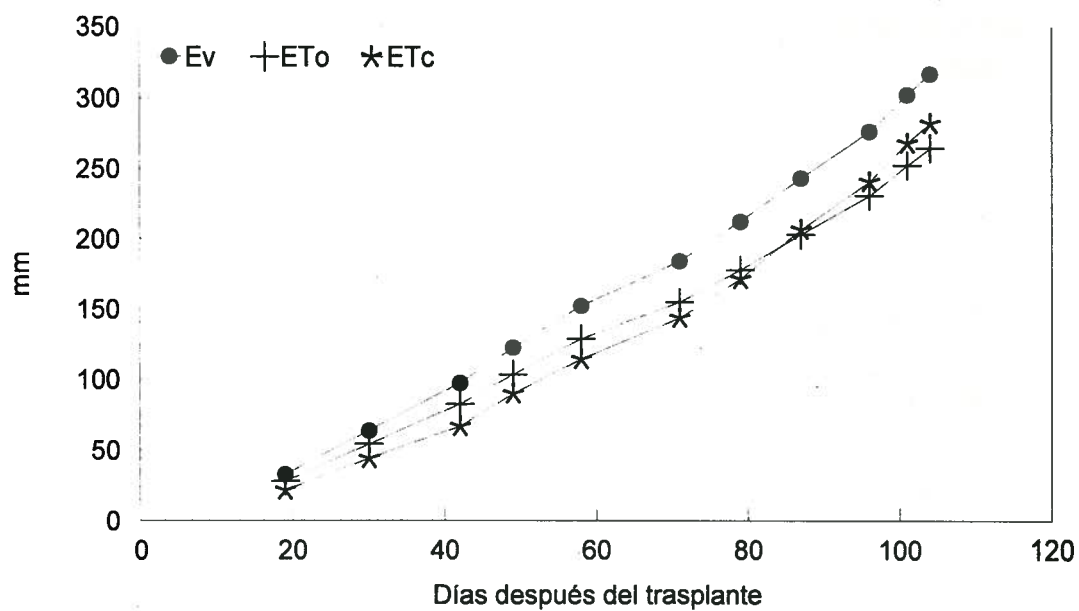


Fig. 2. Ev, ETo y ETc acumuladas en mm.

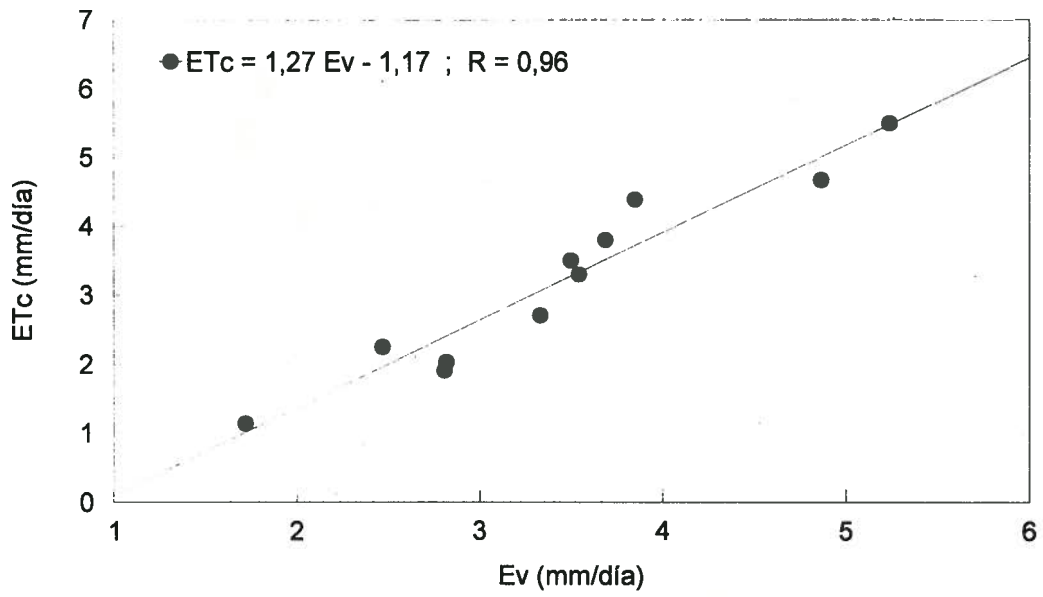


Fig.3. Relación entre ETc y EV.

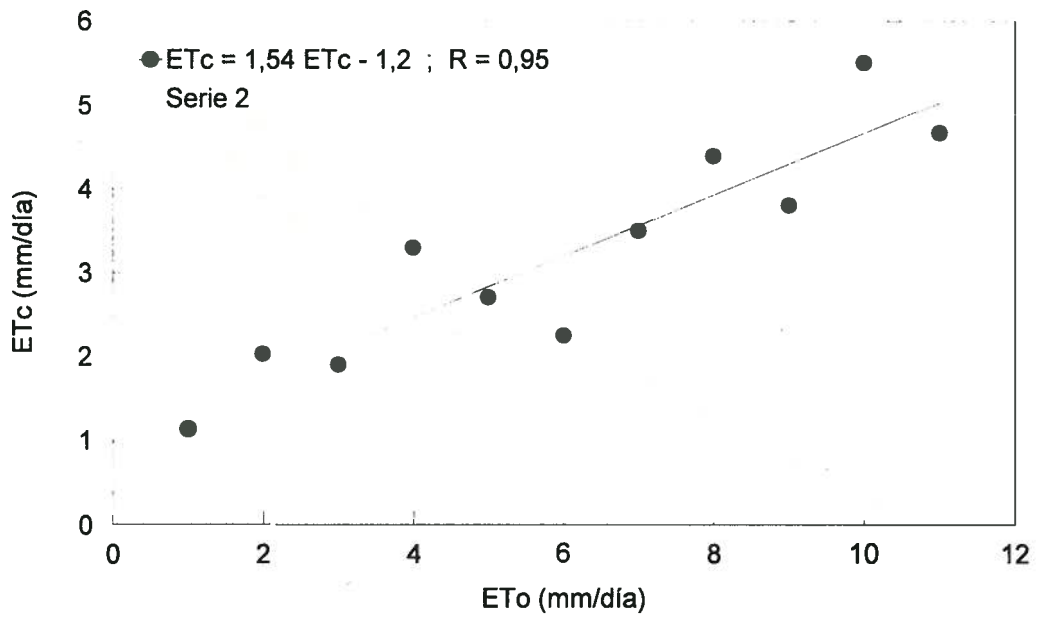


Fig. 4. Relación entre ETc y ETo.

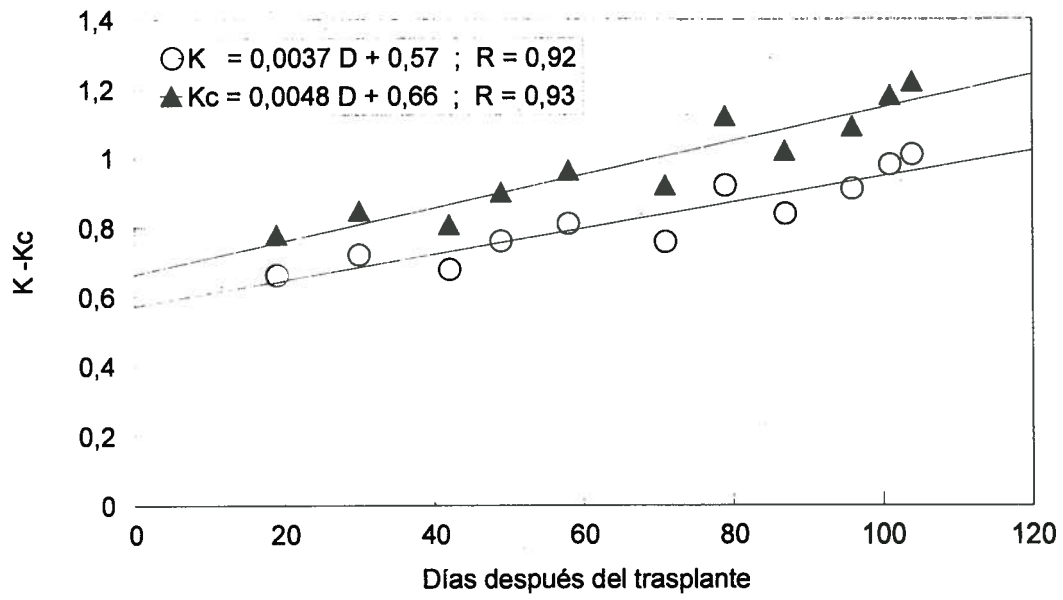


Fig. 5. Coeficientes K y Kc de la lechuga iceberg en riego por surcos.

PRESENTACIÓN EN CARTEL

EFFECTOS DE LA TRANSFORMACION Y EXPLOTACION EN REGADIO, SOBRE LA DEGRADACION DE LOS SUELOS DE LA ZONA DE BARRAX (ALBACETE)

Artigao Ramírez, A.*; Guardado López, R.* y Tébar García, J.I.*

RESUMEN

En esta comunicación se analiza la incidencia de la transformación y explotación en regadío en los suelos de la zona de Barrax (Albacete). Dado que las transformaciones en regadío son posteriores al año 1970, se estudian sólo los procesos de degradación biológica y degradación por salinización.

El estudio de la posible degradación, se hace por comparación de los valores de materia orgánica y conductividad eléctrica del extracto de saturación en el horizonte superficial de los suelos de doce parcelas (seis de secano y seis de regadío), cuya tipología queda incluida en el grupo principal "Calcisoles" de la Leyenda de FAO-UNESCO, haciendo un análisis de la situación en 1991 y de su evolución en el período 1991-1995.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede deducir que la transformación y explotación en regadío, no contribuye a la degradación biológica de los suelos, pero si parece incrementar el nivel de degradación por salinización, ya que se ha detectado una diferencia significativa en el contenido en sales entre los suelos que se riegan y los que se cultivan en secano, de tal modo que, algunos suelos presentan conductividades eléctricas en el extracto de saturación, próximas al límite para ser considerados salinos (4 dS.m^{-1}) y además en los últimos cuatro años, los incrementos de salinidad han sido apreciables en las superficies de riego estudiadas.

ABSTRACT

The incidence of installing and managing irrigation systems on the soils of Barrax, Albacete (Spain), is studied in this paper. Since irrigation started up after 1970, only the processes of biological and salinization degradation are considered.

INTRODUCCION

En la zona de Barrax (Albacete), el regadío existente es relativamente reciente, ya que las transformaciones se han realizado en los últimos veinticinco años. Estas transformaciones surgen como consecuencia de la baja rentabilidad de las explotaciones de secano, fruto, fundamentalmente, de la escasez e irregularidad de las lluvias, y ello ha hecho que en muchas fincas, que durante muchos años se han explotado con la clásica alternativa cerealista de "año y vez", tras la transformación en riego, se sigan alternativas que incluyen, principalmente los cultivos de maíz, cebada, girasol, alfalfa, e incluso, especies hortícolas.

El sistema elegido para la aplicación artificial de agua ha sido en exclusiva el de aspersión, en sus dos modalidades "cobertura total" y "pivote", extrayéndose el agua mediante sondeos en el acuífero existente en la zona, siendo el nivel estático del agua del orden de 50-65 m. Las aguas de este acuífero son de aceptable calidad para el riego, con valores de conductividad eléctrica inferiores a $0,75 \text{ dS.m}^{-1}$.

Este cambio en el sistema de explotación de los suelos de la zona, ha supuesto, sin duda, una alteración en las condiciones ecológicas de los mismos, lo que indudablemente ha hecho que varíe la dinámica de sus procesos formadores, y que, incluso puedan haber aparecido otros nuevos que estaban ausentes antes de la transformación en regadío, pudiendo haber variado, por tanto, el potencial productivo natural del medio edáfico (Lal *et al.*, 1989).

Como, según se ha indicado ya, las transformaciones en regadío son relativamente recientes, los únicos procesos de degradación (pérdida de capacidad productiva natural) del suelo que se pueden detectar en tan corto período de tiempo, son los correspondientes a la degradación por salinización y la degradación biológica (FAO, 1977; FAO-PNUMA-UNESCO, 1980), que son, por tanto los procesos que se analizan en esta comunicación.

La salinización es un proceso formador del suelo mediante el cual, por translocación, el perfil se enriquece en sales solubles que trae como consecuencia la disminución del potencial osmótico del agua del suelo, provocando un efecto depresivo en el desarrollo y crecimiento de los cultivos.

La degradación biológica acontece en los suelos cuando aumenta la velocidad de mineralización del humus, lo cual lleva consigo la disminución de la materia orgánica del suelo y la reducción de los beneficios aportados al mismo por este componente.

El desarrollo de los trabajos que aquí se exponen, se ha llevado a cabo dentro del proyecto EFEDA (Echival Field Experiment in a Desertification-Threatened Area), financiado por la Unión Europea (Sánchez *et al.*, 1992, 1994).

MATERIALES Y METODOS

Para estudiar la posible degradación de los suelos que se cultivan en regadío, se analizan las diferencias de los valores que presentan determinadas propiedades analíticas en estos suelos y en otros próximos que se explotan en régimen de secano (Arshad *et al.*, 1992).

A tal fin, se escogieron en el año 1991, con criterios geomorfológicos, seis parcelas cultivadas en regadío y seis parcelas de secano donde se realizaron las correspondientes calicatas para descripción y muestreo de los suelos.

La tipología de suelos resultó ser muy homogénea en toda la zona, ya que según la clasificación de FAO-UNESCO (FAO-UNESCO, 1988), ocho suelos se clasificaron como "Calcisol pétrico", dos como "Calcisol háplico", uno como "Calcisol lúvico" y uno como "Cambisol calcáreo".

El grado de degradación biológica se estimó a través del contenido en materia orgánica del horizonte superficial de los suelos. Dicho contenido se obtuvo multiplicando por 1,72 el contenido de carbono orgánico determinado de acuerdo con el método de Walkley-Black y según la técnica descrita en los Métodos Oficiales de Análisis del Ministerio de Agricultura, expresándose los resultados en porcentaje en peso de suelo seco.

El grado de salinización de los suelos se estimó por medio de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del horizonte superficial. Dicha conductividad se determinó con un conductímetro de acuerdo con los Métodos Oficiales de Análisis del Ministerio de Agricultura, expresándose los resultados en dS.m^{-1} .

A fin de profundizar en la evolución temporal de la degradación, en el año 1995 se volvieron a muestrear los suelos y a realizar nuevos análisis. Los muestreos tuvieron lugar en el mes de marzo de los años 1991 y 1995, y la gama de cultivos encontrada en el momento de la toma de muestras queda reflejada en el cuadro n° 1.

CUADRO N° 1. CULTIVOS EXISTENTES EN LAS PARCELAS.

A.- PARCELAS DE REGADIO

Parcela y año	Cultivo existente	Cultivo precedente
BAR 1 (1991)	-----	Maíz grano
BAR 1 (1995)	-----	Maíz grano
BAR 2 (1991)	-----	Maíz grano
BAR 2 (1995)	Guisante	Girasol
BAR 3 (1991)	-----	Maíz grano
BAR 3 (1995)	-----	Maíz grano
BAR 4 (1991)	Trigo	Girasol
BAR 4 (1995)	Cebada	Girasol
BAR 5 (1991)	-----	Maíz grano
BAR 5 (1995)	-----	Maíz grano
BAR 6 (1991)	-----	Maíz grano
BAR 6 (1995)	-----	Maíz grano

B.- PARCELAS DE SECANO

Parcela y año	Cultivo existente	Cultivo precedente
BAR 7 (1991)	Cebada	Barbecho
BAR 7 (1995)	Cebada	Barbecho
BAR 8 (1991)	Cebada	Cebada
BAR 8 (1995)	Barbecho	Cebada
BAR 9 (1991)	Cebada	Barbecho
BAR 9 (1995)	Cebada	Barbecho
BAR 10 (1991)	Cebada	Cebada
BAR 10 (1995)	Cebada	Cebada
BAR 11 (1991)	Barbecho	Cebada
BAR 11 (1995)	Cebada	Barbecho
BAR 12 (1991)	Cebada	Cebada
BAR 12 (1995)	Cebada	Cebada

RESULTADOS

Los resultados de las determinaciones analíticas realizadas en las muestras de los perfiles de suelo tomadas en 1991 en las parcelas elegidas, figuran en el cuadro n° 2 adjunto.

CUADRO N° 2. - DETERMINACIONES ANALITICAS (1991)

A. - PARCELAS DE REGADIO

Parcela	Tipo de Suelo	Materia Orgánica (%)	Conductividad eléctrica en extracto de saturación (dS.m⁻¹)
BAR 1	Calcisol pétrico	1,36	2,43
BAR 2	Calcisol pétrico	1,21	1,08
BAR 3	Calcisol pétrico	2,03	3,04
BAR 4	Calcisol pétrico	1,09	0,80
BAR 5	Calcisol pétrico	1,05	3,33
BAR 6	Calcisol háplico	1,45	1,31
Media	---	1,365	1,998
Desv. Est.	---	0,360	1,076

B. - PARCELAS DE SECANO

Parcela	Tipo de Suelo	Materia Orgánica (%)	Conductividad eléctrica en extracto de saturación (dS.m⁻¹)
BAR 7	Calcisol lúvico	1,42	0,94
BAR 8	Calcisol pétrico	1,74	0,78
BAR 9	Cambisol calcáreo	1,34	0,82
BAR 10	Calcisol háplico	1,52	0,80
BAR 11	Calcisol pétrico	1,21	0,45
BAR 12	Calcisol pétrico	2,12	0,90
Media	----	1,558	0,781
Desv. Est.	----	0,328	0,173

Con los valores de las determinaciones analíticas se realizó un análisis estadístico de comparación de medias. Habida cuenta que las varianzas poblacionales son desconocidas, las cuales no podemos suponer que sean iguales, y que el número de muestras es pequeño ($n_1 = n_2 = 6$ y menor que 30), el análisis se realizó haciendo uso del test de la "t" de Student. Los resultados obtenidos figuran en el cuadro adjunto n° 3.

CUADRO N° 3.- CONTRASTE ESTADISTICO DE HIPOTESIS DE COMPARACION DE MEDIAS (Muestras 1991)

Parámetro edáfico	Nivel de significación	Grados de libertad	t observada	t teórica	Resultado
Materia Orgánica	95	5	-0,972	0,353	No hay diferencia entre medias
Conductividad eléctrica en extracto de saturación	95	5	2,732	0,021	Si hay diferencia entre medias

De acuerdo con los datos que figuran en los cuadros 2 y 3, podemos señalar que los suelos de la zona poseen un bajo contenido en materia orgánica y que la explotación en regadío no parece incrementar los niveles de la misma.

En lo referente a la conductividad eléctrica, podemos observar que los suelos de secano de la zona, no presentan problemas de salinidad, pero que los que se explotan bajo riego, poseen niveles superiores, llegando en algunos casos a cifras por encima de 3 dS.m^{-1} .

Dado que las diferencias de contenido en materia orgánica no parecían ser significativas entre los suelos de secano y regadío, se realizó un nuevo muestreo en el año 1995 cuyos resultados y análisis comparativo con los obtenidos en el año 1991, figuran en el cuadro n° 4.

CUADRO N° 4. - CONTENIDOS COMPARATIVOS DE MATERIA ORGANICA

A.- PARCELAS DE REGADIO

Parcela	Materia Orgánica (% en 1991)	Materia Orgánica (% en 1995)	Variación absoluta	Variación relativa (%)
BAR 1	1,36	1,82	+ 0,46	+ 33,82
BAR 2	1,21	1,43	+ 0,22	+ 18,18
BAR 3	2,03	2,48	+ 0,45	+ 22,16
BAR 4	1,09	1,54	+ 0,45	+ 41,28
BAR 5	1,05	1,19	+ 0,14	+ 13,33
BAR 6	1,45	1,68	+ 0,23	+ 15,86
Media	1,365	1,690	+ 0,325	+ 23,80
Desv. Est.	0,360	0,443	-----	-----

B.- PARCELAS DE SECANO

Parcela	Materia Orgánica (% en 1991)	Materia Orgánica (% en 1995)	Variación absoluta	Variación relativa (%)
BAR 7	1,42	1,27	- 0,15	- 10,56
BAR 8	1,74	1,34	- 0,40	- 29,85
BAR 9	1,34	1,29	- 0,05	- 3,73
BAR 10	1,52	1,69	+ 0,17	+ 11,18
BAR 11	1,21	1,40	+ 0,19	+ 15,70
BAR 12	2,12	1,33	- 0,79	- 37,26
Media	1,558	1,386	- 0,172	- 11,03
Desv. Est.	0,328	0,155	—	—

Como se puede observar en el cuadro anterior, y probablemente debido a que el período 1991-1995 ha sido en la zona muy seco (pluviometrías medias inferiores al 80% de las normales), los niveles de materia orgánica de los suelos de secano han descendido en la zona, pasando a ser el contenido inferior al de los suelos de regadío, que incrementaron en este período su contenido en un porcentaje medio de 0,325.

Realizado un nuevo test de Student con el contenido de materia orgánica en 1995 entre las parcelas de secano y regadío, se obtuvo como resultado que no había diferencia significativa entre las medias.

En el cuadro nº 5 figura la evolución de la conductividad de los suelos de regadío en el período 1991-1995.

CUADRO Nº 5. - EVOLUCION DE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA DE LOS SUELOS DE REGADIO EN EL PERIODO 1991-1995

Parcela	CE ext. sat. (dS.m ⁻¹ en 1991)	CE ext. sat. (dS.m ⁻¹ en 1995)	Variación absoluta	Variación relativa (%)
BAR 1	2,43	3,48	+ 1,05	+ 43,21
BAR 2	1,08	1,09	+ 0,06	+ 5,82
BAR 3	3,04	2,82	- 0,22	- 7,23
BAR 4	0,80	1,57	+ 0,77	+ 96,25
BAR 5	3,33	3,38	+ 0,05	+ 1,50
BAR 6	1,31	2,65	+ 1,34	+ 102,29
Media	1,998	2,498	+ 0,500	+ 25,020
Desv. Est.	1,076	0,971	—	—

En este último cuadro se puede observar como en el período 1991-1995, los suelos que se explotan en regadío han seguido aumentando su contenido en sales, en la práctica totalidad de las parcelas, registrando un incremento medio absoluto de 0,5 dS.m⁻¹ (25,02% de incremento relativo).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los datos expuestos en el epígrafe anterior, podemos deducir las siguientes conclusiones y recomendaciones para los suelos de la zona estudiada.

- No parece que la puesta en regadío contribuya a la degradación biológica de los suelos, ya que en ninguno de los años en que se realizó el muestreo de suelos y las consecuentes determinaciones analíticas, la diferencia de contenido en materia orgánica entre los suelos de secano y regadío fue significativa, con un nivel de confianza del 95%.
- De acuerdo con los datos obtenidos en el trabajo, el regadío sí parece incrementar el nivel de salinidad de los suelos de la zona, y por tanto actúa como factor de degradación. Alguno de los suelos regados que se han estudiado, presentan ya valores cercanos al límite para ser considerados como salinos (4 dS.m-1 en el extracto de saturación) y por tanto, con cierto grado de degradación por salinización.
- Dado que la salinidad es una propiedad de los suelos muy variable a nivel espacial y temporal, y que en los últimos cuatro años se han detectado incrementos en los niveles de salinidad de los suelos de las parcelas regadas, se considera conveniente ampliar el estudio realizado, con observaciones en mayor número de parcelas y muestreos en los años sucesivos y en diferentes épocas. De este modo, se podrían, en su caso, realizar recomendaciones sobre manejo de suelo y agua que evitasen la degradación de los suelos de la zona, por incremento de su salinidad.

BIBLIOGRAFIA

- ARSHAD, M.A. y COEN, G.M. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *Amer. J. Alternative Agric.*, 7, 25-31.
- FAO. (1977). *Assessing soil degradation*. FAO Soils Bulletin 34, Roma.
- FAO-PNUMA-UNESCO. (1980). *Metodología provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos*. FAO, Roma.
- FAO-UNESCO. (1988). *Soil Map of the World : Revised Legende*. World Soils Resources Report. FAO, Roma.
- LAL, R., HALL, G.F. y MILLER, F.P. (1989). Soil degradation: I. Basic processes. *Land Degradation & Rehabilitation.*, 1, 51-69.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA. (1986). *Métodos Oficiales de Análisis*. Tomo III. Ministerio de Agricultura, Madrid.
- SANCHEZ, J., BOLUDA, R., ARTIGAO, A., MORELL, C. y COLOMER, J.C. (1992). Study Soil Degradation. In: *The ECHIVAL Field Experiment in a Desertification-Threatened Area (EFEDA)*. Final Report. Eds. H.J. Bolle & Streckenbach, Berlin.
- SANCHEZ, J., BOLUDA, R., ARTIGAO, A., MORELL, C., COLOMER, J.C. y GUARDADO, R. (1994). Suelos. In: *Desertificación en Castilla-La Mancha. El Proyecto EFEDA*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha (Colección Estudios, 23), Cap. 5, pp 17-28, Cuenca.

COMPARACIÓN DE SEIS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE DATOS CLIMÁTICOS

Hontoria Fernández, C.¹ (P), Saa Requejo, A² y Gascó Montes, J.M.³.

¹ Dra. Ingeniera Agrónoma. Departamento de Edafología. E.T.S.I. Agrónomos de Madrid.

² Dr. Ingeniero Agrónomo. Departamento de Edafología. E.T.S.I. Agrónomos de Madrid.

³ Dr. Ingeniero Agrónomo. Departamento de Edafología. E.T.S.I. Agrónomos de Madrid.

RESUMEN

Se han comparado seis métodos de estimación de la evapotranspiración a partir de datos climáticos utilizando como referencia el método de Penman-Monteith, ya que es considerado como el método que mejor estima la evapotranspiración de referencia en un amplio rango de climas y localidades. El cálculo de la evapotranspiración por los métodos de Thornthwaite (1948), Blaney-Criddle (1950), Turc (1961), Papadakis (1966), Hargreaves (1985) y Penman-Monteith (1965; Suttleworth, 1992) se ha realizado en una selección de 59 estaciones completas de la red de observatorios del Instituto Nacional de Meteorología. Los resultados obtenidos se han comparado mediante un análisis de regresión lineal para el conjunto de las 59 estaciones y todos los meses, para cada estación y para los meses enero y julio separadamente. Cuando se considera el conjunto de los datos resulta que el método de Blaney-Criddle sobrestima la evapotranspiración para los meses de baja ET, los métodos de Thornthwaite y Papadakis subestiman la evapotranspiración en los meses de alta ET, y los métodos de Hargreaves y Turc (que incluye la corrección por humedad relativa), siguen patrones similares al de Penman-Monteith aunque ligeramente bajos para evapotranspiraciones muy altas. Cuando sólo están disponibles los datos de temperatura, se recomienda el uso del método de Hargreaves para estimar la evapotranspiración.

SUMMARY

Six methods of estimating monthly evapotranspiration from climatic data have been compared using the Penman-Monteith method as the reference one since it is recommended as the best method of estimating reference ET over a wide variety of climates and locations. Thornthwaite (1948), Blaney-Criddle (1950), Turc (1961), Papadakis (1966), Hargreaves (1985) and Penman-Monteith (1965; Suttleworth, 1992) methods have been applied to estimate ET in 59 selected locations with complete climatic data of the National Meteorological Institute. A linear regression analyses has been made to compare the values obtained by the different methods for the whole 59 stations and for all the months as well as for each station considering all the months together and January and July separately. For the whole data, Blaney-Criddle method overestimates ET during the months of low ET, Thornthwaite and Papadakis methods subestimate ET during the months of high ET, and Hargreaves and Turc (including the factor correction for relative humidity) are similar to Penman-Monteith although they are slightly low for high ET's. When only temperature data are available it is recommended Hargreaves method to estimate reference evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

En una situación de limitación en la disponibilidad del agua y de alta competencia entre los distintos usos posibles es imprescindible llegar a conocer mejor las necesidades de agua, principalmente para uso agrícola, ya que éste es un factor crítico en los niveles de producción de los cultivos.

El cálculo de las necesidades de agua se realiza normalmente con la evapotranspiración potencial o de referencia estimada a partir de datos climáticos mediante alguno de los métodos de cálculo disponibles; este valor se multiplica por el coeficiente de cultivo para obtener la evapotranspiración del cultivo. Como los métodos de estimación más fiables requieren información que no suele estar disponible, su aplicación está muy limitada dando como resultado el empleo abusivo de métodos más sencillos que requieren datos climáticos habitualmente disponibles. En muchos casos, estos métodos se han usado indiscriminadamente y en zonas muy diferentes de las que dieron origen a su desarrollo.

En diversos estudios se han comparado los valores calculados mediante distintos métodos de cálculo de la evapotranspiración con los valores obtenidos en lisímetro. La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) ha llevado a cabo una comparación de los valores de evapotranspiración obtenidos mediante 20 métodos de estimación con los valores medidos en lisímetros en 11 localidades de muy diversas características dando como resultado que el método de Penman-Monteith es el que mejor estima la evapotranspiración de referencia en todo tipo de localidades, tanto húmedas como secas. El método de Hargreaves que utiliza datos de temperatura se sitúa muy por delante de otros métodos profusamente utilizados y también basados en temperatura como es el caso de Thornthwaite, que queda clasificado en el último lugar de este estudio (Jensen et al, 1990). El método de Penman-Monteith está ampliamente reconocido como el método que mejor estima la evapotranspiración de un cultivo de referencia (Shuttleworth, 1992; Smith, 1991; Sys et al, 1991).

Este trabajo pretende comparar los valores calculados según una selección de métodos de estimación de la evapotranspiración mensual con los valores calculados según la ecuación de Penman-Monteith, que se toma como referencia, con objeto de determinar el método o métodos más fiables y de mayor facilidad de aplicación para estimar la evapotranspiración en las condiciones climáticas generales de la España Peninsular.

MATERIAL Y MÉTODOS

El cálculo de la evapotranspiración se ha realizado utilizando datos climáticos mensuales de la serie 1961-90 de 59 estaciones completas de la red del Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M) con una media de 22 años de datos disponibles. Se ha seleccionado la práctica totalidad de las estaciones completas de la España peninsular, que cuentan con los datos necesarios para realizar el estudio comparativo (Fig. 1). Las variables climáticas utilizadas han sido: temperatura media mensual ($t_m, ^\circ\text{C}$), temperatura media de máximas mensuales ($T, ^\circ\text{C}$), temperatura media de mínimas mensuales ($t, ^\circ\text{C}$), humedad relativa media mensual ($H_r, \%$) insolación media mensual ($n, \text{horas/día}$) y recorrido mensual del viento ($U, \text{km/día}$). Los datos de las tres primeras han sido suministrados en forma digital por el I.N.M y los datos de las tres últimas han sido digitalizados para el presente estudio.

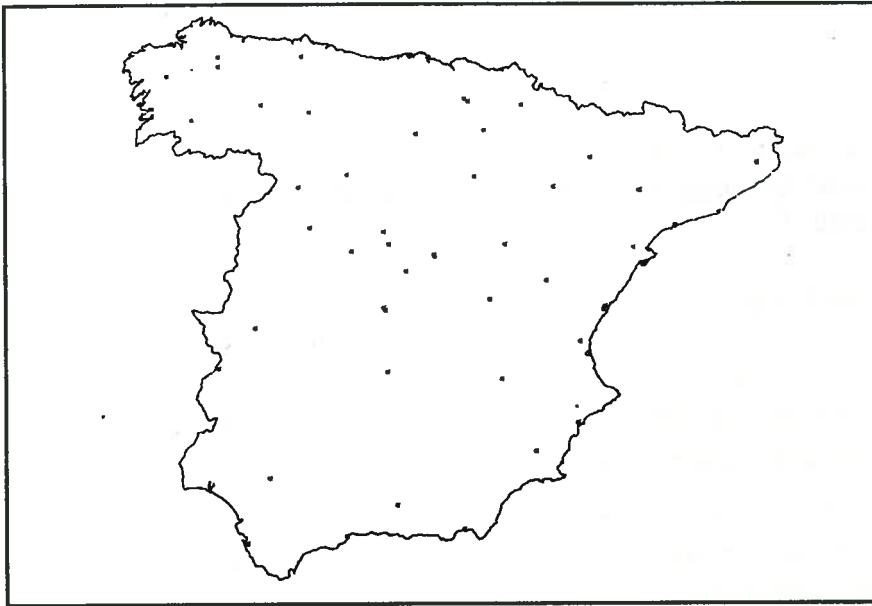


Figura 1. Mapa de situación de las 59 estaciones completas de la red del I.N.M

Para la estimación de la ET mensual se han utilizado los métodos de Thornthwaite (1948), Blaney-Criddle (1950), Turc (1961), Papadakis (1966), Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) y Penman-Monteith según Suttleworth (1992).

Thornthwaite (1948): ET_p (mm/mes) = $e \cdot Nd/30 \cdot N/12$
 donde Nd es el número de días del mes, N es la duración astronómica del día en horas o insolación máxima, e es la evapotranspiración potencial sin corregir en mm/mes, que se calcula como $16 \cdot (10 \cdot tm/I)^a$, donde I es el índice anual de calor según la ecuación $I = \sum i_j = \sum (tm_j/5)^{1,514}$ y a es un coeficiente igual a $0,000000675 \cdot I^3 - 0,0000771 \cdot I^2 + 0,01792 \cdot I + 0,49239$, siendo tm la temperatura media mensual en °C.

Blaney-Criddle (1950): ET_o (mm/mes) = $I_i/I \cdot (45,72 \cdot tm + 812,8)$
 donde I_i es la iluminación máxima mensual en horas/mes, I es la iluminación máxima anual en horas/año y tm es la temperatura media mensual en °C.

Turc (1961): ET_o (mm/mes) = $f \cdot (tm/(tm+15)) \cdot (St + 50) \cdot c$
 donde f es un factor de corrección que vale 0,37 para febrero y 0,4 para el resto de los meses, tm es la temperatura media mensual en °C, St es la radiación solar media en el suelo en $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, calculada mediante la ecuación: $St = (0,18 + 0,62 \cdot n/N) \times So$, donde St es la radiación solar extraterrestre en $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, n es la insolación en horas/día y N es la insolación máxima en horas/día; c es un factor de corrección para zonas áridas, siendo 1 cuando la humedad relativa (Hr) es mayor del 50% y en caso contrario vale $1 + ((50 - Hr)/70)$.

Papadakis (1966,1980): ET_o (mm/mes) = $5,625 \cdot (e^\circ(T) - e^\circ(t-2))$
 donde e° es la tensión de saturación de vapor para una temperatura dada en mb, T es la temperatura media de máximas mensuales en °C y t es la temperatura media de mínimas mensuales en °C.

Hargreaves (1985): ET_o (mm/día) = $0,0023 \cdot S_o \cdot (T-t)/2 \cdot (t_m+17,8)$
 donde S_o es la radiación solar extraterrestre expresada en mm/día, T-t es la diferencia entre la media mensual de temperaturas máximas T y la de mínimas t en °C y t_m la temperatura media del aire en °C.

Penman-Monteith según Suttleworth (1992):

ET_o (mm/día) = $(\Delta / (\Delta + \gamma^*)) \cdot (R_n - G) \cdot (1 / \lambda) + (\gamma / (\Delta + \gamma^*)) \cdot (900 / (t+275)) \cdot U_2 \cdot D$
 donde ET es la evapotranspiración de un cultivo de referencia, que es un césped de 0,12 m de altura con una resistencia de estomas (r_s) de $69 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ y una resistencia aerodinámica (r_a) de $208/U_2 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, U_2 es la velocidad del viento a 2 metros en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, R_n es la radiación neta entrante en $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, G es el calor que sale hacia el suelo en $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, Δ es el gradiente de presión de vapor a saturación, γ^* es la constante psicrométrica modificada que se calcula como $\gamma \cdot (1 + 0,33 \cdot U_2)$ donde γ es la constante psicrométrica, λ es el calor latente de evaporación del agua en $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, t es la temperatura en °C y D es el déficit de vapor de agua en kPa.

El cálculo de la evapotranspiración mensual se ha realizado mes a mes para cada uno de los años mediante un programa informático desarrollado al efecto. Se ha efectuado un análisis de regresión lineal de los valores obtenidos para el conjunto de las 59 estaciones y todos los meses, y para cada una de las estaciones considerando el conjunto de los meses y los meses enero y julio por separado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de regresión lineal entre los métodos de estimación aplicados tomando como variable independiente el método de Penman-Monteith y considerando el conjunto de las estaciones y el conjunto de los años se presentan en la figura n° 2.

Todas las ecuaciones presentan coeficientes de regresión significativos al 99% de probabilidad como era de esperar. La correlación es mucho mayor en el caso de las ETs de Turc y Hargreaves, con un 94% y 90% de varianza explicada respecto a la ET de Penman-Monteith. El caso de Hargreaves concuerda con los resultados obtenidos por el estudio de Jensen et al. (1990), no así el de Turc que difiere de los resultados de este estudio en las localidades secas, posiblemente porque no aplica el coeficiente de corrección en función de la humedad relativa. El que peor correlación muestra con Penman-Monteith es el método de Papadakis, con sólo un 74% de varianza explicada.

Los métodos de Hargreaves y Turc presentan las pendientes más cercanas a la unidad, aunque un poco más bajas, aproximadamente 0,9. Hargreaves iguala su ET a la de Penman-Monteith hacia los 99 mm/mes, sobrestimándola por debajo de este valor a razón de 5 mm/mes en los meses de baja ET, y subestimándola por encima hasta unos 15 mm/mes en los meses de alta ET.

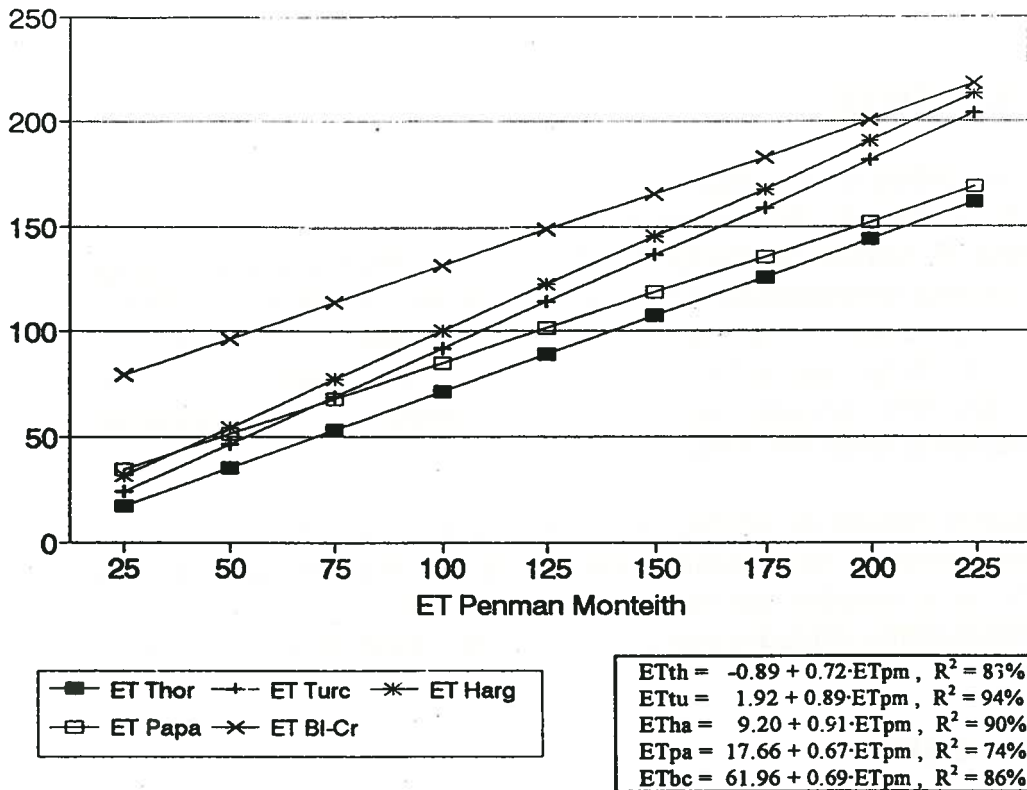


Figura 2. Representación de las ecuaciones de regresión de la ET, mensual, estimada por distintos métodos con respecto a la calculada por el método de Penman-Monteith.

ET_{pm} = ET de Penman-Monteith mm/mes (Suttleworth, 1992); ET_{th} = ET de Thornthwaite, mm/mes (1948); ET_{tu} = ET de Turc, mm/mes (1961); ET_{ha} = ET de Hargreaves, mm/mes (Hargreaves y Samani, 1985); ET_{pa} = ET de Papadakis, mm/mes (1966); ET_{bc} = ET de Blaney-Criddle, mm/mes (1950).

El resto de las aproximaciones presentan pendientes más suaves, por lo que quedan desajustadas respecto a Penman-Monteith. El método de Blaney-Criddle presenta para ETs bajas valores muy altos y se equilibra para ETs altas. Las ecuaciones de Papadakis y de Thornthwaite siguen un patrón que arrancando de valores similares, alcanzan valores un poco más bajos que los de referencia. La diferencia entre estos dos últimos autores está en que Papadakis se sitúa unos 18 mm/mes por encima de Thornthwaite.

Las cinco comparaciones de los métodos de estimación se han realizado para cada una de las 59 estaciones en tres ámbitos temporales, dos que corresponden a enero y julio, y la tercera que corresponde al conjunto de los meses de los años considerados. Dada la gran cantidad de información, los resultados no se presentan de forma gráfica. Se ha constatado que cuando se considera sólo un mes, las correlaciones se encuentran sesgadas pues no se dispone de unos rangos de variabilidad que superen los errores de los métodos, por lo que se deduce que la comparación entre los métodos debe realizarse considerando el conjunto de los meses del año y no periodos inferiores. Sin embargo, cabe destacar que cuando se analizan conjuntamente los casos de Thornthwaite y el de Hargreaves, que utilizan parámetros térmicos, se observa que para el mes de enero la correlación de Hargreaves con Penman-Monteith es mayor que la que presenta Thornthwaite en la mitad de las estaciones (53%) mientras que cuando se considera el mes de julio, es mayor en la práctica totalidad de las estaciones (80%), llegando a la totalidad cuando se considera el conjunto de los meses y resultando valores del coeficiente de correlación próximos a 0,99.

CONCLUSIONES

Todos los métodos de cálculo aplicados presentan correlaciones significativas cuando se considera el método de Penman-Monteith (Shuttleworth, 1992) como aproximación de referencia. El método de Blaney-Criddle (1950) sobrestima la evapotranspiración para los meses de baja evapotranspiración, los métodos de Thornthwaite (1948) y de Papadakis (1966) subestiman la evapotranspiración en los meses de alta evapotranspiración, y los métodos de Hargreaves (1985) y Turc (1961) con la corrección por humedad relativa, siguen patrones similares al de Penman-Monteith, aunque ligeramente bajos para evapotranspiraciones muy altas.

Dado que el método de estimación de Hargreaves es sencillo y aplicable a la extensa red termopluviométrica, se aconseja su uso para estimar la evapotranspiración de referencia en lugar de otros métodos que no presentan tan buenos resultados y que, sin embargo, han sido profusamente utilizados como es el caso del método de Thornthwaite.

BIBLIOGRAFÍA

- BLANEY, H.F. y W.D. CRIDDLE, 1950. "Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data". Tec. Pub. 96. U.S. Dep. Agric., S.C.S., 44 p.
- BLANEY, H.F. y W.D. CRIDDLE, 1962. "Determining Consumptive Use and Irrigation Water Requirements". Tech. Bull. 1.275, U.S. Dept. Agric., 59 p.
- ELÍAS y GIMÉNEZ, 1965. "Evapotranspiraciones potenciales y balances de agua en España". Ministerio de Agricultura. Madrid, 293 p.
- HARGREAVES, G.H. y Z.A. SAMANI, 1982. "Estimating Potential Evapotranspiration". Tech. Note. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 108(3): 225-230.
- HARGREAVES, G.H. y Z.A. SAMANI, 1985. "Reference crop evapotranspiration from temperature". Applied. Engrg. in Agric., 1(2): 113-124.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D. y R.G. ALLEN, 1990. "Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements". American Soc. of Civil Engineers, Manual N° 70, 327 p.
- MONTEITH, J.L., 1965. "Evaporation and the environment". 205-234. En "The state and movement of water in living organisms". XIXth Symposium. Soc for Exp. Biol., Swansea, Cambridge Univ. Press.
- PAPADAKIS, J., 1966. "Potential evapotranspiration". Ed. el autor, Buenos Aires, 54 p.
- PAPADAKIS, J., 1980. "El clima". Ed. Albatros. Buenos Aires, 377 p.
- SHUTTLEWORTH, W.J. "Evaporation". Cap. 4. En MAIDMENT, D.R., 1992, "Handbook of Hydrology". Ed. McGraw-Hill. 29 Capítulos.

SMITH, M., 1991. "Report on the expert calculation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of cropwater requirements". FAO Land and Water Development Division. Rome, 45 p.

SYS, C., VAN RASTEN, E. y J. DEBAVEYE, 1991. "Land evaluation". Parte I. Agric. Publ. nº 7. General Adm. for Devel. Coop. Bélgica, 273 p.

THORNTHWAITE, C.W., 1948. "An approach toward a rational classification of climate", Geog. Rev. 38: 55-94.

TURC, L., 1961. "Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour", Ann. Agron. 12: 13-49.

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO

Beunza, A.I. (P); Terés, V.; Artetxe, A.; Aretxaga, L.M.

RESUMEN

La utilización en cultivos con sustratos, de los sensores de humedad desarrollados para cultivo en suelo, plantea numerosos problemas derivados de las diferencias entre las propiedades físicas de suelos y sustratos. El objetivo de este trabajo es el estudio de la respuesta de distintos instrumentos de medida de humedad al estado hídrico del sustrato. Se han analizado tres tipos de sensores de humedad; bloques porosos, tensiómetros (ambos de construcción propia) y Time Domain Reflectometry (TDR) sobre los sustratos corteza de pino de Aralur y perlita B12. Las medidas se han realizado sobre los sustratos colocados sobre un lecho de arena (similar al empleado en el tensionado de la caracterización física de sustratos) en el que partiendo de la saturación se le somete a las tensiones previamente fijadas y en las que se realizarán las lecturas correspondientes a los tres sensores. La bondad de las medidas realizadas con cada uno de los sensores utilizados viene determinada por la comparación de las lecturas de potencial matricial y contenido volumétrico con el potencial matricial prefijado en el proceso experimental y el contenido volumétrico previamente conocido.

La mejor respuesta se obtiene con los tensiómetros, que proporcionan una medida precisa del potencial matricial. Mediante el TDR se consigue una buena lectura para la corteza de pino en el intervalo de 35-75% de agua, pero no ocurre lo mismo para la perlita. Los bloques de yeso utilizados han dado unos errores de medida entre bloques mayores que las variaciones debidas al potencial matricial del sustrato y por lo tanto no son útiles para este fin.

SUMMARY

The use, in substrates cultivation, of the same humidity sensors developed for soil cultivation raises many problems derived from the differences between the physical properties of soil and substrates. The aim of this paper is to study the response of several humidity measurement devices to the water content of substrates. Three types of humidity sensors have been analysed; gypsum blocks, tensiometers (both self-made) and Time Domain Reflectometry (TDR) applied on substrates of pine bark from Aralur and perlite B12. The measurements have been carried out on the substrates previously spread out on a sand layer (similar to that used for the physical characterization of substrates). Starting from saturation, the substrate is subject to previously fixed tensions in order to perform readings corresponding to each one of the three sensors. The quality of the measurements will be determined by the comparing the readings of matrix potential and volumetric content with the matrix potential previously fixed during the experimental process and the volumetric content previously known.

The best response is obtained with tensiometers which provide for an accurate measurement of the matrix potential. By means of TDR a good reading is obtained for the pine bark substrates for the interval of 35-75% of water content, but not as good for perlite. The gypsum blocks used have shown some measurement errors between blocks bigger than the variations due to the matrix potential of substrates and therefore are not useful for this purpose.

1.- INTRODUCCIÓN

El control de los parámetros del entorno radicular permite una mayor intensificación del cultivo. En el caso de los parámetros físicos se consigue mediante el control del estado hídrico del sustrato, y este mediante el manejo adecuado del riego. Los criterios a tener en cuenta para establecer este manejo dependen por una parte de las exigencias de la planta, y por otra de las propiedades físicas del sustrato. La curva de retención de agua proporciona la información necesaria para mantener la disponibilidad de aire y agua dentro de los valores previamente establecidos. El proceso a seguir es establecer los valores de los parámetros físicos en función de las necesidades de la planta y, posteriormente, elegir el sustrato y el régimen de riegos que permiten mantener los valores de estos parámetros dentro de los márgenes prefijados.

Los métodos utilizados actualmente para el control del estado hídrico del sustrato son muy diversos. En explotaciones comerciales de cultivo hidropónico se emplean en general métodos indirectos como la programación del riego por tiempos o la estimación del consumo a partir de medida de la evaporación y radiación solar entre otros. En cultivo en contenedor el criterio más ampliamente utilizado es el *de visu*, basado en la experiencia del profesional con un determinado sustrato y planta. En trabajos de investigación se utilizan en algunos casos medidas directas del estado hídrico del sustrato como la gravimetría.

Para el cultivo en suelo se han desarrollado diversos instrumentos de medida directa del estado hídrico, bien sea por estimación del contenido volumétrico de humedad o por medida del potencial matricial. La aplicación directa de estos instrumentos al cultivo en sustratos plantea numerosos problemas relacionados con la diferencia entre las propiedades físicas de suelos y sustratos. Desde este punto de vista la diferencia más importante viene dada por el hecho de que en cultivos en sustratos el potencial matricial no debe bajar de -100 cm. de columna de agua (cca), mientras que en cultivos en suelo el agua útil viene dada por la diferencia entre el potencial matricial de -330 cca (capacidad de campo) y -1500 cca (punto de marchitez permanente).

Las diferencias mencionadas anteriormente entre suelos y sustratos obligan en muchos casos a diseños específicos de sensores (bloques porosos y tensiómetros) para su uso en sustratos de cultivo, que no tendrían validez para su uso en suelos del mismo modo que los diseñados para suelos no son aplicables para su uso en sustratos.

En este trabajo se estudia la respuesta en sustratos de distintos instrumentos desarrollados para medir el estado hídrico del suelo agrícola. La medida en unos casos del potencial matricial y en otros del contenido volumétrico de agua obliga a conocer previamente la relación entre ambos, que se obtiene mediante la caracterización física de sustratos.

2.- OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de la respuesta de distintos instrumentos de medida de humedad al estado hídrico del sustrato.

Como objetivos instrumentales se plantea:

-Aumentar la sensibilidad del bloque poroso en el rango de 0 a -1×10^4 Pa para poder realizar medidas sobre sustratos de cultivo.

-Aumentar la sensibilidad de la escala de medida de vacío en el tensiómetro, en el rango comprendido entre 0 y -1×10^4 Pa.

-Utilización del TDR para la medida de la constante dieléctrica en sustratos y estudio de su variabilidad en función del potencial matricial y del sustrato empleado.

3.- MATERIAL Y MÉTODOS

3.1.- Material

Para establecer el potencial matricial en el sustrato se emplea un lecho de arena fina similar al utilizado para el tensionado de las muestras en caracterización física de sustratos. Para ello se llena un bidón de arena fina hasta 30 cm. del borde, se deposita encima 20 cm. de sustrato en el que se introducen los diversos sensores sometidos a estudio.

- Se emplean dos sustratos :
 - Corteza de pino Aralur.
 - Perlita B12.
- Sensores:
 - Bloques porosos.
 - Tensiómetros.
 - *Time Domain Reflectometry* (TDR).
- Multitester para medida de la resistencia en bloques de yeso.

3.2.- Sensores utilizados

Bloques porosos

Se han utilizado 12 bloques porosos de construcción propia. En estos bloques se evalúa el contenido de humedad del suelo en función de la evolución de los parámetros eléctricos (Gardner, 1983). Los bloques porosos se han elaborado con mezcla de yeso y perlita de distintas granulometrías en proporción 30-70 en volumen. Se utilizan diferentes granulometrías para conseguir distintas porosidades y así evaluar su validez en el rango de medida necesaria en sustratos. Se introducen dos electrodos de cobre a los que se suelda un hilo de cobre de 1 mm² de sección, la soldadura se aísla convenientemente con resina sintética.

La granulometría de la perlita empleada en mezcla con el yeso para elaborar los distintos bloques porosos es:

Bloques: 1, 2, 3	----	0,5 - 1 mm.
Bloques: 4, 5, 6	----	1,5 - 2,5 mm.
Bloques: 7, 8, 9	----	2 - 3 mm.
Bloques: 10, 11, 12	----	3 - 4 mm.

Tensiómetros

Los tensiómetros utilizados en suelos agrícolas tienen una escala de medida de 0 a -8×10^4 Pa aproximadamente, que se miden mediante vacuómetro o columna barométrica de mercurio. En el caso de suelos esto es suficiente porque a potencial matricial $\Psi_m = -8 \times 10^4$ Pa, se ha consumido un alto porcentaje de agua útil. En cambio, en el caso de sustratos las tensiones que se miden son como máximo de -1×10^4 Pa (100 cm de columna de agua) (De Boodt, 1974) que corresponde a poco más del 10% de la escala en el caso de vacuómetros y en el caso de columna barométrica de mercurio corresponde a un desplazamiento de 7,94 cm. En ambos casos se pierde toda la precisión en la medida hasta el punto de hacerlos inutilizables (Terés *et al.*, 1993).

En este trabajo se utilizan 4 tensiómetros de elaboración propia. Para su elaboración se emplea cápsula porosa de 30 mm. de longitud y 11 mm. de diámetro (Nardeux nº 3). Esta cápsula está pegada a un extremo de un tubo de nylon a 10 mm. de diámetro y de 15 a 20 cm. de longitud, el otro extremo del tubo se cierra con un tapón. Por un lateral del tubo se introduce otro tubo del mismo material de 4 mm de diámetro para la lectura de la tensión mediante columna barométrica de agua.

TDR

El TDR es una técnica electromagnética que ha sido aplicada para determinaciones *in situ* del contenido de humedad (Topp *et al.*, 1980, 1984 ; Topp, 1987).

El TDR empleado es el modelo 6050 XI Trase ® *System* de Soil Moisture utilizado habitualmente para medir el contenido de humedad del suelo.

Para las medidas realizadas en el sustrato se han utilizado tres sondas enterrables de 20 cm. de longitud.

Los valores facilitados son la constante dieléctrica del sustrato (K_a) y el % volumen de agua. Este último corresponde a un calibrado previo del TDR y que no tiene ninguna relación con los contenidos de humedad que se dan en sustratos.

En éste trabajo se mide la respuesta del TDR a la variación de la humedad en dos sustratos de cultivo muy diferentes. La aplicación del TDR para el control de riego exige la obtención posterior de un modelo que relacione la constante dieléctrica medida con el contenido de humedad del sustrato y que no es objeto de este trabajo.

3.3.- Colocación de sensores

Bloques de yeso: Todos los sensores se han colocado a 10 cm. de la superficie del sustrato.

Tensiómetros: Se colocan dentro del sustrato a profundidad variable. La diferencia de alturas en este caso no afecta a la lectura.

Sondas TDR: La diferencia de altura afecta a la lectura, por lo tanto se ha tenido especial cuidado en colocar las tres sondas a la misma profundidad, 15 cm. de la superficie.

3.4.- Metodología

La metodología referida es la desarrollada en el SIMA (Gobierno Vasco) y descrita por Arechaga (1994).

- Se llena el bidón de arena, se evacua el aire y se alisa la superficie.
- Se coloca una tela tupida para evitar la mezcla de sustrato con arena.
- Se llenan los tensiómetros con agua destilada y hervida. Es importante que no quede ninguna burbuja de aire dentro del tensiómetro.
- Se pone el sustrato correspondiente sobre la tela y se colocan los distintos sensores a las alturas y posiciones correspondientes.
- Se presiona el sustrato ligeramente en las proximidades de los sensores con el fin de que haya un buen contacto entre los sensores y el sustrato circundante.
- El bidón, con la arena, sustrato y sensores, se llena de agua hasta unos centímetros por encima del nivel del sustrato. El llenado se hace a través del sistema de drenaje, de abajo hacia arriba, con el fin de evitar burbujas dentro del sustrato.
- Se mantiene en saturación durante 48 horas.
- El nivel de referencia para tensionado se coloca a tensión 0, tomando como referencia la superficie de separación entre la arena y el sustrato. Se abre el sistema de drenaje y se mantiene durante 24 horas para que llegue al equilibrio.
- Se toman las lecturas correspondiente a los diferentes sensores.
- El proceso de tensionado y lectura se repite sucesivamente para las tensiones prefijadas, cada 2 cca en el intervalo de 0 a 20 cca y cada 10 cm. en el intervalo de 20 a 40 cca.
- La lectura de los tensiómetros se hace por altura de la columna de agua.
- Las lecturas correspondientes a las sondas TDR se obtienen por conexión sucesiva de las mismas a la unidad de medida.
- La lectura de los bloques porosos se realiza mediante un multitester con el que se mide la resistencia eléctrica.

3.5.- Procesado de Datos

De los tres tipos de sensores utilizados, dos, bloques porosos y tensiómetros, miden potencial matricial del sustrato mientras que el otro, TDR, mide contenido volumétrico de agua. La bondad de la medida vendrá determinada por la relación entre la lectura del aparato correspondiente y el potencial matricial o contenido volumétrico de agua según los casos.

Por lo tanto es necesario conocer para cada caso los valores de referencia, potencial matricial o contenido volumétrico de agua. En el proceso experimental se fija el primero y a partir de las curvas obtenidas en la caracterización física de sustratos se obtiene para cada caso el contenido volumétrico de humedad.

Para cada uno de los sensores empleados se realiza un estudio separado considerando los datos obtenidos con los dos sustratos. Las relaciones consideradas son lectura del sensor/potencial matricial y lectura del sensor/contenido volumétrico de agua.

El estudio de los resultados se efectúa por interpretación gráfica. La dispersión de las lecturas obtenidas, proporciona la información sobre la precisión de la lectura. La diferencia o igualdad de comportamiento entre los dos sustratos empleados informa sobre la dependencia o independencia respectivamente de las lecturas con respecto del sustrato, y por lo tanto de la necesidad de un calibrado específico para cada uno de ellos, o de un calibrado único para cualquier sustrato respectivamente. La pendiente de la curva proporciona información sobre la sensibilidad del sensor.

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Bloques porosos

Puesto que los bloques porosos miden el potencial matricial (o tensión), la curva de respuesta con respecto a éste debería de ser única, independiente del sustrato, mientras que la respuesta respecto al % de agua dependerá de la curva de retención de agua de cada sustrato. En los distintos bloques utilizados se observa, como era de esperar, que la respuesta con respecto al % de agua depende del sustrato (gráficas 1, 2, 3, 4).

La respuesta con respecto a la tensión es, así mismo, dependiente del sustrato (gráficas 1, 2, 3, 4). Cuando el sustrato es perlita, los datos experimentales podrían ajustarse a una recta cuya pendiente aumenta a medida que aumenta el tamaño de la perlita empleada en la elaboración del bloque poroso. Cuando el sustrato es corteza de pino la respuesta puede ajustarse en todos los bloques porosos a una recta de pendiente próxima a 0.

En el caso del bloque elaborado con perlita de 0,5-1,5 (gráfica 1) las respuestas en corteza de pino y perlita podrían ajustarse a una misma recta, tanto esta recta como la obtenida por corteza de pino en todos los bloques porosos tendrían una pendiente próxima a 0 y las variaciones en las lecturas debidas a la diferencia entre las sondas es mayor que las variaciones ocasionadas por la diferencia de tensión, con lo cual carece de precisión. Los datos anormalmente altos para perlita que se observan en la gráfica 1 corresponden a una sonda que no funcionó adecuadamente.

En las otras 3 mezclas empleadas para elaborar el bloque, la respuesta observada en perlita difiere de la observada en la corteza de pino. De cualquier forma al igual que en el caso anterior las variaciones de lecturas debidas a las sondas son mayores que las ocasionadas por diferencias de tensión.

Como posible explicación de la diferencia de respuestas en función del sustrato debemos de tener en cuenta que el parámetro medido en este caso es la resistencia eléctrica, esta depende tanto del contenido de humedad del bloque como de la concentración salina. La diferencia entre la curva de retención de agua de la corteza y de la perlita podría hacer variar la concentración salina de la solución del suelo para una misma tensión ocasionando alteraciones en la conductividad eléctrica medida.

4.2.- TDR

El TDR mide la constante dieléctrica (K_a) del suelo o sustrato, este parámetro está relacionado tanto con el contenido de humedad como con la concentración salina de la solución del suelo. La curva de respuesta con respecto al % de agua debería de ser independiente del sustrato empleado, mientras la relacionada con la tensión dependerá de la curva de retención de agua de cada sustrato.

En la gráfica 5 se observa que efectivamente la respuesta en función de la tensión difiere para los dos sustratos empleados, la medida de la tensión exigiría un calibrado específico para cada sustrato.

En la gráfica 6 se representa la respuesta en función del % de agua que es la que realmente debe considerarse. La curva de retención de agua de la perlita hace, que para las tensiones ensayadas se produzca una gran acumulación de datos en los % de agua próximos a 40. En el caso de la corteza de pino las medias están mejor distribuidas entre 35 y 85 % aproximadamente. En líneas generales podemos observar que la respuesta es distinta en función del sustrato, La concentración de datos en el caso de la perlita no permite obtener conclusiones sobre la respuesta en un amplio margen de variación. En el caso de la corteza de pino se observa una buena respuesta para un intervalo del porcentaje de agua entre 35 y 75 % aproximadamente, a partir de este valor la respuesta se estabiliza y no es sensible a las variaciones de humedad del sustrato.

4.3.- Tensiómetros

El tensiómetro proporciona una medida directa del potencial matricial del sustrato. La respuesta del tensiómetro con respecto a la tensión debe de ser por tanto independiente del sustrato mientras que la respuesta con respecto del % de agua dependerá de la curva de retención de agua correspondiente.

En la gráfica 8 puede observarse como efectivamente la respuesta del tensiómetro respecto al % de agua depende claramente del sustrato. En la gráfica 7 puede observarse como los datos correspondientes tanto a la perlita como a la corteza de pino se alinean en una recta con una pendiente de 45°. La precisión es muy buena para los valores observados hasta 20 cca y disminuye ligeramente para valores más altos.

5.- CONCLUSIONES

- En este trabajo se estudia la medida del estado hídrico del sustrato con tres tipos de sensores empleados habitualmente para la medida del estado hídrico de suelos agrícolas. La mejor respuesta se obtiene con los tensiómetros, proporcionando estos una medida precisa del potencial matricial. El porcentaje de agua puede obtenerse a partir de la curva de retención de agua del sustrato empleado.

- El TDR proporciona una buena respuesta para la corteza de pino en el intervalo de 35-75 % de agua, pero los resultados obtenidos con perlita no permiten generalizar este dato.

- Los bloques de yeso empleados en este trabajo se han elaborado a partir de yeso aligerado con perlita de distintas granulometrías. La respuesta obtenida con los bloques empleados ponen de manifiesto unos errores de medida entre los bloques, mayores que las variaciones debidas al potencial matricial del sustrato y por lo tanto no son útiles para este fin.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- ARECHAGA, L.M. 1994. Medida de la humedad en sustratos de cultivo. Trabajo Fin de Carrera de la ETSIA de la Universidad Pública de Navarra.
- DE BOODT, M.; VERDONCK, O.; CAPPAERT, I.1974. Determination and Study of the Water Availability of Substrates for Ornamental Plant Growing. *Acta Hort*, 35.
- GARNER, W.H. 1983. Water content. En *Methods of soil analysis Part I*. Ed C.A Black. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin. USA. pp: 82-127.
- TERÉS, V.; ARRIETA, V.; BATIZ, J.; APARICIO, L. 1993. Utilización de tensiómetros como sensores para riego en sustratos. Departamento de producción vegetal. Servicio central de publicaciones del Gobierno Vasco. *INFORMES TÉCNICOS 59*: 417-424.
- TOPP, G.C. 1987. The Application of Time-Domain Reflectometry (TDR) to soil water content measurement, paper presented at international conference on measurement of soil and plant water status. Soil Sci. Soc. of Am., Logan, Utah.

- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANANN, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16 (3), 574-582.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; BAILEY, W. G.; ZEBCHUK, W.D. 1984. The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe. *Can. J. Soil Sci*; 64, 313-321.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado mediante la financiación del Dpto. de Industria, Agricultura y Pesca del Gobierno Vasco a través del Proyecto de Sustratos.

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO
 BLOQUE 0.5-1.5
 RELACION LECTURATENSION

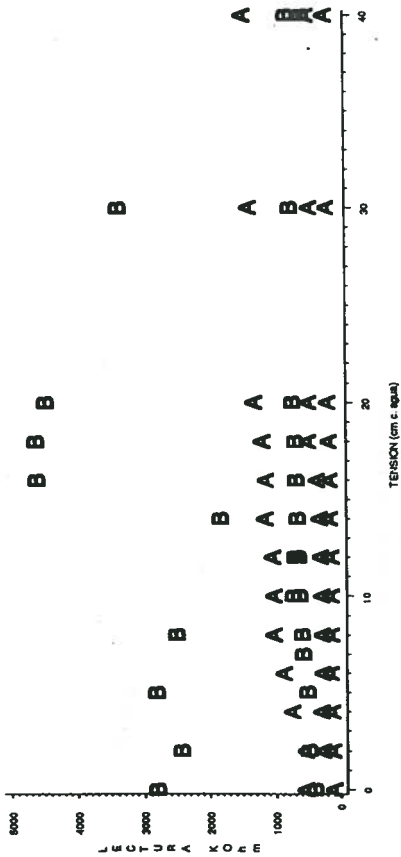


Gráfico 1

COL 7 A A A Corteza de pino B B B Perifita

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO
 BLOQUE 1.5-2.5
 RELACION LECTURATENSION

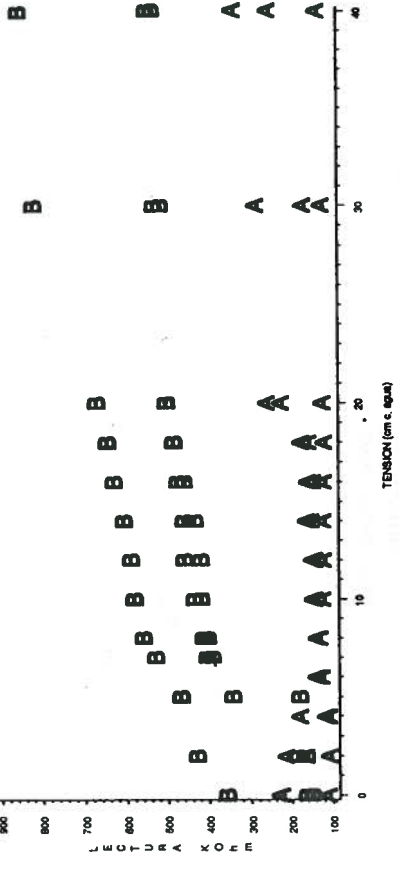


Gráfico 2

COL 7 A A A Corteza de pino B B B Perifita

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO
 BLOQUE 2-3
 RELACION LECTURATENSION

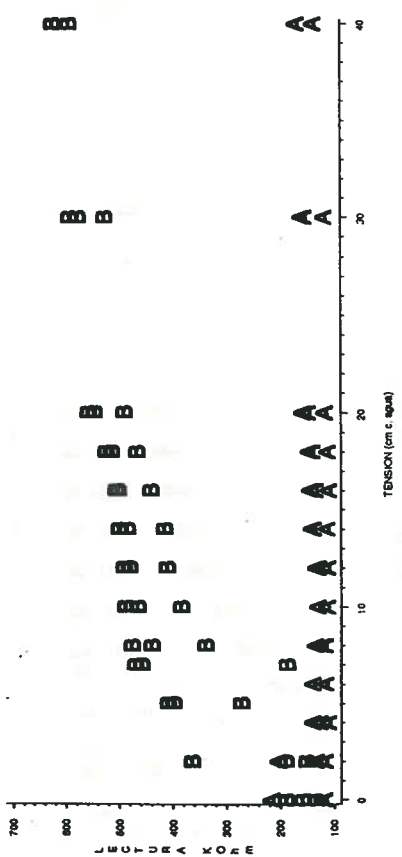


Gráfico 3

COL 7 A A A Corteza de pino B B B Perifita

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO
 BLOQUE 3-4
 RELACION LECTURATENSION

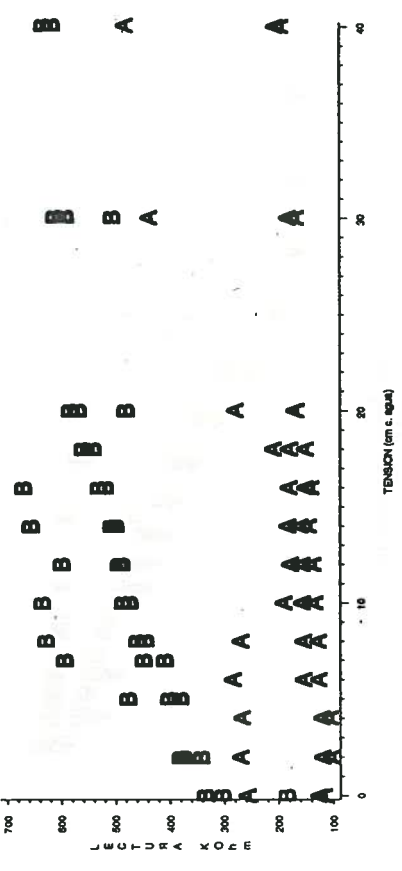
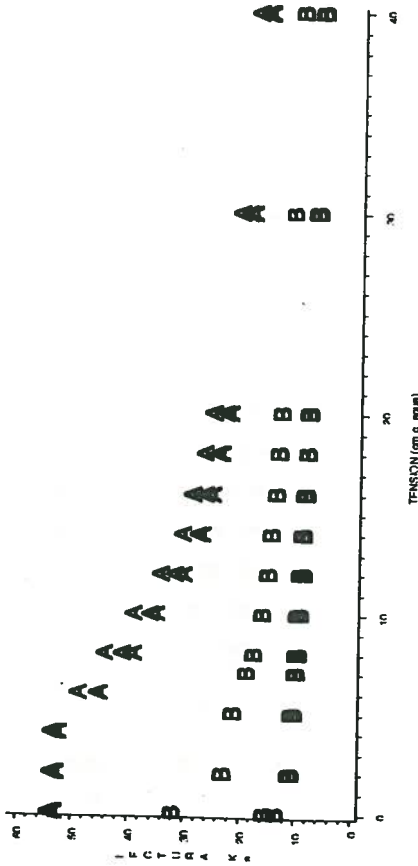


Gráfico 4

COL 7 A A A Corteza de pino B B B Perifita

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO

TDR
RELACION LECTURA/TENSION

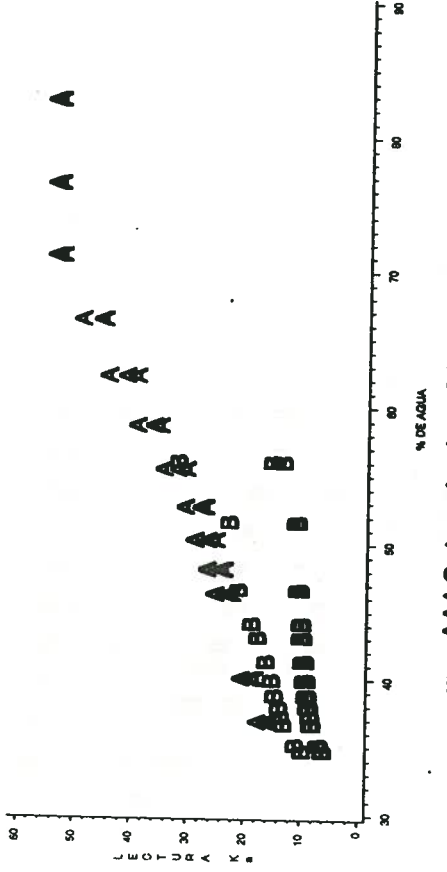


0017 A A A Corteza de pino B B B Perlita

Gráfico 5

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO

TDR
RELACION LECTURA/% AGUA

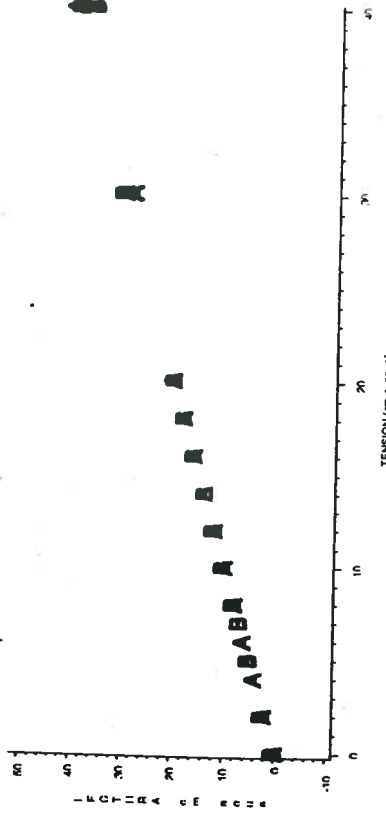


0017 A A A Corteza de pino B B B Perlita

Gráfico 6

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO

TENSIOMETRO
RELACION LECTURA/TENSION

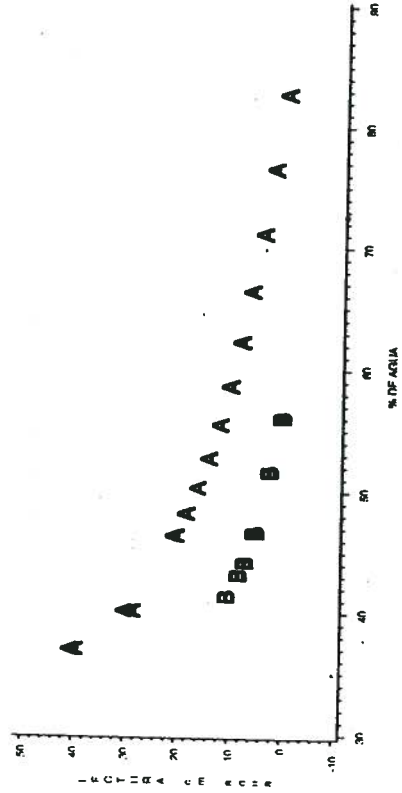


0017 A A A Corteza de pino B B B Perlita

Gráfico 7

MEDIDA DE LA HUMEDAD EN SUSTRATOS DE CULTIVO

TENSIOMETRO
RELACION LECTURA/% AGUA



0017 A A A Corteza de pino B B B Perlita

Gráfico 8

DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE SONDAS DE SUCCIÓN

Lao Arenas, M. T. ; Jiménez Mejías, R.; Jiménez Becker, S.; del Moral Torres, F.

RESUMEN:

Una gestión adecuada del fertirriego implica no sólo el conocimiento del potencial mátrico y gravitacional medido con el tensiómetro, sino también el control del potencial osmótico de la solución nutriente que afecta de manera determinante a la energía total con que el agua está retenida en el suelo, así como su contenido en sales. Con este estudio hemos diseñado y caracterizado una herramienta útil en condiciones de campo, fácil de manejar y capaz de extraer de manera continuada solución nutriente suficiente y representativa del estado puntual del suelo.

Así mismo, las cápsulas cerámicas importadas, habitualmente utilizadas, son muy semejantes en su composición a porcelanas fabricadas en España y su comportamiento en las condiciones de ensayo no varían de manera considerable respecto a aquellas.

SUMMARY:

An appropriate management of the fertirrigation means not only the knowledge of the matric and gravitational potential measured with the tensiometer but also the control of the osmotic potential of the nutrient solution, which affects on a determinant way the total energy with which water is hold in the soil, as well as the salts contents. With this study we have design and characterized and useful tool, easy to use and able to extract, on a continuous way, enough nutrient solution, representative of the actual situation of the soil in field conditions.

Also the ceramic capsules imported normally are very similar in their composition to the porcelain made in Spain, and their behaviour do not vary considerably in relation with the imported ones, in the trial conditions.

INTRODUCCIÓN:

Los cultivos hortícolas invernales requieren un control continuo de las condiciones de producción. Actualmente disponemos de la tecnología necesaria para controlar con precisión las características de la solución nutritiva. Sin embargo, en los cultivos en suelo, no debemos perder de vista que las interacciones con el sustrato modifican dicha solución y ponen a disposición de la planta una "solución nutritiva" (Cadahía, C. 1988) distinta de aquella que consideramos idónea.

Generalmente, la caracterización de dicha "solución nutritiva" se realiza mediante extracto saturado. Sin embargo, proponemos la utilización de sondas de succión puesto que permiten la determinación de los niveles de pH y C.E. en campo de manera fiable y suponen una mayor rapidez en la toma de muestras. La medida de dicha C.E. nos proporcionará una estimación del potencial osmótico del suelo, que unida a la lectura del tensiómetro, permitirá definir perfectamente el potencial hídrico total y por tanto la energía requerida por la planta para extraer la solución del suelo.

Para intervalos de C.E. hasta -70 mS.cm^{-1} , Rawlins en 1981 (tomado de Aragüés, R. y Millán, M. 1986) propone la siguiente relación:

$$\Psi_o(\text{kPa}) = -42 \cdot \text{C.E.}(\text{mS.cm}^{-1}) - 0,16 \cdot \text{C.E.}^2$$

La siguiente tabla pretende cuantificar el interés que presenta el conocimiento del Ψ_o y su contribución al $\Psi_t = \Psi_m + \Psi_g + \Psi_o$ utilizando la anterior relación, suponiendo un Ψ tensiométrico ($\Psi_m + \Psi_g$) de -30 KPa

Tabla 1: Contribución Ψ_o al Ψ_t

$\Psi_t(\text{KPa})$	% contrib. $\Psi_m^*(\text{KPa})$	% contrib. $\Psi_o(\text{KPa})$	CE(mS/cm) sol.nutritive
- 30	100	0	0
- 72,16	41,57	58,43	1
-102	26,17	73,83	2
-138	19,06	80,94	3
-174	14,96	85,04	4
-210	12,3	87,7	5
-246	10,43	89,57	6

Como observamos, a partir de $\text{C.E.}=1$, el Ψ_o es el componente preponderante del potencial hídrico y por tanto su control debe ser relevante en la gestión del riego.

Por otra parte, la sonda de succión nos permite disponer con facilidad de una "fotografía" puntual del estado de la solución del suelo con lo que cualquier variación nutricional importante que pudiera comprometer el resultado final del cultivo podrá ser rápidamente detectada y corregida.

OBJETIVOS

- Evaluar la capacidad de la sonda para obtener muestra suficiente una vez instalada en el campo, mejorando el diseño si fuera necesario.
- Caracterización de la cápsula cerámica porosa
- Determinar el grado de alteración de la muestra al atravesar la cápsula cerámica, comparando el comportamiento entre cápsulas fabricadas en EE.UU. y por el Instituto de Tecnología Cerámica (I.T.C.) en Castellón (España).

MATERIALES Y METODOS

Con objeto de evaluar la capacidad de la sonda para obtener muestra suficiente y mejorar su diseño se instalaron cuatro de ellas, fabricadas artesanalmente por empresarios de la comarca, en dos parcelas con cultivos y suelos diferentes. Dichas sondas constaban inicialmente de una cápsula cerámica porosa (Irrometer), unida mediante un tubo a una cámara de vacío. Para aplicar la depresión, se instaló una válvula unida a un cono reductor donde se apoyaba la bomba manual de vacío. Todos los elementos de la sonda se construyeron de PVC. Las muestras se tomaron semanalmente cuantificando su volumen.

La cápsula cerámica puede alterar las muestras obtenidas, bien aumentando la concentración interior de calcio, potasio y sodio o bien disminuyendo la de fósforo. Ambos errores pueden ser corregidos lavando la cápsula con HCl 1N. (Grover, B.L. and Lamborn, R.E. 1970).

En el laboratorio se realizó un ensayo para determinar el grado de alteración de la solución extraída por la sonda. Para ello se colocaron sondas tratadas en un recipiente con una solución nutritiva preparada de antemano y se tomaron seis muestras periódicas tanto de la solución nutritiva como de la solución de la sonda para su posterior análisis.

Tal experimento se repitió con las cápsulas cerámicas fabricadas por el I.T.C.

Se determinaron los siguientes elementos:

pH; C.E.; Nitratos; Fosfatos; Potasio; Sodio; Calcio; Magnesio; Carbonatos; Bicarbonatos; Sulfatos; Cloruros.

Así mismo, gracias a la colaboración del I.T.C. y en su nombre el responsable de la Unidad de Preparación de Composiciones, Reología y Conformado Coordinador de ensayos, D. Vicente Sanz Solana, se pudieron determinar las propiedades microestructurales de la pieza cerámica. Los ensayos realizados por dicho Instituto han sido los siguientes: Análisis químico, Porosidad, Difracción de rayos X y Distribución de tamaño de poro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) El diseño original de la sonda se modificó, acortando el tubo de PVC e impidiendo que se prolongara por el interior de la cámara de vacío. Así mismo se optó por utilizar una válvula de acero que permitiese mantener el vacío y no se degradara a consecuencia de variaciones térmicas y altos niveles de radiación luminosa. Con el nuevo diseño se obtuvo un volumen superior en todos los casos al requerido para realizar un análisis de laboratorio (30 ml).

b) La caracterización analítica de la sonda permite obtener las siguientes observaciones:

El componente mayoritario de la muestra es SiO_2 , existiendo además cantidades importantes de Al_2O_3 y MgO .

Las fases cristalinas existentes, determinadas mediante difracción de rayos X son Cuarzo

(SiO₂), Espinela (MgO.Al₂O₃), Enstatita y Clinoenstatita (SiO₂.MgO).

Todo lo anterior indica que las materias primas mayoritarias de la cápsula son Cuarzo, Arcillas de composición muy variable y Talco (4SiO₂.3MgO.H₂O), pudiendo contener cierta cantidad de Dolomita (MgO.CaO.2CO₂).

La porosidad total de la cerámica es del 27%, con una distribución de poros estrecha y tamaño medio de 1.1 µm.

c) En cuanto a su fiabilidad en la toma de muestras, no observamos diferencias entre las cápsulas fabricadas en EE.UU. y las fabricadas por el I.T.C. tratadas con HCl 1N, salvo en el caso del calcio en las tres primeras muestras, donde se aprecia una disminución de la entrada de dicho elemento, respecto a la americana. En ambos casos, la cantidad del ión encontrada en la solución de las sondas es claramente inferior a la de la solución nutritiva.

La cápsula construida en Castellón puede contaminar la solución interna con magnesio durante la primera o segunda toma de muestras. Sin embargo, rápidamente se equilibran sus concentraciones igualándose con la solución nutritiva.

En ambos casos, la concentración de fosfatos es muy inferior a la externa. Todos los demás elementos, incluyendo el sodio y el potasio se encuentran en las concentraciones esperadas.

CONCLUSIONES

La sonda de succión modificada presenta un buen comportamiento en el campo y se constituye como un muestreador práctico tanto por su facilidad de uso como por el volumen de muestra extraído.

La composición de la cápsula, por otra parte, es muy semejante a cerámicas fabricadas en España. Esto unido a su comportamiento similar en la toma de muestras permite pensar en el uso de materiales propios para la fabricación de sondas.

RECONOCIMIENTOS

Estos ensayos se han realizado dentro del proyecto concertado UAGA-COAG/C.I.D.H La Mojonera, "Uso de sondas de succión para mejorar la fertirrigación de los invernaderos enarenados de la provincia de Almería".

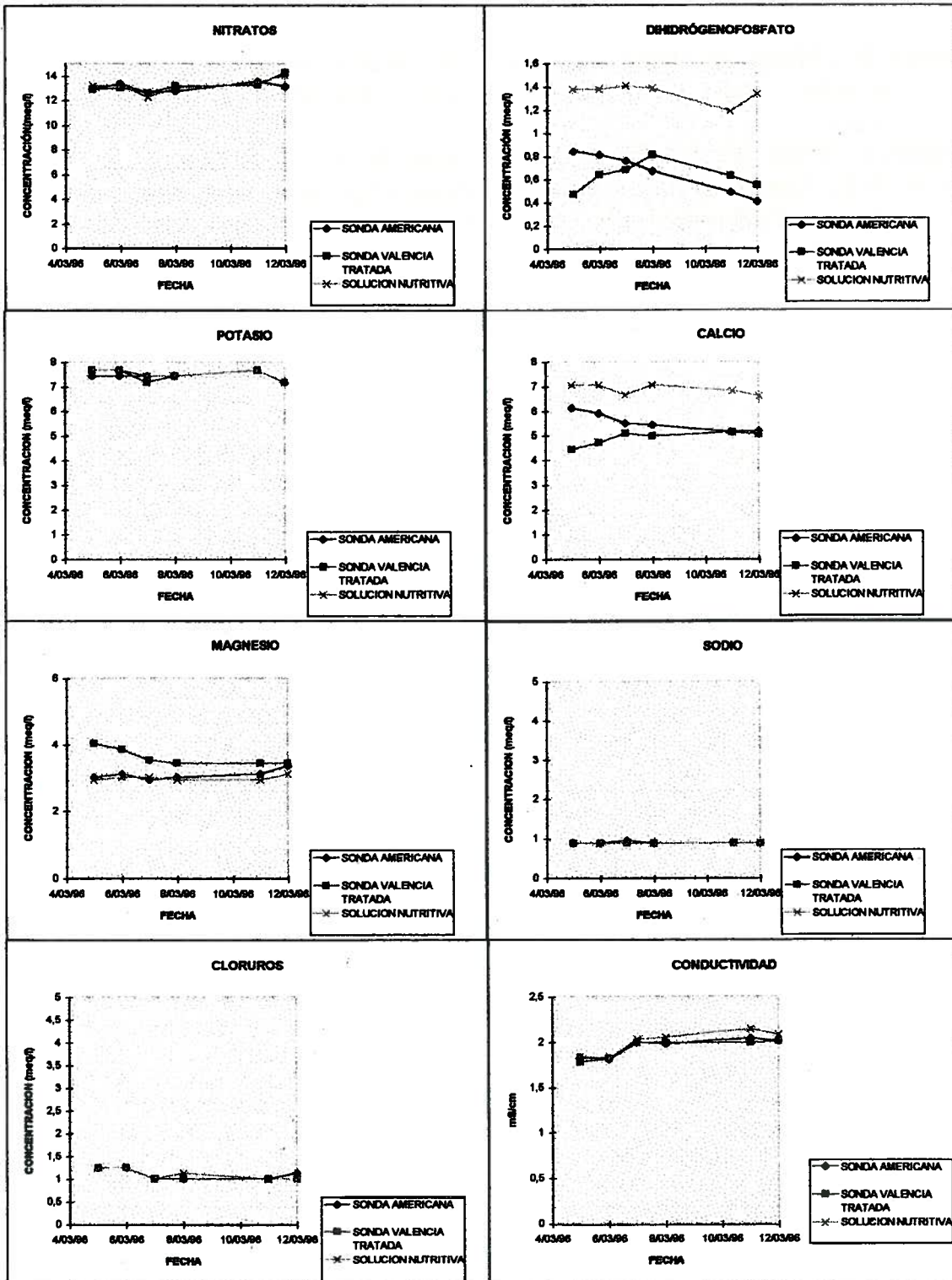


Figura 1.- Curvas comparativas entre solución nutritiva patrón, sonda americana y sonda valenciana para diferentes elementos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aragüés, R. y Millán, M. (1986)** "Métodos de medida de la salinidad del suelo" Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Madrid.
- Cadahía, C. (1988)**. "Fertilización en riego por goteo de cultivos hortícolas". E.R.T.
- Grover, B.L.; Lamborn, R.E. (1970)** "Preparation of porous ceramic cups to be used for extraction of soil water having low solute concentrations". Soil Sci. Soc. Am. Proc., 34, 706-708.

COMPARACIÓN ENTRE CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DE UN SUELO FRANCO ARENOSO OBTENIDAS MEDIANTE UTILIZACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS

OTTO, S.R.L.(p)¹; ALCAIDE, M.²; GIRALDEZ, J.V.²

RESUMEN

En el presente trabajo se realizan comparaciones entre las curvas de retención de humedad de un suelo obtenidas mediante utilización de distintos métodos: placa de Richards, TDR-tensiómetro en laboratorio, TDR-tensiómetro en campo y balanza-tensiómetro. El suelo franco arenoso utilizado para la obtención de dichas curvas se ha presentado en condiciones "naturales" y tamizado. Se han encontrado diferencias entre las curvas obtenidas con placa de Richards y con TDR-tensiómetro en laboratorio y campo; y, por otro lado, similitud entre las curvas obtenidas con TDR-tensiómetro en laboratorio y balanza-tensiómetro.

Los métodos TDR-tensiómetro y balanza-tensiómetro presentan una gran facilidad para la determinación, por separado o en conjunto, de las curvas de desecamiento y humedecimiento. El tiempo necesario para la obtención de dichas curvas es relativamente grande.

SUMMARY

A comparison has been made on the performance of different methods of determination of the moisture retention curve: pressure plate, TDR, tensiometers and gravimetric methods. A sandy loamy soil has been used in semi natural or disturbed conditions.

The pressure plate method yields a curve some what different to that obtained with TDR and tensiometer, which on his turn, was similar to the curve determined with TDR and gravimetric methods. The latter methods are more easy to use, especially under drying and wetting conditions.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La determinación de la relación entre humedad volumétrica y potencial matricial, llamada de curva de retención de humedad, es fundamental en la caracterización de las propiedades hídricas del suelo para el estudio del sistema suelo-agua-planta-atmosfera.

Es importante, en la utilización de esos datos, tener en cuenta la variabilidad espacial del suelo; el fenómeno de histéresis en procesos de desecamiento y humedecimiento y las modificaciones temporales, debido a los cambios en la estructura del suelo, que ocurren principalmente en su horizonte superficial.

¹ Universidade Estadual de Ponta Grossa - Paraná- Brasil

² ETSI Agrónomos, Universidad de Córdoba - España

Varios equipos pueden ser utilizados en condiciones de laboratorio y/o campo para determinar la humedad del suelo como bloques de yeso, sonda de neutrones y TDR, y potencial matricial como copa de Haines, placa de Richards, tensiómetro y psicrómetro. Cada método de medición de humedad y potencial matricial presenta sus ventajas y desventajas de uso.

Algunos investigadores han comparado las relaciones de humedad-succión obtenidas en campo con las obtenidas en laboratorio. Martínez et al. (1994) y Larue et al. (1968) encontraron, para valores de potencial matricial mayores que -100 y -500 cm H_2O , respectivamente, una gran similitud entre los resultados de las relaciones humedad-succión obtenidas en campo y en laboratorio. Los primeros autores utilizaban una sonda TDR y tensiómetros en campo, y el recipiente de tensión hídrica en laboratorio, mientras que los segundos autores trabajaban con la placa de Richards en laboratorio y con tensiómetros en campo. La humedad del suelo se determinaba gravimétricamente en muestras obtenidas en campo. Brust et al., (1968) observaron semejanzas en las curvas humedad-succión de campo, utilizando la sonda de neutrones para determinación de la humedad, y las de laboratorio.

Sin embargo, Bruce (1972) y Brust et al (1968) han encontrado diferencias significativas entre la relación humedad-succión para valores superiores a -1000 cm H_2O , al comparar muestras de suelos con estructura alterada con muestras de suelos con estructura inalterada o con datos medidos en campo.

Cassel (1985), ha encontrado una diferencia significativa entre las curvas obtenidas con la placa de Richards y por método de campo. Las humedades para un mismo potencial matricial eran mayores en laboratorio que en campo. Por eso, Bruce y Luxmoore (1986) recomiendan cautela al utilizar los datos de laboratorio para representar las condiciones de campo.

El objetivo de este trabajo, es probar la utilización conjunta del TDR y del tensiómetro para determinación de la curva de retención de humedad del suelo en condiciones de laboratorio y campo, comparándolo con otros métodos.

MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en la finca experimental Alameda del Obispo, del Centro de Investigación y Desarrollo Agrario de Córdoba, España.

El suelo del área experimental, donde fueron instalados los ensayos de campo y tomadas muestras para determinación de las propiedades hidráulicas en laboratorio, es franco arenoso de origen aluvial, clasificado como Xerofluvent típico. Las texturas del perfil se recogen en la tabla 1.

Varias curvas de retención de humedad, en condiciones de laboratorio y de campo, trabajando con suelo "natural" y tamizado, con tamiz de 2 mm de diámetro, para que fuese homogéneo, fueron obtenidas utilizando los procedimientos que se describen a continuación y cuyas características generales se muestran en la tabla 2.

1. Copa de Haines y placa de Richards

La copa de Haines (figura 1) y la placa de Richards posibilitan respectivamente la obtención de puntos de la curva de retención con baja tensión (0 a -100 cm H_2O) y baja y media tensión (0 a -5000 cm H_2O). La placa de Richards, a

baja tensión, presenta la dificultad de regulación precisa del manómetro metálico, que puede ser subsanada con la utilización de un manómetro de agua (comunicación personal de J.M. de Haro) (figura 2).

Tabla 1 - Análisis textural del suelo a distintas profundidades

Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clasificación textural
0-10	15.9	15.3	68.8	franco arenoso
10-20	16.5	15.5	68.0	franco arenoso
20-30	16.1	14.2	69.7	franco arenoso
30-40	14.1	12.7	73.2	franco arenoso
40-50	12.0	11.5	76.5	franco arenoso
50-60	12.0	10.8	77.2	franco arenoso
60-70	10.8	9.0	80.2	franco arenoso
70-80	10.2	12.1	77.7	franco arenoso
80-90	10.0	11.3	78.7	franco arenoso
90-100	10.1	12.0	77.9	franco arenoso
100-110	6.3	7.4	86.3	arenoso franco
110-120	4.1	3.0	92.9	arenoso
120-130	2.3	1.6	96.1	arenoso
130-140	10.5	12.8	76.7	franco arenoso

Tabla 2 - Información general de los ensayos.

Condiciones del suelo	Recipiente utilizado	Nº de repeticiones	Equipo utilizado	Local del trabajo	Profundidad de muestreo (cm)	Densidad aparente final (g/cm ³)	Simbología
tamizado	anillo	12	placa de Richards	laboratorio	0-20	1,36	PR AT1
tamizado	anillo	6	copa de Haines y placa de Richards	laboratorio	0-20	1,36	PR AT2
tamizado	cilindro	5	copa de Haines y placa de Richards	laboratorio	0-20	1,38	PR CT3
tamizado	cilindro	9	placa de Richards	laboratorio	0-20	1,26	PR CT4
natural	anillo	3	copa de Haines y placa de Richards	laboratorio	10	1,50	PR AN1
natural	anillo	3	copa de Haines y placa de Richards	laboratorio	25	1,66	PR AN2
natural	anillo	3	copa de Haines y placa de Richards	laboratorio	75	1,44	PR AN3
natural	anillo	3	copa de Haines y placa de Richards	laboratorio	10	1,35	PR AN4
natural	cilindro	9	placa de Richards	laboratorio	10	1,40	PR CN5
tamizado	caja de madera	1	2 sondas TDR* y 3 tensiómetros	laboratorio	0-20	1,42	TDR TL
tamizado	caja metálica	3	1 sonda TDR* y 1 tensiómetro	campo	0-20	x	TDR TCF
natural	caja metálica	3	1 sonda TDR* y 1 tensiómetro	campo	0-15	x	TDR NCF
natural	suelo natural	48	sonda TDR** móvil y 48 tensiómetros	campo	0-15	x	TDR NCM
tamizado	macetas	12	1 balanza y 12 tensiómetros	invernadero	0-20	1,40	BAL T1

* TDR marca Soilmoisture

** TDR marca Imko

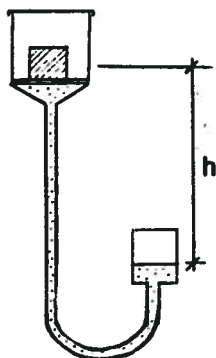


Figura 1 - Copa de Haines

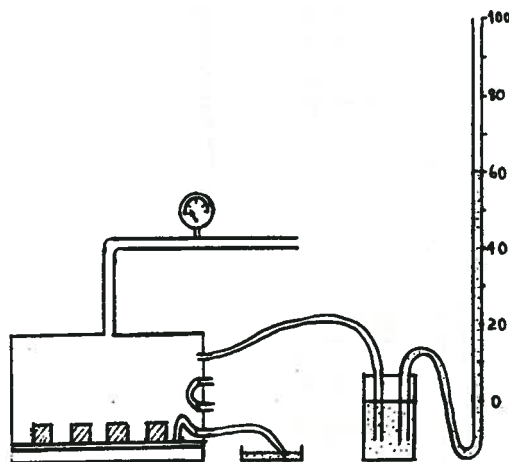


Figura 2 - Placa de Richards con manómetro de agua

Para la determinación de las curvas de retención fueron utilizadas muestras de suelo natural y tamizadas contenidas en anillos de 4,9 cm de diámetro y 2 cm de altura y cilindros de 5,3 cm de diámetro y 6 cm de altura. Se obtuvieron 4 curvas con suelo tamizado y 5 con suelo natural (tabla 2). Para las curvas de desecamiento se adoptó el procedimiento de equilibrio en secuencia de la humedad y la tensión (Klute, 1986).

2. TDR y tensiómetro en laboratorio

Se instalaron 2 sondas TDR de 3 varillas de 20 cm de largo y 3 tensiómetros de mercurio en un suelo tamizado y secado a estufa, puesto en una caja de madera de 26,5 cm de altura, 37,8 cm de anchura y 40,0 cm de largo (figura 3). Este suelo fue saturado en sentido ascendente, manteniéndose el estado de saturación durante 48 horas para ser posteriormente drenado.

Se hicieron medidas diarias de la humedad volumétrica del suelo con el TDR y del potencial matricial del suelo con tensiómetros. El tiempo necesario para obtención de las curvas de desecamiento y humedecimiento fueran de 68 y 45 días, respectivamente.

3. TDR y tensiómetro en campo

a. Sonda TDR fija

Se dispusieron 6 cajas metálicas (3 con suelo tamizado y 3 con suelo natural), abiertas en las caras inferior y superior, con 15 cm de altura, 20 cm de anchura y 37 cm de largo. En el interior de cada caja se instalaron una sonda TDR de 3 varillas de 20 cm de largo y un tensiómetro de mercurio (Figura 4).

El suelo fue saturado durante 24 h en el sentido descendente. Se determinaron 2 curvas de desecamiento: con el suelo cubierto con plástico negro y con el suelo no cubierto, en un tiempo de 22 y 14 días, respectivamente. Se tomaron medidas diarias de la humedad volumétrica del suelo con el TDR y del potencial matricial del suelo con el tensiómetro.

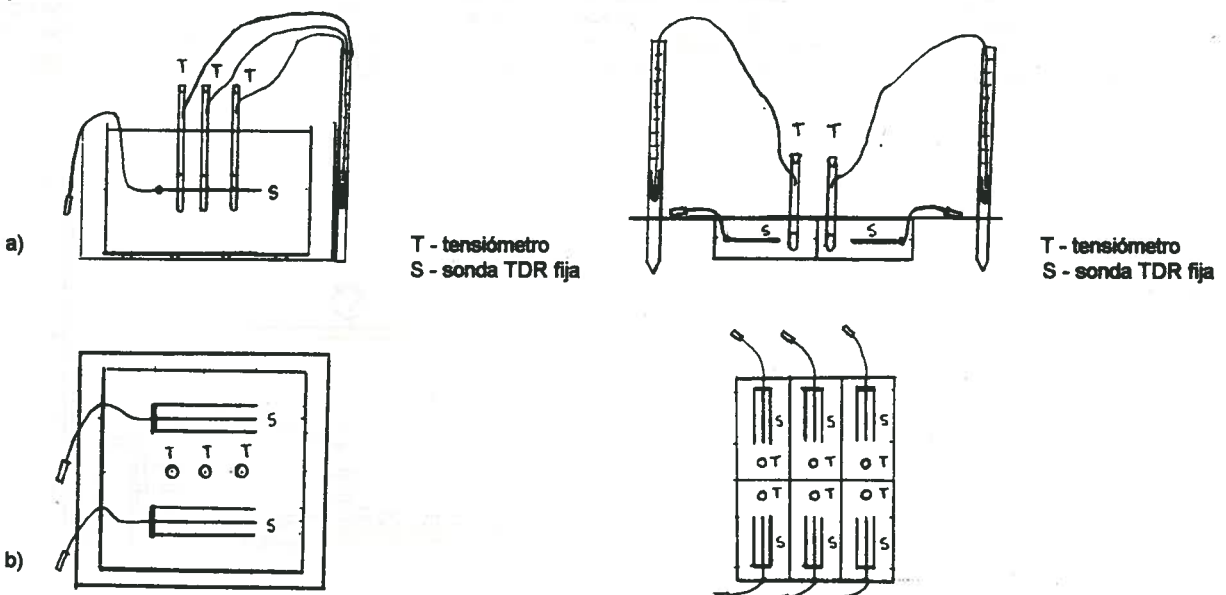


Figura 3 -Esquema del sistema TDR-tensiómetro en laboratorio (a) vista lateral y (b) vista de cima.

Figura 4 -Esquema del sistema TDR-tensiómetro en campo (a) vista lateral y (b) vista de cima.

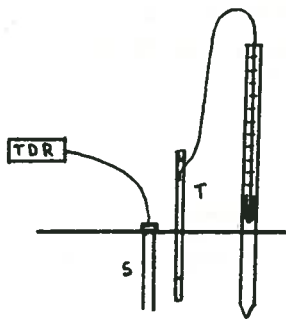
b. Sonda TDR móvil

Se instalaron 48 tensiómetros a profundidad de 10 cm en campo, fundamentalmente para hacer un control del potencial matricial del suelo en un experimento de lechuga con riego por goteo con distintas aplicaciones de agua. Se insertaba una sonda TDR con 2 varillas de 10 cm de largo verticalmente en el suelo, cerca de los tensiómetros (figura 5), cada vez que se deseaba realizar una lectura conjunta de la humedad volumétrica con el TDR y del potencial matricial con el tensiómetro.

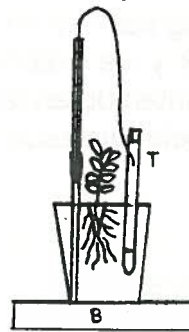
4. Balanza y tensiómetro

Se prepararon 36 macetas de 14 y 18 cm de diámetro inferior y superior, respectivamente y 16,5 cm de altura, 4000 g de suelo tamizado secado a estufa. El suelo fue saturado en el sentido ascendente por 72 h y después drenado también por 72 h.

Se transplantó una lechuga y se instaló un tensiómetro por maceta (total de 12 tensiómetros) al cabo de 0 y 3 días, respectivamente, después del final del drenaje (figura 6). Las medidas de humedad del suelo se efectuaron con una balanza electrónica de 10 g de precisión y las medidas del potencial matricial con los tensiómetros.



T - tensiómetro
S - sonda TDR móvil



T - tensiómetro
B - balanza

Figura 5 - Esquema del sistema TDR-tensiómetro en campo

Figura 6 - Esquema del sistema balanza-tensiómetro

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas de desecamiento, obtenidas con las copas de Haines y placa de Richards para el suelo natural y tamizado, se presentan en las figuras 7 y 8.

En la figura 7 se observa que las curvas presentan gran semejanza entre ellas, principalmente para las muestras contenidas en los anillos y una pequeña tendencia a obtener una humedad mayor a la misma tensión, para muestras de suelo contenidas en cilindros. La similitud entre las muestras tomadas en anillos a profundidades distintas refleja la homogeneidad del suelo en cuanto a textura (v. tabla 1). La diferencia entre las muestras contenidas en cilindros y en anillos, a pesar de ser pequeña puede estar confirmando el consejo de Klute (1986), de trabajar con muestras de pequeña altura.

En la figura 8 también se observa una pequeña diferencia entre las curvas del suelo tamizado. La curva con suelo contenido en cilindro y con densidad aparente menor presenta mayores valores de humedad a la misma tensión.

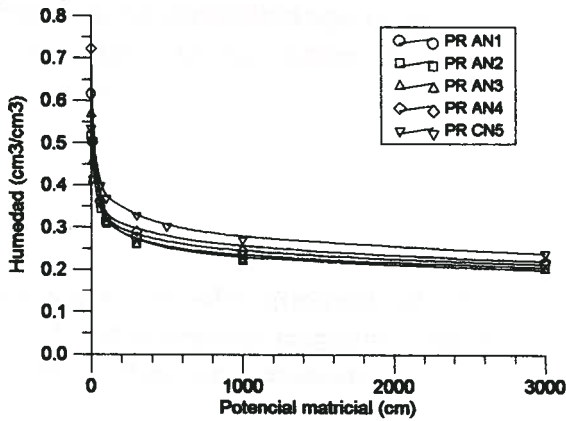


Figura 7 - Curvas de retención de humedad obtenidas en laboratorio utilizándose muestras de suelo natural.

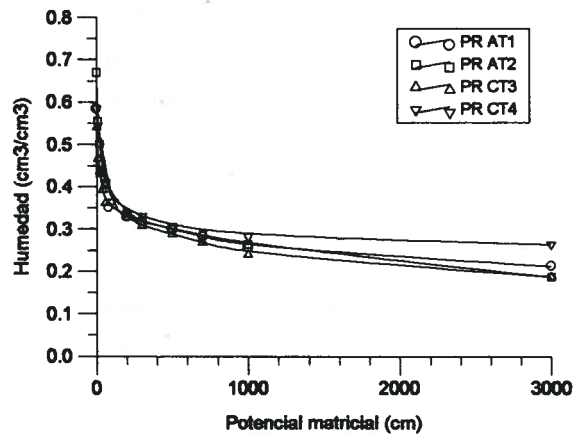


Figura 8 - Curvas de retención de humedad obtenidas en laboratorio utilizándose muestras de suelo tamizadas.

En las figuras 9 y 10 se puede verificar que las medidas de humedad con las 2 sondas TDR y de potencial matricial con los 3 tensiómetros, hechas en el suelo tamizado, contenido en la caja de madera, son muy similares, comprobando la uniformidad del suelo tamizado y de los instrumentos utilizados.

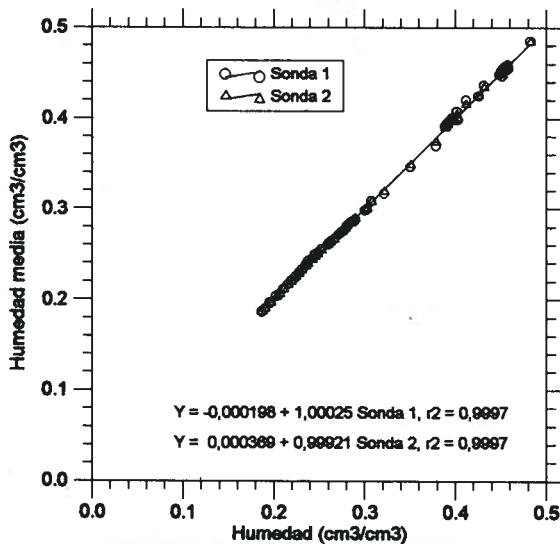


Figura 9 - Correlación entre la humedad media y la humedad obtenida con las sondas TDR 1 y 2.

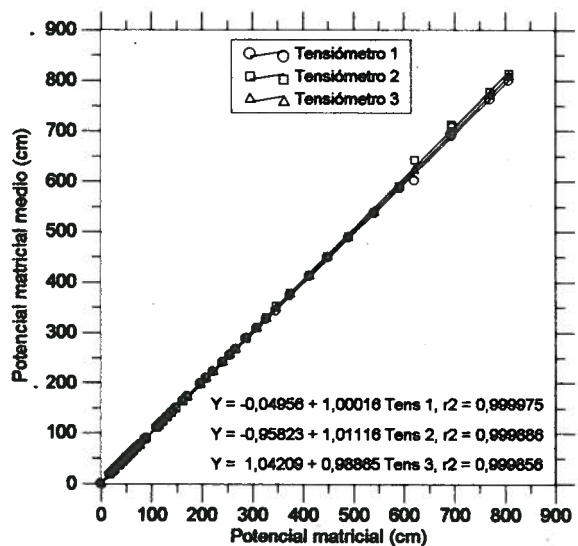


Figura 10 - Correlación entre el potencial matricial medio y el potencial matricial obtenido con los tensiómetros 1, 2 y 3.

En la figura 11 se pueden ver las curvas de desecamiento y humedecimiento, hechas para ese suelo. El suelo en proceso de desecamiento retiene mas agua que en proceso de humedecimiento a una misma tensión, como es de esperar. El tiempo para obtención de estas curvas fue grande, ya que la evaporación de agua en invierno dentro del laboratorio era muy pequeña.

En la figura 12 se observa que el suelo tamizado, a partir de una determinada tensión (aproximadamente $-100 \text{ cm H}_2\text{O}$) empieza a retener menos agua que el suelo natural, indicando una mayor compactación. Prácticamente, no hay diferencias entre las curvas para suelos cubierto y no cubierto, a pesar de necesitar un tiempo mayor para la obtención de las curvas con suelo cubierto, especialmente para los suelos tamizados, debido a la ausencia de evaporación.

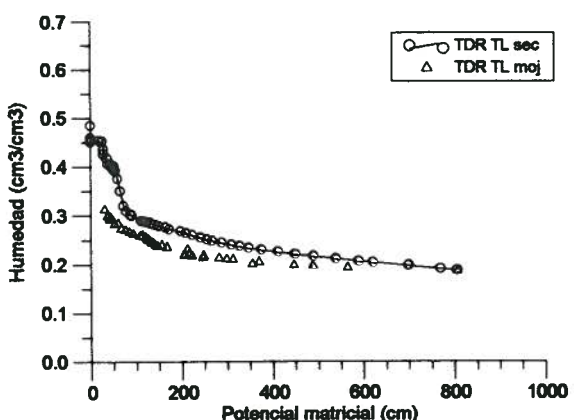


Figura 11 - Curvas de retención de humedad obtenidas por secamiento y mojadura en suelo tamizado contenido en caja de madera.

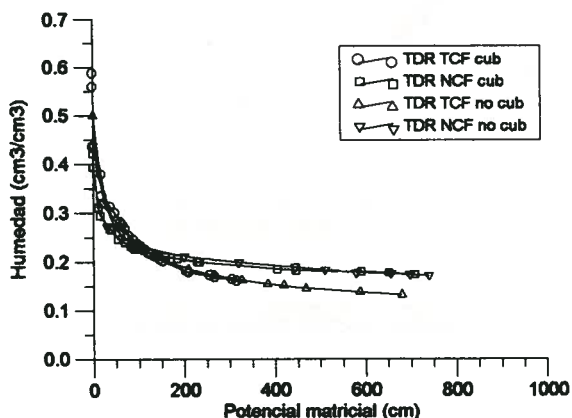


Figura 12 - Curvas de retención de humedad obtenidas en campo con TDR y tensiómetro en suelo contenido en cajas metálicas.

En la figura 13 se observa que la humedad del suelo para el mismo potencial matricial es mayor en las curvas de desecamiento de suelo tamizado, obtenidas con la placa de Richards (cilindro y anillo); balanza-tensiómetro y TDR-tensiómetro en laboratorio; y TDR-tensiómetro en campo. Las curvas obtenidas con la placa de Richards son muy similares entre sí, así como también son las curvas obtenidas con balanza-tensiómetro y TDR-tensiómetro en laboratorio. La mayoría de los puntos de la relación humedad-succión obtenidos con balanza-tensiómetro están con el suelo en baja tensión por que 2/3 de las macetas eran regadas con cantidad igual o superior a la necesaria.

En la figura 14 se observa la misma tendencia para las curvas de desecamiento de suelo natural. Hay una gran similitud entre las curvas TDR-tensiómetro en campo obtenidas usándose metodologías distintas. La mayoría de los puntos de la relación humedad-succión obtenidos con la sonda TDR móvil están con el suelo en baja tensión por que las lluvias mantuvieron el suelo muy húmedo durante casi todo el tiempo de duración del experimento.

Las diferencias encontradas entre las curvas vistas en la figura 13 probablemente han ocurrido debido a compactación distinta de los suelos tamizados, a pesar del intento de prepararlos todos a la misma densidad aparente. La curva hecha con balanza y tensiómetro presenta gran variabilidad en la zona de -50 a $-200 \text{ cm H}_2\text{O}$, debido a estar representando una curva de desecamiento y humedecimiento. Se percibe también en esa curva que la humedad saturada tiende a ser menor, debido a la compactación natural del suelo.

La curva hecha con TDR y tensiómetro en campo también presenta una gran variabilidad en la zona de tensión de -50 a $-200 \text{ cm H}_2\text{O}$ debido al constante proceso de desecamiento y humedecimiento del suelo; a la variabilidad del suelo

superficial espacial y temporalmente; y a la propia forma de medir la humedad, pues se utiliza una sonda TDR móvil (figura 14).

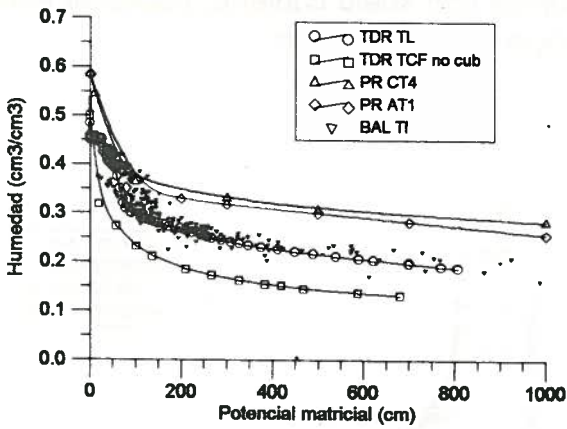


Figura 13 - Curvas de retención de humedad de suelo tamizado utilizándose distintos métodos de determinación..

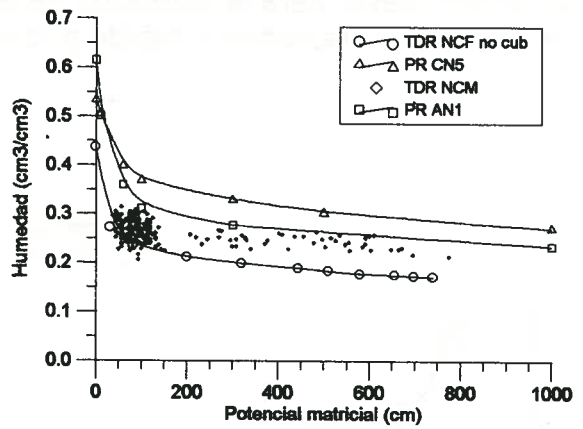


Figura 14 - Curvas de retención de humedad de suelo natural utilizándose distintos métodos de determinación.

En la tabla 3 se presentan los valores de los coeficientes del modelo de estimación de la humedad en función del potencial matricial propuesto por Van Genuchten (1980):

$$\theta = \{(\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha h)^n]^m\} + \theta_r \tag{1}$$

donde θ , θ_s y θ_r son respectivamente, humedad del suelo para un determinado potencial matricial, humedad del suelo saturado y humedad residual, en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; h es potencial matricial del agua en el suelo, en $\text{cm H}_2\text{O}$; y α , n y m son coeficientes de la ecuación. En esa tabla se percibe que los valores ajustados de θ_s , θ_r , θ_{300} y θ_{15000} obtenidos con la placa de Richards y con TDR-tensiómetro son superiores y semejantes, respectivamente, a los valores generales para suelos franco arenosos.

Tabla 3 - Parámetros de Van Genuchten, coeficientes de determinación y valores ajustados de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento de las curvas de retención de humedad.

Curvas	θ_s	θ_r	α	n	m	r^2	θ_{60}	θ_{100}	θ_{300}	θ_{15000}
	(cm^3/cm^3)	(cm^3/cm^3)					(cm^3/cm^3)	(cm^3/cm^3)	(cm^3/cm^3)	(cm^3/cm^3)
PR AT1	0.583	0.084	0.276	1.183	0.155	0.989	0.381	0.355	0.306	0.192
PR AT2	0.666	0.180	0.137	1.327	0.246	0.988	0.411	0.374	0.310	0.202
PR CT3	0.535	0.144	0.107	1.275	0.216	0.979	0.374	0.345	0.294	0.195
PR CT4	0.587	0.240	0.067	1.486	0.327	0.997	0.410	0.375	0.320	0.252
PR AN1	0.615	0.176	0.156	1.399	0.285	0.999	0.354	0.322	0.271	0.196
PR AN2	0.513	0.151	0.188	1.287	0.223	0.992	0.330	0.306	0.285	0.188
PR AN3	0.567	0.118	0.215	1.266	0.210	0.998	0.344	0.316	0.266	0.170
PR AN4	0.722	0.172	0.458	1.303	0.233	0.999	0.373	0.344	0.295	0.210
PR CN5	0.534	0.205	0.053	1.393	0.282	0.995	0.403	0.371	0.315	0.229
TDR TL	0.514	0.058	0.042	1.358	0.264	0.972	0.364	0.321	0.240	0.103
TDR TCF cub	0.524	0.093	0.097	1.500	0.334	0.947	0.267	0.230	0.172	0.104
TDR TCF no cub	0.496	0.073	0.138	1.403	0.287	0.989	0.251	0.219	0.167	0.093
TDR NCF cub	0.414	0.151	0.170	1.453	0.312	0.987	0.242	0.223	0.195	0.159
TDR NCF no cub	0.435	0.148	0.153	1.486	0.327	0.996	0.245	0.224	0.193	0.155
Franco arenoso*	0.453	0.041							0.207	0.095
	(0.351-0.555)	(0.024-0.106)							(0.126-0.288)	(0.031-0.159)

* Rawls y Brakensiek (1989)

CONCLUSIONES

Las curvas de retención de humedad obtenidas con la placa de Richards presentan valores de humedad a un mismo potencial matricial superiores a los obtenidos con TDR-tensiómetro, balanza-tensiómetro y a los datos generales para suelos franco arenosos.

Las curvas de retención de humedad del suelo medidas en condiciones de laboratorio con TDR-tensiómetro o balanza-tensiómetro son muy útiles para el control de riego en experimentos con cultivos en macetas. Estas curvas también pueden ser utilizadas en diseño y manejo de sistemas de riego, teniendo el cuidado de hacerlas con muestras de suelo con estructura no alterada.

Las curvas de retención de humedad del suelo obtenidas en condiciones de campo con TDR-tensiómetro son muy útiles para el diseño y manejo de sistemas de riegos, principalmente para los cultivos sensibles a la falta de agua, pues representan las condiciones reales.

Los métodos TDR-tensiómetro y balanza-tensiómetro presentan como ventaja la facilidad de determinación en separado o en conjunto de las curva de secamiento y de mojadura. Como desventaja se puede citar el tiempo necesario para la obtención de la curva.

BIBLIOGRAFÍA

- BRUCE, R.R., 1972. Hydraulic conductivity evaluation of the soil profile from soil water retention values. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36:555-561.
- BRUCE, R.R. y LUXMOORE, R.J., 1986. Water retention: field methods. In: KLUTE, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1 - Physical and mineralogical methods*, Agronomy nº 9. 2ª ed. p.563-596. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
- BRUST, K.J., VAN BAVEL, C.H.M. y STIRK, G.B., 1968. Hydraulic properties of a clay loam soil and the field measurement of water uptake by roots: III. Comparison of field and laboratory data on retention and of measured and calculated conductivities. *Soil Sci. Am. Proc.* 32:322-326.
- CASSEL, D.K., 1985. Physical characteristics of soils of the Southern Region-Summary of in situ unsaturated hydraulic conductivity. North Carolina State Univ. Southern Coop. Ser. Bull. 303.
- KLUTE, A., 1986. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1 - Physical and mineralogical methods*, Agronomy nº 9. 2ª ed. p.563-596. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
- LARUE, M.E., NIELSON, D.R. y HAGAN, R.M., 1968. Soil water flux below ryegrass root zone. *Agron. J.* 60:625-629.
- MARTÍNEZ, J., SANCHEZ, J.M. y CAMMERAAT, L.H., 1994. La medida de la humedad del suelo mediante el método TDR(Time Domain Reflectometry): estado del arte y ejemplos de aplicación. In: MORELL, I. *Investigación en zona no saturada*, p. 17-27. Publicacions de la Universitat Jaume Y.
- RAWLS, W.J. y BRAKENSIEK, D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: MOREL-SEYTOUX, H.J. (ed.). *Unsaturated flow in hydrologic modeling.- Theory and practice*, p. 275-300. Kluwer Academic Publishers.
- VAN GENUCHTEN, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898.

DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POR MEDIO DE IMÁGENES LANDSAT-TM5 Y SU AGREGACIÓN A RESOLUCIÓN NOAA-AVHRR

(P) Medina Minuesa, J.L. ⁽¹⁾; Camacho Poyato, E. ⁽¹⁾; Reca Cardeña, J. ⁽²⁾; López Luque, R. ⁽³⁾

RESUMEN

Con este trabajo se ha tratado de determinar el impacto de la resolución espacial de la imagen de diferentes satélites en el cálculo de la evapotranspiración (ET). Se ha calculado la ET diaria partiendo de imágenes Landsat-TM5 aplicando el algoritmo SEBAL. Posteriormente se ha sometido a la imagen a un proceso de agregación a resolución NOAA-AVHRR y se ha vuelto a aplicar este algoritmo. Se escogió NOAA-AVHRR por la disponibilidad diaria de más de una imagen y por su bajo (nulo) coste de adquisición, desventajas fundamentales del uso de Landsat-TM. Sin embargo, su resolución relativamente baja en comparación con Landsat-TM hace que la determinación de la ET por medio de NOAA-AVHRR no tenga aplicaciones a nivel de parcela. Se persigue establecer algún tipo de relación entre los diferentes resultados obtenidos para en un futuro poder determinar la ET partiendo de imágenes NOAA-AVHRR y aumentar su aplicabilidad a nivel subregional, además de tener datos de evapotranspiración durante todos los días que dura la temporada de riegos.

El estudio se ha realizado sobre una imagen del T.M. de Aguilar de la Frontera, Córdoba, sobre el que se han contrastado los resultados obtenidos.

ABSTRACT

This report has been written in order to determine the evapotranspiration (ET) by means of remote sensing measurements and the impact of the spatial resolution in the accuracy of the estimations. ET has been calculated by applying the SEBAL algorithm to Landsat-TM5. Subsequently, an aggregation procedure was applied to this image to get NOAA-AVHRR resolution. NOAA-AVHRR images are freely available more than one time per day. The aim is to establish relationships between the calculated ET by means of these two kinds of images in order to get daily information of evapotranspiration during the irrigation season with a higher resolution than the one provided by NOAA-AVHRR.

The Municipality of Aguilar de la Frontera, Córdoba, was the study area.

1.- Introducción.

El siguiente estudio tiene como un primer objetivo obtener la evapotranspiración (ET) diaria partiendo de imágenes Landsat-TM5 por medio del algoritmo SEBAL

¹ Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.

² Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería.

³ Departamento de Física Aplicada. Universidad de Córdoba.

(Bastiaanssen W.G.M., 1995). Posteriormente se ha realizado un proceso de agregación desde la resolución de Landsat-TM (30x30 m²) a la resolución de las imágenes ofrecidas por la serie de satélites NOAA-AVHRR (1100x1100 m²) y se han comparado los resultados obtenidos después de la nueva aplicación del algoritmo a esta escala.

El objetivo de esta agregación es obtener algún tipo de relación que permita obtener a partir de imágenes de satélite NOAA-AVHRR, estimaciones de evapotranspiración con una frecuencia diaria o subdiaria a una escala mayor que la que posibilita en primera instancia la resolución de este tipo de imágenes para posibilitar una aplicación a nivel de parcela en zonas regables.

La zona de estudio ha sido el Término Municipal de Aguilar de la Frontera, Córdoba, y sus alrededores. Para ello se extrajo una parte de la imagen original que cubría todo el sur de la Provincia de Córdoba.

La imagen usada en este trabajo fue tomada el día 2 de Julio de 1990. La parte extraída contiene 1198 filas y 1230 columnas. El sistema de coordenadas adoptado fue el UTM:

Coordenada menor- X	Coordenada menor- Y	Coordenada mayor- X	Coordenada mayor- Y
369101	4128434	332231	4164344

2.- Material y métodos.

2.1- Determinación de la ET diaria por medio de imágenes Landsat-TM5.

El proceso seguido para la obtención de la ET diaria ha sido la aplicación de la ecuación de balance de energía en la superficie del terreno, obteniendo sucesivamente la Radiación Neta (R_n), flujo de calor al suelo (G₀) y flujo de calor sensible (H) quedando el flujo de calor latente (LE) como término residual :

$$R_n = G_0 + H + LE \Rightarrow LE = R_n - G_0 - H \quad (2.1.1)$$

La radiación neta puede ser descrita como sigue:

$$R_n = (1 - r_0) K^\downarrow + \epsilon' \sigma T_a^4 - \epsilon_0 \sigma T_0^4 \quad (2.1.2)$$

r ₀	= albedo superficie del terreno	[-]
K [↓]	= radiación incidente de onda corta	[W m ⁻²]
ε'	= emisividad aparente de la atmósfera	[-]
σ	= constante de Stefan Boltzmann	[W m ⁻² K ⁻⁴]
T _a	= temperatura de la atmósfera	[K]
ε ₀	= emisividad de la superficie del terreno	[-]
T ₀	= temperatura de la superficie del terreno	[K]

En esta ecuación, el albedo, la temperatura superficial y la emisividad se puede obtener a partir de la imagen mientras que la temperatura de la atmósfera debe ser

conocida por datos meteorológicos. La radiación incidente de onda corta y la emisividad aparente de la atmósfera son factores calculados por fórmulas dadas en bibliografía.

Para el cálculo del **albedo** es necesario obtener en primer lugar la radiancia espectral partiendo de las bandas originales de Landsat y de los coeficientes 'a' y 'b' (Markham & Barker, 1987):

$$L_{\lambda} = a + \frac{b - a}{255} ND \quad (2.1.3)$$

L_{λ}	= radiancia espectral para longitud de onda λ	[W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹]
a	= radiancia espectral para ND = 0	[W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹]
b	= radiancia espectral para ND = 255	[W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹]
ND	= número digital (0...255)	[-]

Una vez obtenidas las radiancias espectrales, la radiación incidente y los parámetros geométricos que definen la posición solar podemos calcular el albedo espectral en el límite superior de la atmósfera.

Partiendo de los albedos espectrales se deriva el albedo global en el límite superior de la atmósfera a través de una ponderación de las bandas utilizadas en su cálculo.

Finalmente, se obtiene el albedo en la superficie del terreno mediante una aproximación lineal del albedo global obtenido en el paso anterior

Una vez obtenido el albedo pasamos al cálculo de la temperatura de la superficie del terreno. Para ello, previamente es obtenido el índice de vegetación NDVI necesario para derivar la emisividad y el flujo de calor al suelo:

$$NDVI = \frac{r_{p,IRC} - r_R}{r_{p,IRC} + r_R} \quad (2.1.4)$$

NDVI	= índice de vegetación	[-]
$r_{p,IRC}$	= albedo planetario en la banda del infrarrojo cercano	[-]
r_R	= albedo planetario en la banda del rojo	[-]

Partiendo de la radiancia de la banda 6 se deriva la temperatura medida en el límite superior de la atmósfera por el satélite mediante la siguiente expresión:

$$T_{sat} = \frac{K_1}{\ln\left(\frac{K_2}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (2.1.5)$$

T_{sat}	= temperatura medida en satélite	[K]
K_1	= constante de calibración del satélite	[K]

K_2 = constante de calibración del satélite [W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹]
 L_λ = radiancia espectral de la banda 6 [W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹]

La ecuación de Stefan Boltzmann permite conocer la radiación de onda larga emitida por la superficie recibida por el satélite. Dicha radiación debe ser corregida del efecto atmosférico mediante la oportuna calibración. En este caso debido a la falta de medios se optó por usar una relación obtenida en Castilla la Mancha, en condiciones similares a las existente en la zona de estudio (Bastiaanssen, 1995):

$$L^\uparrow = 1.050 L^\uparrow_{TOA} - 50.32 \quad (2.1.6)$$

L^\uparrow = radiación de onda larga emitida por la superficie del terreno [W m⁻²]
 L^\uparrow_{TOA} = radiación de onda larga emitida medida en el límite superior de la atmósfera [W m⁻²]

Aplicando inversamente la ecuación de Stefan Boltzmann, conocida la emisividad de la superficie se determina la temperatura superficial.

La **emisividad superficial** se obtiene como una función del índice de vegetación (NDVI):

$$\epsilon_0 = 1.009 + 0.047 \ln(\text{NDVI}) \quad (2.1.7)$$

ϵ_0 = emisividad de la superficie del terreno [-]

A este punto conocemos todos los parámetros necesarios para calcular la radiación neta. La temperatura del aire debe ser conocida en el momento de obtención de la imagen mediante datos meteorológicos, mientras que la radiación de onda corta incidente puede determinarse en función de la posición solar (M. Smith, 1991). La emisividad atmosférica es obtenida mediante relaciones empíricas en función de la transmitancia atmosférica.

Para el cálculo del **flujo de calor al suelo** nos servimos de la relación empírica Γ entre la radiación neta y el flujo de calor al suelo (Bastiaanssen, 1995), debido a la imposibilidad de derivar directamente G_0 de la imagen Landsat-TM.

$$G_0 = \Gamma R_n \quad (2.1.8)$$

La relación Γ es función del albedo, temperatura superficial e índice de vegetación.

El **flujo de calor sensible** es el término más difícil de estimar debido a la gran cantidad de variables que intervienen en su valor. De su buena calibración depende en gran medida el éxito en la determinación del flujo de calor latente y consecuentemente de la ET. La ecuación que permite su determinación es la siguiente:

$$H = \frac{\rho_a c_p}{r_{ah}} (T_0 - T_a) \quad (2.1.9)$$

ρ_a	= densidad del aire	[kg m ⁻³]
c_p	= calor específico del aire	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
T_0	= temperatura superficial	[K]
T_a	= temperatura del aire	[K]
r_{ah}	= resistencia aerodinámica al transporte de calor sensible	[s m ⁻¹]

En esta ecuación se requiere el cálculo de la diferencia de temperatura entre la superficie del terreno y la temperatura del aire así como la resistencia aerodinámica. El procedimiento para su cálculo es complejo y requiere un algoritmo iterativo por lo que se remite al lector al modelo SEBAL.

Es necesario para aplicar este modelo, sin embargo, la existencia de masas de agua relativamente grandes y áreas de terreno totalmente secas para asignarles un valor de flujo de calor sensible nulo y de calor latente nulo respectivamente. La mínima diferencia de temperatura existente entre la temperatura del suelo y del aire será asignada a las áreas con agua mientras que la máxima diferencia corresponderá a las zonas secas.

Por último determinamos el flujo de calor latente aplicando la ecuación 2.1.1.

La estimación de la ET diaria partiendo de valores de LE instantáneos se realiza considerando que la **fracción evaporativa** (Λ) permanece aproximadamente constante durante el día. Este parámetro queda definido en la ecuación 2.1.10 en la que es necesario estimar el valor de la radiación neta diaria y considerar que el valor acumulado del flujo de calor al suelo durante el día es nulo.

$$\Lambda = \frac{LE}{LE + H} = \frac{LE}{R_n - G_0} \quad (2.1.10)$$

Λ	= fracción evaporativa	[-]
-----------	------------------------	-------

Directamente se deriva el valor de la evapotranspiración diaria por aplicación de la ecuación 2.1.11:

$$E_a = \frac{\Lambda R_n^{24}}{\lambda \rho_w} \quad (2.1.11)$$

E_a	= evapotranspiración real	[mm d ⁻¹]
λ	= calor latente de vaporización	[J kg ⁻¹]
ρ_w	= densidad del agua	[kg m ⁻³]

2.2.- Descripción del proceso de agregación.

El proceso de agregación se realizó tomando grupos de 37 x 37 píxeles de la imagen Landsat-TM5 original y convirtiéndolos en uno sólo con un valor de radiancia igual a la media de los 1369 píxeles incluidos en él.

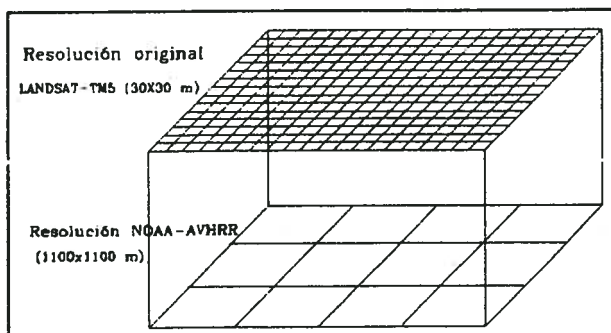


Figura 2.2.1. Esquema del proceso de agregación.

Una vez obtenida la nueva imagen a resolución NOAA-AVHRR, se volvió a aplicar el modelo SEBAL para determinar valores de ET en esta nueva escala comparándose los resultados a una y otra resolución.

2.3.- Contraste de los resultados.

Los valores de evaporación obtenidos en las dos grandes masas de agua existentes en la zona (Laguna de Zóñar y Embalse de Cordobilla), se contrastaron con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la ecuación de Penman con los datos climatológicos correspondientes al momento de toma. Debido a la ausencia de estaciones climatológicas completas en la zona de estudio, se procedió a interpolar los datos de las estaciones más cercanas.

La comparación a una y otra resoluciones se realizó a través de los histogramas resultantes de la aplicación del modelo.

3.- Resultados.

En la siguiente tabla se incluyen los datos estadísticos de las variables más relevantes obtenidas en el proceso:

	Landsat-TM				Agregación a resolución NOAA-AVHRR			
	media	mediana	moda	desv. estándar	media	mediana	moda	desv. estándar
Albedo (-)	0,22	0,2082	0,1866	0,057	0,217	0,212	0,209	0,033
NDVI (-)	0,307	0,286	0,27	0,084	0,305	0,297	0,293	0,043
Emisividad (-)	0,952	0,95	0,949	0,012	0,953	0,951	0,951	0,006
Temperatura Sup.(°C)	35,38	35,88	36,39	3,25	35,1	35,42	35,28	2,04
Frac. evaporativa (-)	0,522	0,533	0,5		0,529	0,605	0,54	

Tabla 3.1.

Como se puede comprobar en la tabla 3.1, la media, moda y mediana se mantienen, disminuyendo la desviación estándar de los valores asignados a cada pixel como cabría esperar, exceptuando la fracción evaporativa que experimenta un aumento considerable en el valor de la mediana debido a un mal ajuste obtenido en el cálculo de el flujo de calor sensible en resolución NOAA-AVHRR.

A continuación se incluyen los histogramas de los flujos energéticos derivados de la aplicación del modelo en ambas resoluciones:

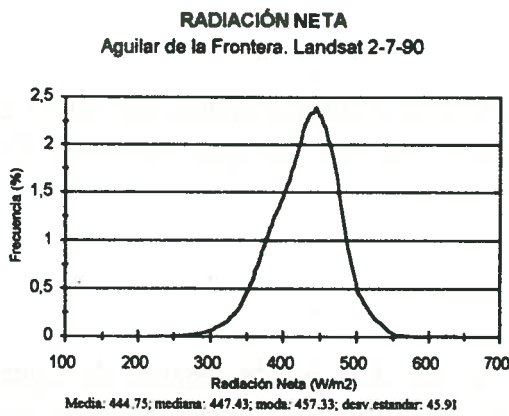


Figura 3.1

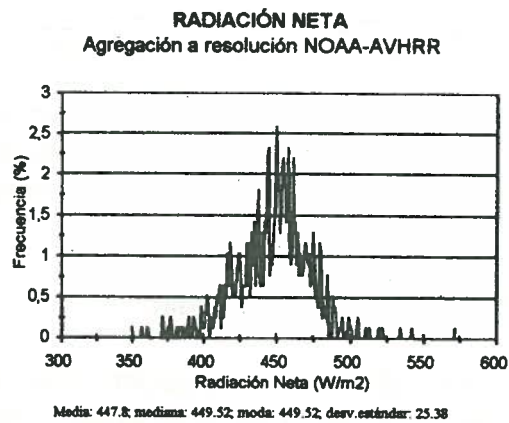


Figura 3.2

La radiación neta conserva aproximadamente constante la media, mediana y moda, disminuyendo drásticamente la desviación de los valores respecto a la media (desviación estándar), (Fig. 3.1, 3.2).

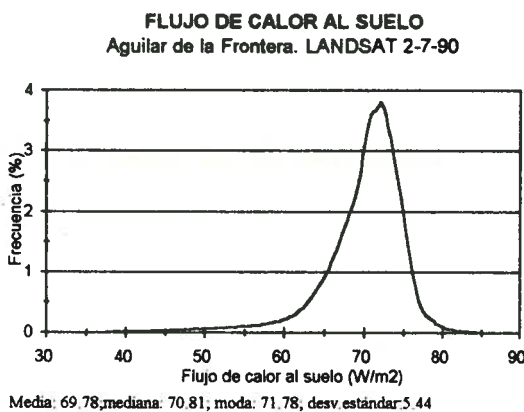


Figura 3.3

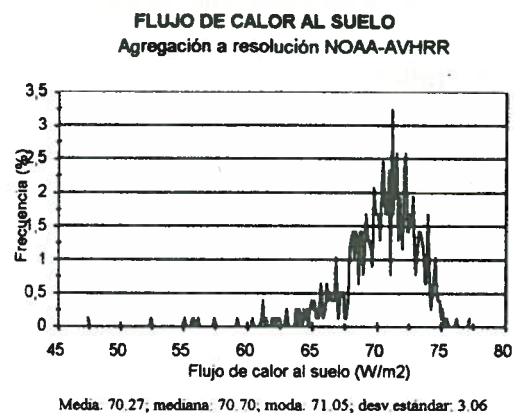


Figura 3.4

En el flujo de calor al suelo se observa la misma tendencia señalada anteriormente para la radiación neta (Fig. 3.3, 3.4).

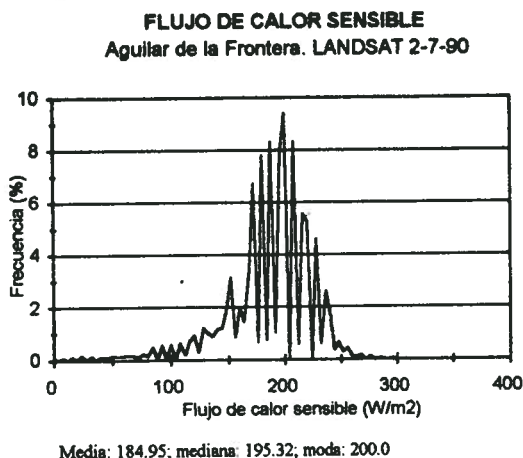


Figura 3.5

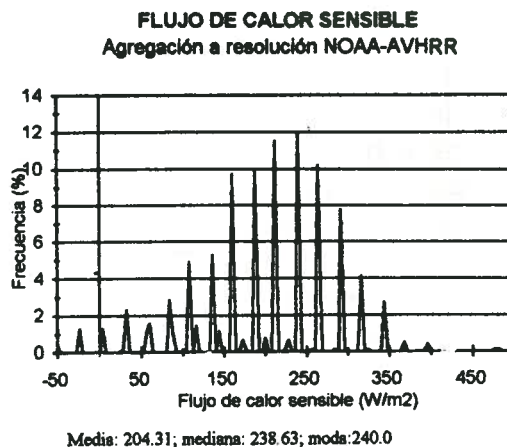


Figura 3.6

Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 3.6, el histograma del flujo de calor sensible no se consiguió ajustar correctamente, apareciendo valores negativos de este flujo que repercutieron al aplicar la ecuación 2.1.1 en la aparición de valores negativos de flujo de calor latente. La media, mediana y moda no se ajustan como en los casos anteriores como se observa en el histograma.

Este resultado se justifica por el hecho de que a esta resolución es muy difícil conseguir una parcela de terreno de 1.21 km² seca totalmente para asignarle un valor de flujo de calor latente nulo y otra totalmente húmeda (masa de agua) para asignarle un flujo de calor sensible nulo. Esto es fundamental para conseguir una buena calibración en el gradiente de temperatura entre la superficie y el aire.

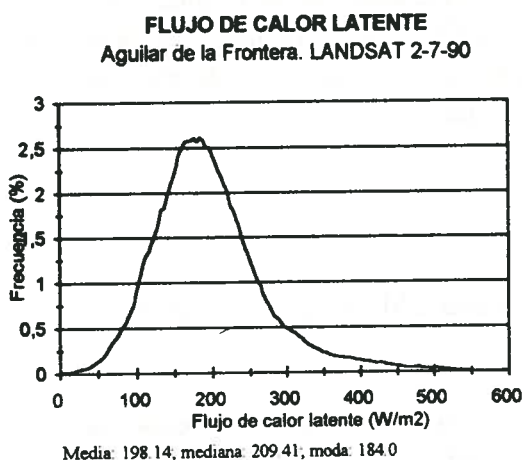


Figura 3.7

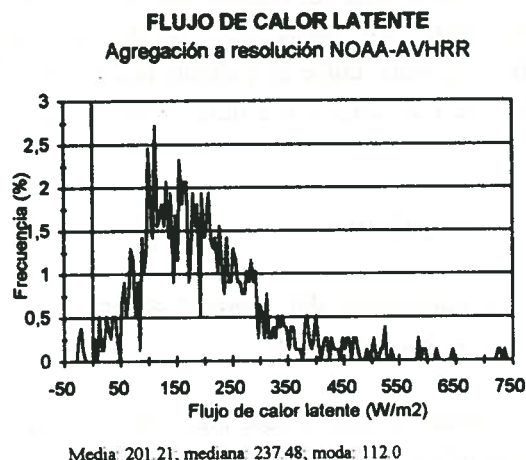


Figura 3.8

La media y mediana del flujo de calor latente son más similares que los obtenidos previamente en el flujo de calor sensible por el efecto que la radiación neta y flujo de

calor al suelo ejercen en la ecuación 2.1.1. Sin embargo, el valor de la moda es muy diferente.

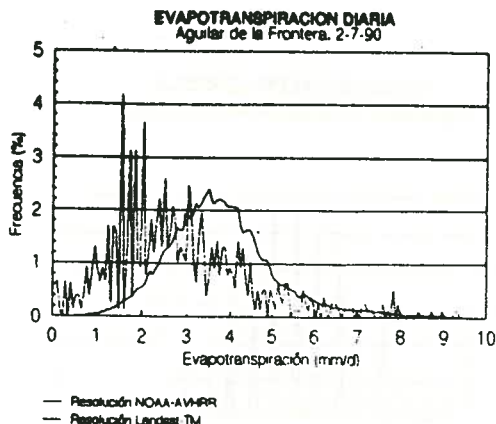


Figura 3.9

La evapotranspiración calculada mayor los valores máximos y minor los valores mínimos obtenidos a resolución Landsat-TM5 original. La media se mantiene (2.97 mm/d frente a 3.07 mm/d en la agregación) al igual que la moda (2.63 mm/d frente a 2.67 mm/d en la agregación). El parámetro que más ha variado es la mediana (2.79 mm/d frente a 1.53 mm/d en la agregación)

Se incluye, al final de este trabajo, los mapas de ET resultantes del proceso de cálculo en las que se ha dispuesto el límite del término municipal. En el cuadrante sur-occidental se observa la zona regable del Genil-Cabra, distinguible por sus altos valores de ET. Asimismo, es claramente visible el río Genil en este cuadrante, el embalse de Cordobilla y la Laguna de Zóñar.

Los valores de evaporación obtenidos en el Embalse de Córdoba (al Sur) y la laguna de Zóñar (al Norte) fueron comprobados con la ecuación de Penman, ajustándose muy bien a los valores esperados en el pantano de Cordobilla, con una diferencia inferior a 0.3 mm/día entre el cálculo hecho por SEBAL y por la ecuación de Penman, y una diferencia inferior a 0.8 mm/día en la laguna de Zóñar.

4.- Conclusiones.

- La aplicación del modelo en resolución Landsat-TM se ajusta bastante bien a las condiciones locales.
- Cuando se utiliza este algoritmo con resolución NOAA-AVHRR, la menor resolución provoca un mal ajuste en el cálculo iterativo del flujo de calor sensible debido a la imposibilidad de establecer zonas en el terreno totalmente secas (flujo de calor latente nulo) y masas de agua (flujo de calor sensible nulo) de ese tamaño (1.21 km²).
- Para evitar esto, se propone usar la imagen completa tratando de obtener una mejor calibración, al ser muy superior el número de píxeles y por tanto existiendo más

posibilidad de obtener píxeles totalmente secos (y húmedos) para establecer el ajuste oportuno.

- También se deben establecer relaciones empíricas entre la temperatura superficial y la del aire, entre los valores obtenidos en el límite superior de la atmósfera de NDVI y radiación de onda larga emitida y la superficie el terreno y el parámetro Γ .

5.- Agradecimientos.

Este trabajo fue realizado en su mayor parte en el 'Department of Water Management in Arid Zones', Winand Staring Centre, Wageningen, Holanda, contando con el apoyo de los autores del Algoritmo SEBAL (Bastiaanssen & Menenti) y sus colaboradores a los que queremos expresarles nuestro más sincero agradecimiento.

6.- Bibliografía.

ARONOFF, S. (1993)

Geographic Information System. A management perspective. WDL Publications, Ottawa.

BUITEN H.J. and CLEVERS J.G.P.W. (1993)

Land observation by remote sensing. Theory and applications. Gordon & Breach science publishers. Wageningen Agricultural University. Holanda.

BASTIAANSEN, W.G.M. (1995)

Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Doctoral thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen. Holanda.

BASTIAANSEN W.G.M., HOEKMAN D.H. and ROEBELING R.A. (1993)

A methodology for the assessment of surface resistance and soil water storage variability at mesoscale based on remote sensing measurements. A case study with HAPEX-EFEDA data. IAHS Special Publication No. 2. DLO Winand Staring Centre, Wageningen. Holanda.

BASTIAANSEN, W.G.M. and MENENTI, M. (1989)

Surface reflectance and surface temperature in relation with soil type and regional energy fluxes. In: A.F. Bouwman(ed.). Soils and the greenhouse effect. John Wiley & Sons. Chichester, UK. 541-549.

BRUTSAERT, W. & M. SUGITA (1992)

Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation. in: Journal of geophysical research, vol. 97, nov. 1992, 18377-18382.

MARKHAM, B.L. and BARKER, J.B. (1987)

Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. Int. J. Remote Sensing 8(3): 517-523.

MENENTI, M., W.G.M. BASTIAANSEN, D. van EICK & M.A. ABD EL KARIM (1989)

Linear relationship between surface reflectance and temperature and their application to map evaporation of groundwater. in: Adv. Space Research, Volume 9, No 1, 165-176.

SMITH, M (1991)

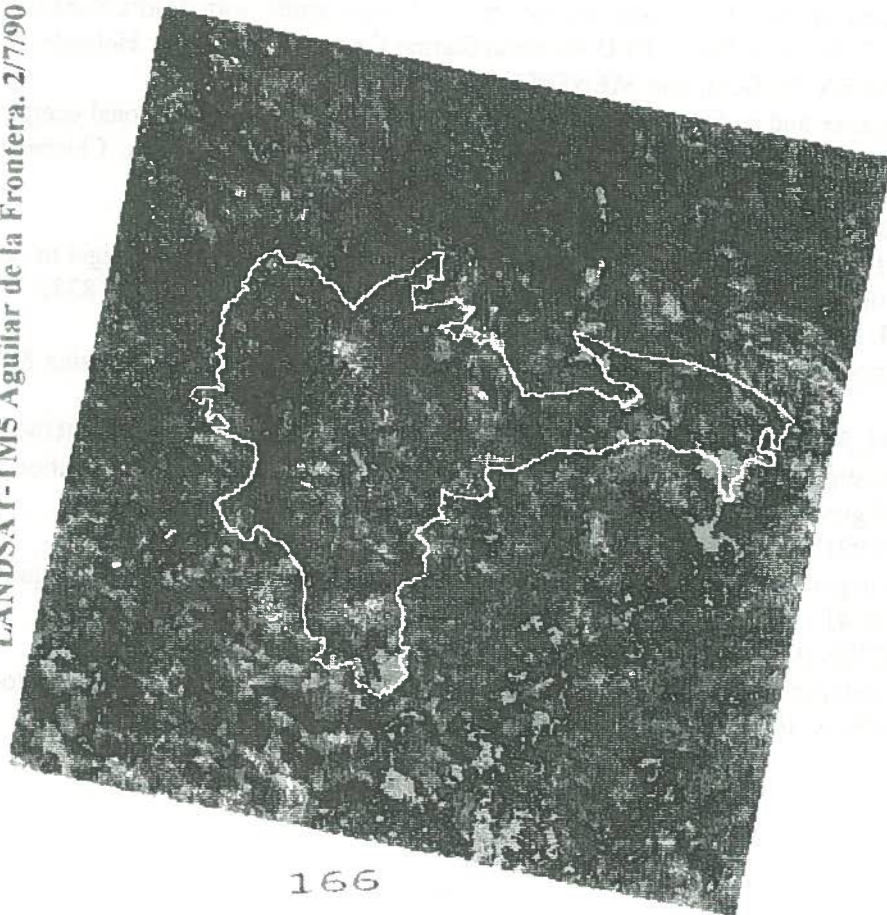
Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. FAO. Pages 40-41.

Van de GRIEND, A.A. & Owe, M. (1992)

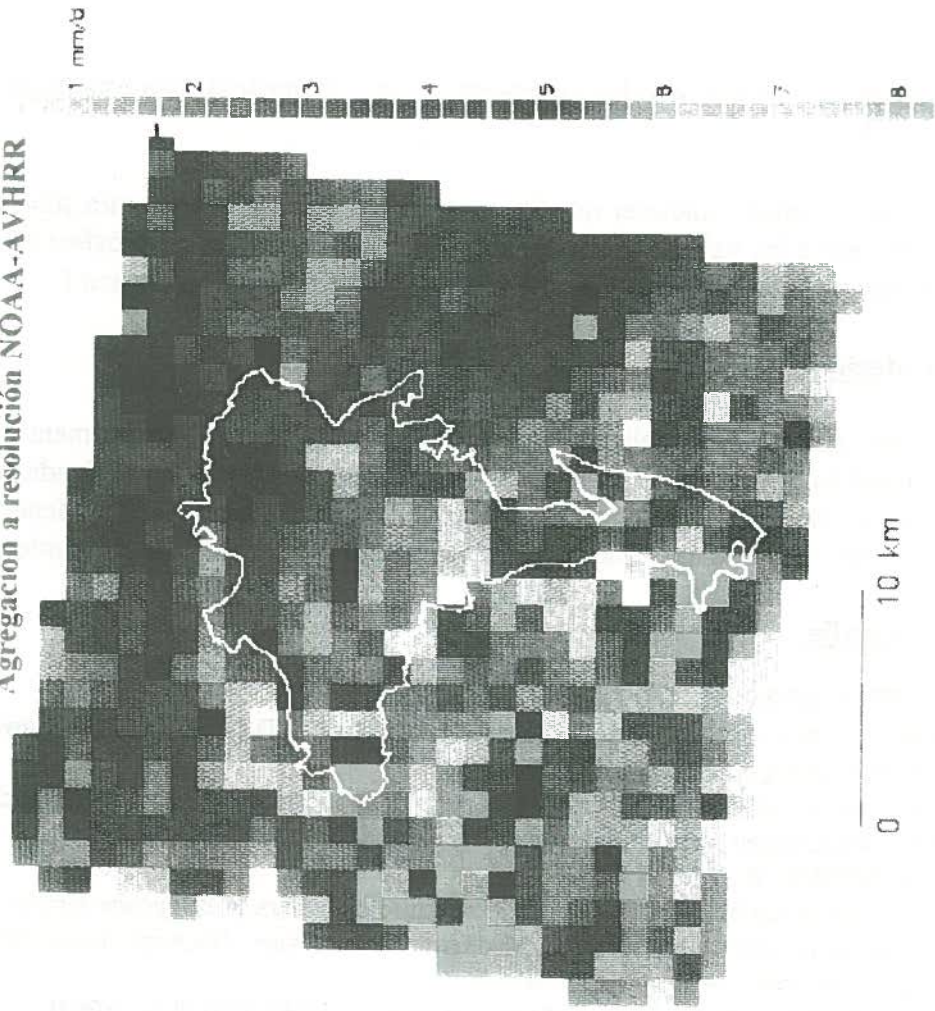
On the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for natural surfaces, Int. J. of Remote Sensing (in press).

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

LANDSAT-TM5 Aguilar de la Frontera. 2/7/90



Agregación a resolución NOAA-AVHRR



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN LA REGIÓN DE MURCIA.

L. RINCÓN¹
J. ORTEGA²
M. ERENA¹

Resumen:

La estimación de la evapotranspiración de referencia en puntos donde no existen estaciones meteorológicas, hace necesaria la utilización de técnicas de interpolación espacial.

En base a los datos suministrados por una red de estaciones automáticas y termopluviométricas distribuidas por la región de Murcia, en el presente trabajo se estima localmente la evapotranspiración de referencia a partir de los métodos de Radiación y Blaney-Cridle, y se aplica la Teoría de las variables regionalizadas para la interpolación espacial.

Los valores de ETo han sido estimados para 61 localizaciones e interpolados en 2.500 localizaciones adicionales situadas en una malla de 3.4 km. de espaciamiento entre nudos. Los mapas obtenidos para la ETo estimada concuerdan con las condiciones climatológicas de la zona.

Summary:

The need of reference evapotranspiration values on sites where there are not meteorological stations, makes necessary the use of techniques for spatial interpolation.

Based on data supplied by a network of automatic and standard meteorological stations, located in the Spanish province of Murcia, reference evapotranspiration is calculated locally using the Radiation's and Blaney-Cridle's methods, and regional maps are drawn using the Geostatistical method for spatial interpolation (kriging).

Values of ETo were available at the 61 locations and at 2.500 additional locations spaced at approximately 3.4 km intervals on a grid. The maps obtained for ETo are in agreement with the general climatological characteristics of the zone.

1. Introducción.

La estimación de la evapotranspiración de referencia (ETo) en puntos donde no existen estaciones meteorológicas, hace necesaria la utilización de técnicas de interpolación espacial, las cuales son especialmente interesantes para un adecuada evaluación de la ETC y programación del riego en zonas semiáridas y de escasos recursos hídricos como Murcia, ya que nos permite un mejor aprovechamiento del agua de riego.

¹ Dto. de Riegos. Centro de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (CIDA).
La Alberca. 30150. MURCIA.

² Escuela Politécnica Superior. Paseo Alfonso XIII. 30203. CARTAGENA.

Este estudio es un primer paso para el desarrollo de una metodología más general para la estimación local de valores diarios o mensuales de la ETo y su extensión a la escala regional usando la geoestadística multivariante CUENCA y AMEGEE, (1987).

2. Materiales y métodos.

Las estaciones utilizadas en el presente trabajo proceden de la Red de Estaciones Agroclimáticas de la Región de Murcia, cuya gestión tiene encomendada el Programa de Asesoramiento en Riegos (28 estaciones seleccionadas), y de la red de estaciones termoplumiométricas y sinópticas del Instituto Nacional de Meteorología (33 estaciones seleccionadas), las cuales nos han permitido disponer de un total de 61 estaciones distribuidas por la región y cuyos datos han sido usados para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo).

De las 61 estaciones utilizadas en el estudio (Fig. 1): 28 disponen de T^a y HR ; 26 disponen de T^a, HR, Viento, Precipitación y Evaporación; y 5 automáticas completas . Estas últimas disponen de los datos meteorológicos adicionales necesarios para el cálculo de la ETo por métodos basados en la ecuación de combinación .

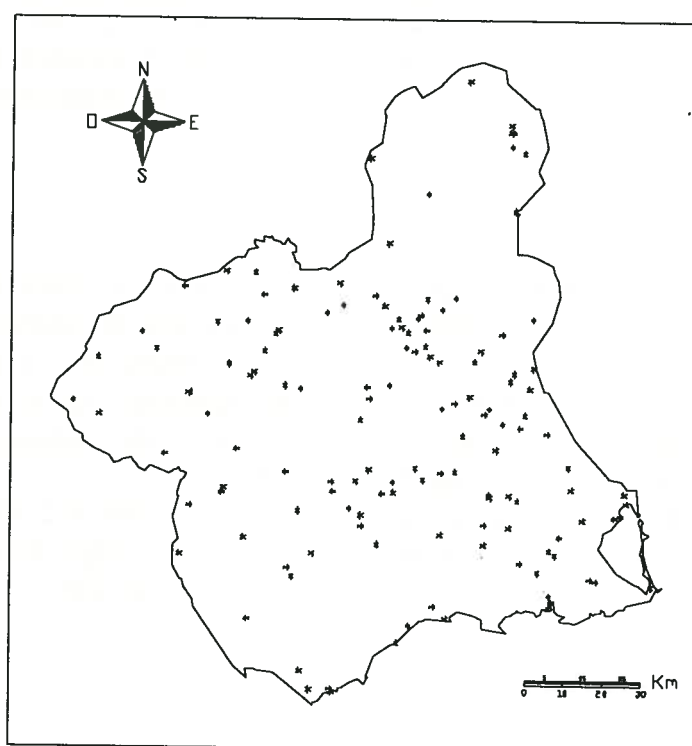


Fig. 1. Distribución de las estaciones Agroclimáticas.

El concepto de evapotranspiración tiene aspectos distintos en función del tipo de cubierta vegetal al que se refiera, este estudio se centra en el concepto de Evapotranspiración potencial que desarrollaron DOORENBOS y PRUITT, (1977) para la FAO tomando como cultivo de referencia las gramíneas.

Entre los métodos más comunes para el cálculo de la ETo, están los de combinación que incluyen un término de radiación y un término aerodinámico: Penman, Penman-Monteith, etc. y que son los que teóricamente dan resultados más ajustados. Sin embargo, estos métodos tienen el inconveniente de que necesitan la medida de gran número de variables climáticas y

para su cálculo necesitan estaciones provistas de sensores de temperatura, radiación, humedad relativa y viento. Dado que las estaciones de este tipo en la Región tienen pocos años de registro se ha optado por usar los métodos de Radiación y de Blaney-Criddle para un período de registro que va de 1.980-1.993 para la mayoría de las estaciones.

2.1 Métodos basados en BLANEY-CRIDDLE (1950): Con las modificaciones propuestas por la FAO y realizadas por DOORENBOS y PRUITT (1977), y con las modificaciones propuestas por el Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos USDA-FAO realizadas por ALLEN y PRUITT, (1986) es uno de los métodos basados en la temperatura del aire más universalmente aceptado.

2.1.1 Blaney-Criddle FAO (BC-F) : $ET_o = A + B \cdot f$

siendo:

ET_o = Evapotranspiración de referencia media mensual, en mm/día.

$f = p(0,46 \cdot Tmd + 8,13)$ valor original de BLANEY-CRIDDLE (1950).

p = Porcentaje medio diario de las horas diurnas anuales, en tanto por uno.

Tmd = Temperatura media mensual del aire en ° C.

A, B Coeficientes de calibración climáticos FREVERT et al (1983)

2.2.2 Blaney-Criddle USDA-FAO (BC-UF): $ET_o = A + B \cdot f' \cdot Rf \cdot (1 + Alt / 10^4)$

siendo:

ET_o = Evapotranspiración de referencia media mensual, en mm/día.

$f' = p(0,46 \cdot Taj + 8,13)$ valor consuntivo corregido de ALLEN y PRUITT, (1986) en mm/día.

p = Porcentaje medio diario de las horas diurnas anuales, en tanto por uno.

Taj = Temperatura media mensual del aire ajustada por ALLEN y PRUITT, (1986) en ° C.

A, B = Coeficientes de calibración climáticos FREVERT et al, (1983).

Alt = Altitud ó elevación de la estación respecto al nivel del mar.

2.2 Métodos basados en la Radiación : Este método se puede usar en aquellas zonas en las que se disponen datos referentes a la radiación (Insolación, nubosidad) y la temperatura del aire.

2.2.1 Radiación FAO (Rd-F): $ET_o = C + D \cdot W \cdot R_s$

siendo:

ET_o = Evapotranspiración de referencia media mensual, en mm/día.

C, D = Coeficientes de calibración climáticos FREVERT et al, (1983).

R_s = Radiación solar expresada en mm/día DOORENBOS y PRUITT, (1977).

2.2.2 Radiación de la Radiación Local Mensual (Rd-M) : $ET_o = C + D \cdot W \cdot R_s$

siendo:

ET_o = Evapotranspiración de referencia media mensual, en mm/día.

C, D = Coeficientes de calibración climáticos FREVERT et al, (1983).

R_s = Radiación solar en mm/día y obtenida por regresión lineal con la Insolación (n).

n = Número de horas reales de fuerte insolación.

2.3 Corrección de datos:

Como primer paso se realizó una corrección de los errores de transcripción y faltas de datos puntuales. Los errores fueron detectados por el estudio comparativo entre diversas estaciones de una misma comarca.

2.4 Interpolación de datos secundarios:

Una vez completados los datos de las series estadísticas principales se procede a la extrapolación de las variables secundarias en las estaciones en las que este dato no se ha registrado. Para ello, se tomaron una serie de estaciones cercanas, obteniéndose para cada mes y año el dato a interpolar mediante la técnica del la inversa del cuadrado de la distancia ISAACS y SRIVASTAVA, (1989).

$$X = \frac{\sum_{i=0}^{i=c} \frac{x_i}{h_i^w}}{\sum_{i=0}^{i=c} \frac{1}{h_i^w}}$$

siendo:

X= Valor de la variable secundaria (humedad, viento,..) extrapolada.

h_i = Distancia en km. de extrapolación.

x_i = Exponente de ponderación, en este caso igual a 2.

c = Número de estaciones meteorológicas utilizadas en la extrapolación.

2.5 Interpolación de ETo:

Una vez completados los datos de las series secundarias se procede al cálculo de la ETo mensualmente para cada estación y posteriormente se procede a la interpolación de estos valores obtenidos para elaborar mapas de isolíneas de evaporación SÁNCHEZ y NOGUERA , (1995).

El modelo de interpolación espacial utilizado (*Kriging*) se basa en la Teoría de las variables Regionalizadas ó Geoestadística, univariante en este caso, CUCHÍ et al, (1991). La interpolación espacial realizada con el *Kriging* es óptima en el sentido estadístico y calcula los datos interpolados por combinación lineal ponderada en los puntos muestreados BOSQUE, (1992). Para la generación de las isolíneas se ha utilizado un marco de 165 x 173 km., con una malla regular de 50 por 50 nudos con una separación de 3.4 km. aproximadamente.

3. Resultados y discusión.

Los resultados obtenidos para los cuatro métodos, se han expresado como ETo anual en mm (Fig. 2,3,4,5, 6). Con el método BC-UF se han obtenido una estimaciones de la ETo mas elevadas que con el resto de los métodos sobre todo en los meses centrales del año (Abril a Octubre), esto es debido al aumento de evaporación por efecto de la altitud de la estación. En los meses con temperaturas más bajas con el método Rd-F se obtienen, en general, valores de ETo más altos que con el método de BC-UF, sobre todo en las estaciones situadas a mayor altitud. Para los meses de Abril a Octubre, el método BC-UF da valores de ETo sensiblemente superiores (en general > 20 % , y menos marcados en los meses centrales del verano 10 a 20 %). Comparando el método BC-UF frente a Rd-F se obtiene valores mas

elevados en el primero (entre un 10 a 30 %), las variaciones obtenidas disminuyen al aumentar las altitud de la estación.

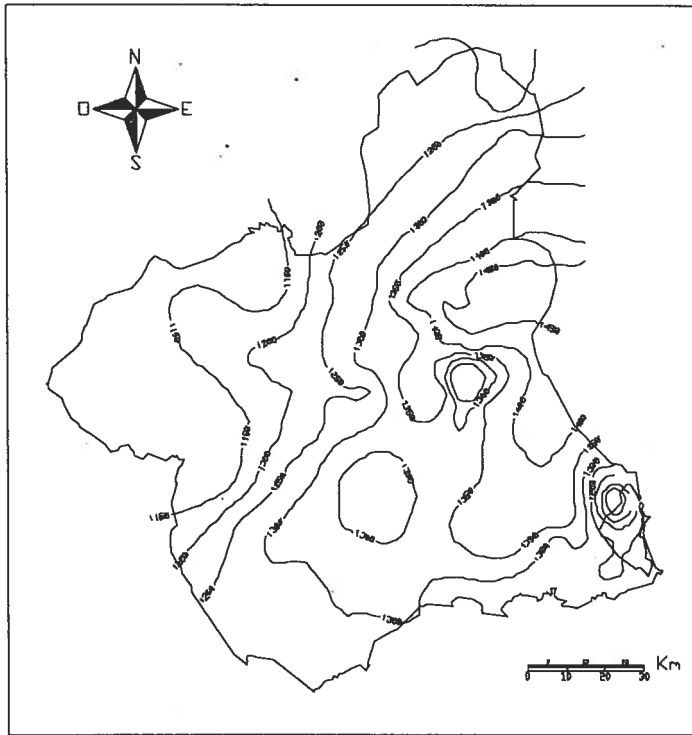


Fig. 2. Blaney-Criddle FAO (BC-F) mm/año.

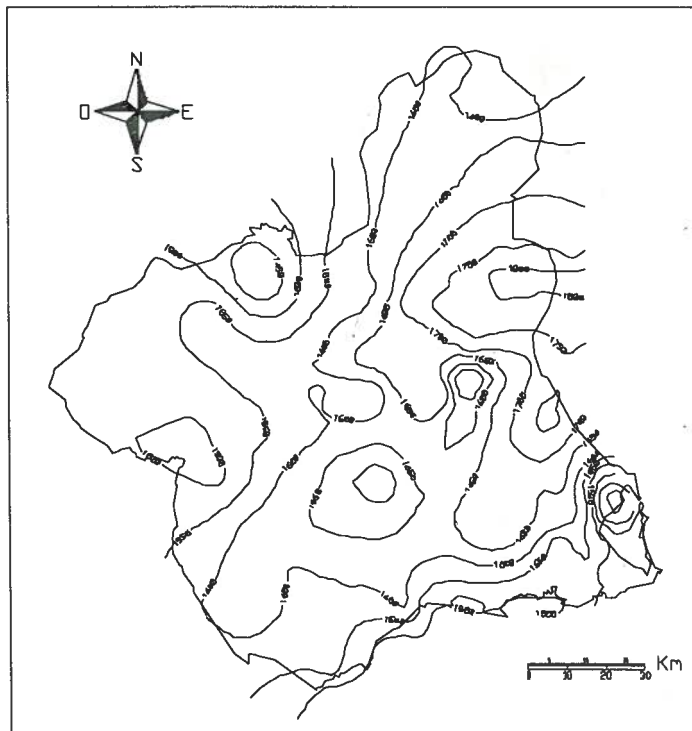


Fig. 3. Blaney-Criddle USDA-FAO (BC-UF) mm/año.

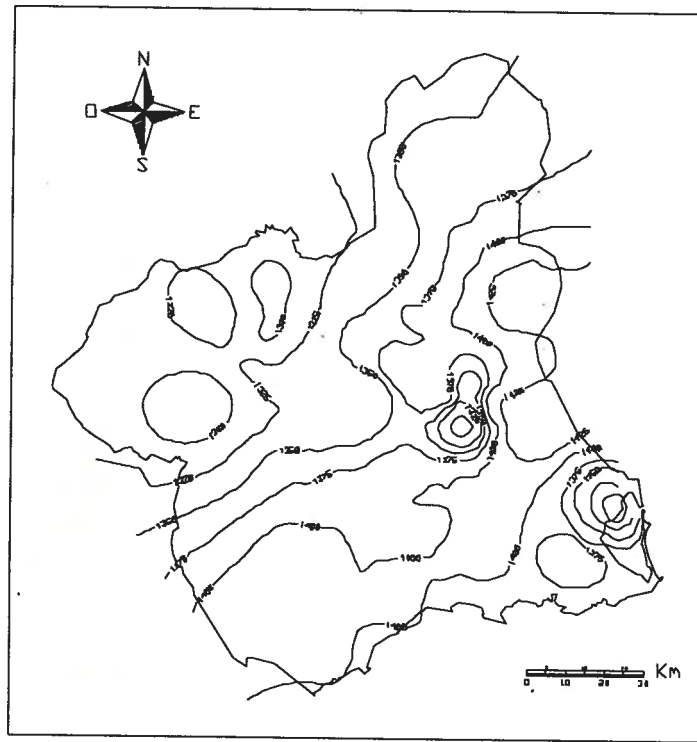


Fig. 4. Radiación FAO (Rd-F) mm/año.

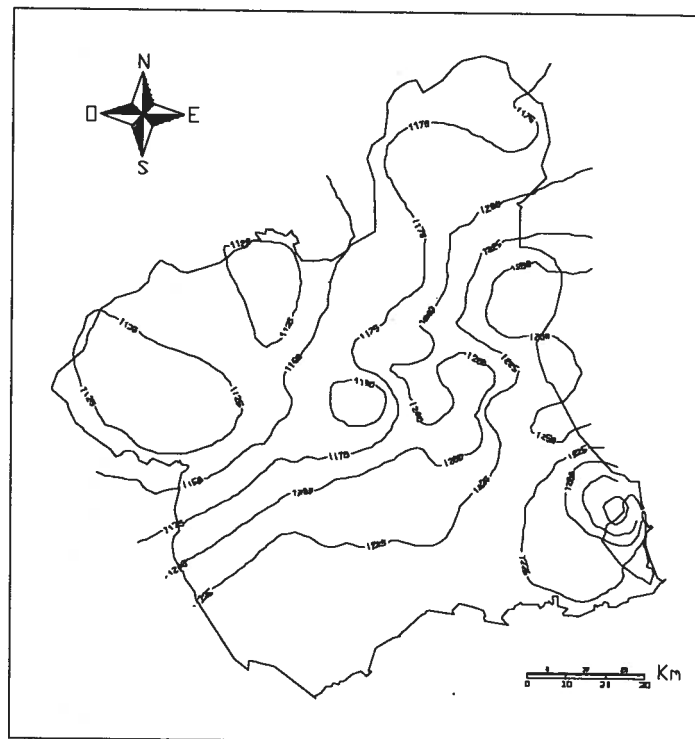


Fig. 5. Radiación Local Mensual (Rd-M) mm/año.

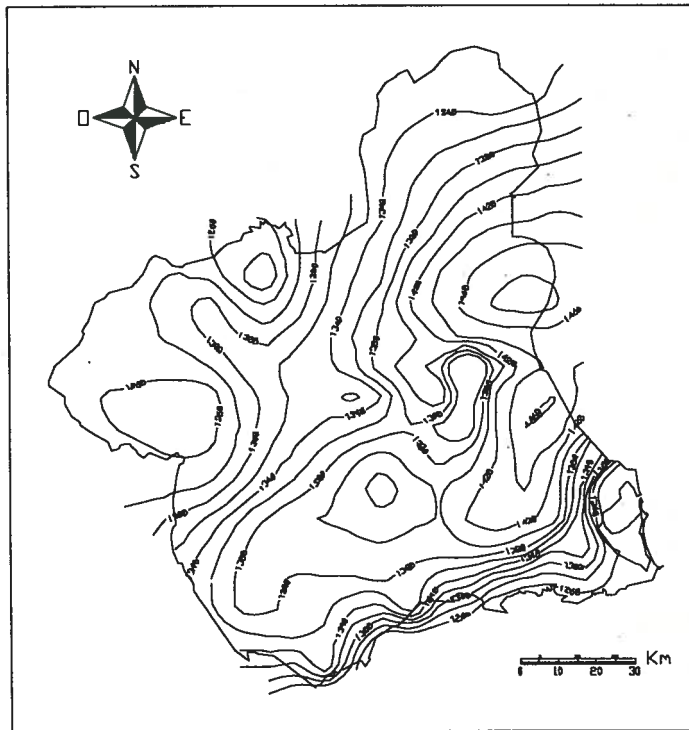


Fig. 6. Evapotranspiración de referencia media en mm/año.

Comparando numéricamente los valores obtenidos de la ETO calculada por el método de la Cubeta de CLASE A, con los métodos estudiados, se aprecia que el método BC-UF sobrevalora las estimaciones de ETO, en un porcentaje variable según el mes del año (media 37 %). En general, se puede decir también que el método de Rd-F da valores superiores al de cubeta (media de 21 %) según estaciones y mes considerado.

Con el método de Rd-F se obtiene una mayor aproximación al método de cubeta que con el BC-UF, para los meses de Abril a Octubre y similar para los restantes meses del año. En relación al método Rd-M se obtiene una mayor aproximación al método de cubeta que con los restantes métodos en los meses de Junio a Octubre, en los meses de Noviembre a Diciembre es similar a BC-F y BC-UF y algo superior al método de Rd-F.

En el cuadro siguiente se resumen las estimaciones de Eto de las estaciones mas extremas de la Región, los datos estan expresados en mm/año.

ESTACION	ALTURA	BC-UF (mm)	BC-F (mm)	RD-M (mm)	RD-F (mm)
ABANILLA	222	1796	1467	1267	1442
SAN JAVIER	2	1157	960	905	1135

4. Conclusiones.

Con los datos registrados en las Estaciones meteorológicas seleccionadas en la zona de estudio, y las estimaciones de ETO realizadas en este trabajo, se puede decir que las técnicas geoestadísticas ofrecen la posibilidad de trazar el mapa de evapotranspiración de referencia regional con bastante exactitud, ya que el método de interpolación usado (Kriging)

reproducen los datos en los puntos de medida. Si se dispusiera de valores reales de ETo medidos en un lisímetro, en algún punto de la región, se podrían calibrar y mejorar las estimaciones consiguiéndose mapas de isolíneas mas precisos.

El método BC-UF sobrevalora las estimaciones de ETo, en un porcentaje variable según el mes del año, además de ser el mas irregular de los métodos de cálculo estudiados. En general, se puede decir también que el método de Rd-F da valores superiores al de cubeta según estaciones y mes considerado, pero dá una buena aproximación para los meses de Abril a Octubre.

Por último destacar la posibilidad de obtener estos mapas en el periodo de tiempo apropiado (mensual, decenal, etc.) para una adecuada programación del riego en la región.

5. Bibliografía.

- ALLEN, R.G., PRUITT, W.O. (1986): Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(2), 139-155.
- BOSQUE J., (1992): *Sistemas de Información Geográfica*. RIALP. Madrid. 451 pp.
- BLANEY H.F., CRIDDLE W.D., (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. U.S. Dept. Agr. Soil Cons. Serv., SCS-TP96, 44 pp.
- CUCHÍ J.C et al (1991): Distribución espacial de la evapotranspiración de referencia en la zona de Lérida y Huesca. *Fruticultura Profesional*, 41, 41-56.
- CUENCA, R.H., AMEGEE, K.Y. (1987): Analysis of evapotranspiration as a regionalized variable. *Advances in Irrigation*, 4, 181-220.
- DOORENBOS, J. , PRUITT, W.O. (1977): Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation & Drainage. Paper. 24*, FAO. Roma. 144 pp.
- FREVERT, D.K., HILL, R.W., BRAATEN, B.C., (1983): Estimation of evapotranspiration coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 109 (2), 265-270.
- ISAAKS, E.H. ,SRIVASTAVA, R.M., (1989): *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 pp.
- MARTINEZ-COB A., CUENCA R.H. (1992): Influence of elevation on regional evapotranspiration using multivariate geostatistic for various climatic regimes in Oregon. *Journal of Hydrology*, 136, 353-380.
- SÁNCHEZ M.I., NOGUERA M. (1995): *Climatología e hidrología Agraria en la Región de Murcia*. Programa de Asesoramiento en Riegos. CSIC. Murcia. 242 pp.

GRUPO DE TEMAS B

HIDROLOGIA, DRENAJE Y SALINIDAD

PRESENTACIÓN ORAL

DEPURACIÓN DE PURINES DE CERDO. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE BAJO COSTE

M.A. Aguilar*(P), J. Ayuso*, F.J. Aguilar**

* Dpto. de Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba

** Dpto. de Ingeniería Rural, Universidad de Almería

RESUMEN

El presente trabajo propone una solución para los problemas ecológicos ocasionados por los vertidos incontrolados de purines de cerdo, tanto a cauces naturales como al terreno. Se trata de un sistema depurador para una pequeña granja porcina de 150 madres, situada en el término municipal de La Carlota (Córdoba), que mediante procesos físicos y biológicos, pretende reducir la contaminación de los purines y generar un efluente cuya ausencia de olores, y buenas condiciones tanto físicas como químicas, le confieran unas cualidades aptas para el riego de unas plantaciones de olivar colindantes.

Nos centraremos en el diseño del sistema y en la evaluación de los resultados obtenidos en su seguimiento donde se han alcanzado rendimientos en eliminación de DQO (demanda química de oxígeno) superiores al 90%

INTRODUCCIÓN

La gran importancia que el sector ganadero tiene en España queda patente conociendo el hecho de que el 40% de la producción final agraria se debe a la ganadería (Torres y Avellá, 1989).

El incremento de la población, unido a un mayor poder adquisitivo de la misma, ha tenido como consecuencia una mayor demanda de productos ganaderos, obligando a las explotaciones a aumentar de manera muy significativa sus producciones. Así surgen las ganaderías intensivas que abastecen las exigencias del mercado pero que rompen el equilibrio que se había dado hasta entonces entre la ganadería y la agricultura, donde el terreno agrícola que sustentaba al ganado reciclaba los residuos generados por éste usándolos como abono orgánico en su propio beneficio.

La acumulación de estiércol procedente de explotaciones ganaderas intensivas, a las que Vázquez Minguela (1991) denomina "granjas sin suelo", constituye un grave problema ecológico de contaminación medioambiental que se ve magnificado cuando se trata de un estiércol líquido, como los purines de cerdo, con el problema añadido que representa su difícil manejo y costoso almacenamiento (Rieradevall, 1992). Este aspecto se agrava si añadimos la deficiente ubicación de las granjas, muchas de ellas cercanas a núcleos de población, lo que produce un impacto ambiental considerable sobre su entorno (Rodríguez y Camarero, 1994). Hay que tener en cuenta que la producción de residuos de origen porcino en España se aproxima a la cifra de 54.160 t/día (Vázquez Minguela, 1991).

A pesar de la gran conciencia social creada en los últimos tiempos en lo referente a temas de protección medioambiental, la construcción de depuradoras de purines de cerdo en pequeñas y medianas granjas no surge hasta que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, en Septiembre de 1992, informa a los propietarios de granjas de porcino de la necesidad de instalar, como primer paso hacia una mayor depuración, una balsa-depósito de, al menos, 70 días de retención hidráulica. Al mismo tiempo, solicita la presentación del permiso de los agricultores que iban a utilizar el purín

de la balsa para riego, indicando el número de hectáreas a regar, localización de la finca y el volumen de purines aceptado.

En esta comunicación se presenta el diseño de un sistema depurador de bajo coste para purines de cerdo y a la evaluación de los resultados obtenidos durante su seguimiento. El proyecto se llevó a cabo en una granja porcina de 150 madres en explotación denominada "San Miguel", situada en el término municipal de La Carlota (Córdoba).

DISEÑO DEL SISTEMA DEPURADOR

Debido al pequeño tamaño de la explotación, que evidentemente no permite las grandes inversiones de un sistema de depuración convencional, ni por supuesto soportaría los altos costes de explotación y mantenimiento de una instalación compleja, el sistema depurador diseñado deberá tener un coste de inversión y explotación mínimo.

Teniendo en cuenta las altas cargas contaminantes que posee el estiércol líquido de cerdo, cuyas características medias para la granja San Miguel aparecen en el primer punto de muestreo de las tablas nº1 y nº2, y a pesar de que en esta granja el purín se encuentre bastante diluido por el abundante agua de limpieza utilizada, el tratamiento más adecuado resulta ser sin ninguna duda la digestión anaerobia. Este proceso biológico permite tratar altas cargas contaminantes con baja producción de fangos y malos olores si está bien diseñado.

Previo al diseño, se realizó un seguimiento periódico del caudal efluente de la granja, dando como resultado una media de 7.6 m³/día, presentando un coeficiente de variación del 40% debido a que la limpieza se realiza semanalmente. Suponiendo una media de 300 lechones en la explotación, y que 4 lechones equivalen a una cerda adulta en cuanto a producción de lisier, en la granja "San Miguel" se vierten aproximadamente 30 litros por cerda y día, superando ampliamente los 10 litros por cerda y día propuestos por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

A continuación describimos los diferentes elementos que conforman el sistema (fig.1):

1.- Filtro Decantador.

Con este primer elemento se realiza el desbaste previo donde se eliminan gran cantidad de los sólidos en suspensión que se emplean después como materia prima para la obtención de humus de lombriz. La vermicultura es una de las actividades peculiares de esta granja, permitiendo el reciclado de los residuos sólidos generados.

El filtro consiste en un canal rectangular de 3.30 m de anchura por 22.25 m de longitud y con una pendiente del 2% en el que, debido a la pequeña velocidad del agua, van decantando los elementos más groseros, a la vez que los sólidos ya decantados actúan de filtro natural para los purines entrantes. Con el objeto de permitir un buen drenaje y secado de los lodos acumulados en el filtro, se dispuso en el centro del filtro un pequeño canal en sentido longitudinal de 0.2x0.2 m, relleno de grava (2-4 cm) y cubierto por una plancha perforada de fibrocemento por donde circula el agua filtrada hacia la fase siguiente.

La anchura del filtro decantador permite la entrada de una pala cargadora para la retirada del estiércol sólido cuando este se ha acumulado en suficiente cantidad y la acción drenante del canal de desagüe junto con la evaporación superficial han conseguido reducir al máximo la humedad del

mismo. La limpieza del filtro se suele realizar mensualmente, aunque depende mucho de las necesidades de la explotación, y se extraen unos 18.5 m³/mes de los que se pueden obtener unas 30 a 40 toneladas de humus de lombriz anuales.

En épocas lluviosas o con poca radiación solar, los sólidos se extraen con una humedad excesiva para su uso en la fabricación de humus. En este caso es necesario extenderlos en el terreno para favorecer su deshidratación.

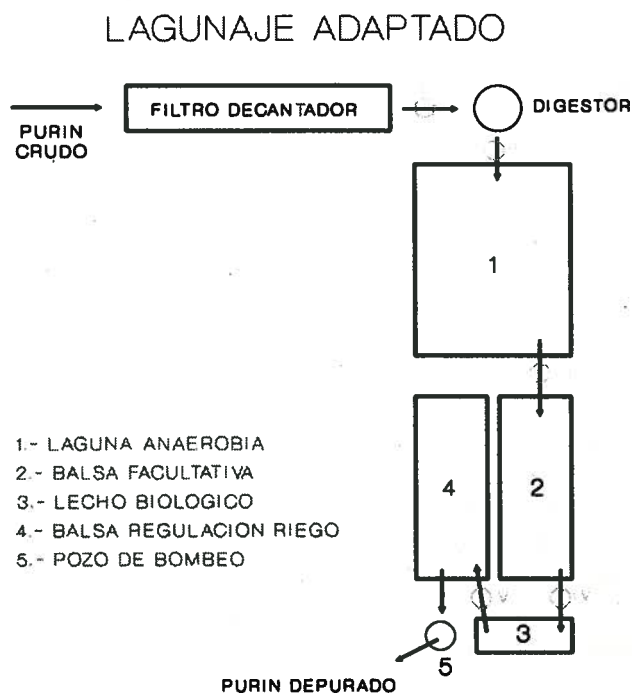


Fig. 1 Esquema del sistema depurador

2.- Digestor Anaerobio.

Como segundo elemento del sistema tenemos un depósito cilíndrico enterrado de 2.5 m de diámetro interior y 8 m de profundidad que funciona como un digestor anaerobio continuo de mezcla completa sin recuperación de biogás. No presenta sistema de control de temperatura, aunque la energía desprendida en las reacciones bioquímicas de la digestión anaerobia y el hecho de estar enterrado, hacen que conserve una temperatura apropiada para el proceso, lo cual mejora las condiciones en que trabajan los microorganismos, aumentando los rendimientos en depuración.

La entrada desde el filtro anterior se realiza en profundidad, a unos 4 metros, mediante una tubería de PVC con un diámetro de 100 mm, lo que contribuye a homogeneizar el licor de mezcla y favorecer así los procesos de digestión. La salida del digestor se lleva a cabo mediante una pieza en forma de "T" para evitar que las grasas y flotantes pasen a la siguiente fase.

El tiempo de retención hidráulica en el digestor es de aproximadamente 5 días, en los que además de la digestión y homogeneización del purín, se produce una decantación de los sólidos en suspensión

que habían pasado la fase anterior.

3.- Balsa Anaerobia.

Se trata de una balsa rectangular de 17x14 m con una profundidad útil de 4 m, resguardo de 0.5 m y talud 1/1. Su capacidad es de 500 m³ con lo que el tiempo de retención de la laguna es de aproximadamente 70 días. Es fundamental el asegurar una importante profundidad en la balsa, con lo que se pretende conseguir una total anaerobiosis (0.1-0.3 mg O₂/l) en el agua contaminada y amortiguar los cambios de temperatura ambiente. La digestión anaerobia no se produce en la balsa al mismo ritmo que en el digestor, pues las condiciones de mezcla, temperatura y carga son más desfavorables para las bacterias acidogénicas y metanogénicas encargadas de realizarla. Este hecho se ve subsanado por el amplio tiempo de retención hidráulica.

Aunque las condiciones geológicas encontradas en el terreno no lo exigían en principio (terreno arcilloso), se decidió impermeabilizar las distintas balsas del sistema depurador con una lámina de polietileno.

4.- Balsa Facultativa.

Es una balsa rectangular de 18x7 m con una profundidad útil de 1.5 m y 0.5 m de resguardo. El talud es 1/1, y también está impermeabilizada.

En esta balsa pretendemos obtener una capa aerobia en superficie, que variará de grosor con el tiempo, y una anaerobia en el fondo. La degradación de la materia orgánica se debe fundamentalmente a la acción de las bacterias heterótrofas facultativas que funcionan mejor en condiciones aerobias. Por tanto, la presencia de colonias de algas oxigena el agua mediante el proceso de fotosíntesis, aumentando la degradación de los coloides orgánicos del purín. Esta balsa facultativa, así como la de regulación de riego, tiene una capacidad de 100 m³, lo que da lugar a un tiempo de retención hidráulico de unos 15 días.

La entrada en las lagunas anaerobia y facultativa se realiza en profundidad, y las salidas mediante una "T", existiendo una arqueta entre una y otra para control y toma de muestras.

5.- Lecho Biológico.

Consiste en un foso rectangular de unos 0.5 m de altura, impermeabilizado como las balsas anteriores y con unas dimensiones de 3.70x9.5 m. Su fondo está recubierto por una capa de grava y trozos de ladrillo de 4-8 cm de diámetro por donde va circulando, a favor de pendiente, una fina película de agua de 2-4 cm procedente de la laguna facultativa. El agua es vertida por un tubo perforado para que la distribución de la misma sea lo más uniforme posible.

Se trata de un proceso biopelícula en lecho horizontal, que pretende oxigenar el agua antes de su entrada a la balsa reguladora.

6.- Balsa de regulación de riego.

Es una balsa idéntica a la facultativa, como podemos observar en la figura 1, cuya misión fundamental es la de abastecer al pozo de bombeo, sirviendo para aumentar el margen de tiempo entre

dos riegos consecutivos. Los frecuentes llenados y vaciados de esta balsa impiden la proliferación de microorganismos, por lo que su interés desde el punto de vista de eliminación de carga contaminante o nutrientes es escasa.

7.- Pozo de bombeo.

Pozo donde está instalada una bomba sumergida que permite la extracción del líquido tratado para el riego de la plantación de olivar colindante. Tiene una profundidad de 2.5 m y un diámetro de 1.45 m.

EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Para la realización del seguimiento del sistema depurador se analizaron en dos ocasiones las muestras del licor de mezcla procedente de los cinco puntos indicados en la figura 1, que se corresponden con:

- I) Salida del filtro decantador.
- II) En el digestor anaerobio.
- III) Arqueta de paso entre la laguna anaerobia y la facultativa.
- IV) Salida de la balsa facultativa.
- V) Salida del lecho biológico.

Los análisis referidos se realizaron en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Córdoba, siguiendo los métodos estándares para el análisis de aguas residuales (APHA, 1985), en los meses de Enero y Mayo de 1995. También se procedió a la medición de oxígeno disuelto y temperatura en un perfil de hasta 1 m de profundidad en los distintos elementos del sistema depurador. Para tal fin se empleó una sonda de oxígeno y temperatura modelo WTW OXI 196.

TABLA N°1.- ANALISIS DE PURINES EN DISTINTOS PUNTOS DE MUESTREO. ENERO 1995.					
Puntos de muestreo.	I	II	III	IV	V
pH	7.49	7.41	7.52	7.79	7.88
DQO total (ppm) (*)	19337	19079	1520	1729	1321
Acidez volátil (ppm)	1176	675	1243	1066	391
Alcalinidad (ppm)	5085	4322	2881	2627	2627
Carbono total (ppm)	1589	1173	1015	1051	1045
Carbono inorgánico (ppm)	531	671	545	583	664
Carbono orgánico total (ppm)	1058	502	470	468	381
Conductividad eléctrica(mmhos/cm)	5.31	5.67	5.04	4.84	5.00
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺) (ppm)	581	660	432	512	524
Fósforo (ppm)	10.6	12.2	9.4	8.5	8.6
Sólidos suspensión totales (ppm)	15688	14764	200	168	137
Sólidos suspensión minerales (ppm)	3276	3092	-	-	-
Sólidos suspensión volátiles (ppm)	12412	11672	200	168	137
Sólidos totales (ppm)	31325	16787	2593	2402	2557
Sólidos totales minerales (ppm)	6939	4541	1430	1348	1351
Sólidos totales volátiles (ppm)	24386	12246	1163	1054	1206

* Demanda Química de Oxígeno

TABLA N°2.- ANALISIS DE PURINES EN DISTINTOS PUNTOS DE MUESTREO. MAYO 1995.					
Puntos de muestreo.	I	II	III	IV	V
pH	7.96	8.02	8.07	8.06	8.25
DQO total (ppm)	89183	7126	987	967	896
Acidez volatil (ppm)	943	1086	1142	1043	770
Alcalinidad (ppm)	7268	2765	2765	2607	2686
Carbono total (ppm)	1379	953	935	869	869
Carbono inorgánico (ppm)	664	609	665	637	636
Carbono orgánico total (ppm)	715	344	270	233	233
Conductividad eléctrica(mmhos/cm)	5.33	5.47	5.69	5.72	5.6
Nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺) (ppm)	603	274	197	449	121
Fósforo (ppm)	15.26	13.47	8.16	12.34	49.75
Sólidos suspensión totales (ppm)	80000	5730	145	205	165
Sólidos suspensión minerales (ppm)	20022	1570	40	60	70
Sólidos suspensión volátiles (ppm)	59088	4160	105	145	95
Sólidos totales (ppm)	81192	7808	2412	2400	2388
Sólidos totales minerales (ppm)	20972	2536	996	1028	992
Sólidos totales volátiles (ppm)	60220	5272	1416	1372	1396

A la vista de los resultados de los análisis que se exponen en las tablas n°1 y n°2, cabe destacar los altos rendimientos en reducción de DQO obtenidos en el mes de Enero donde se alcanzó una eliminación total del 93% aún a pesar de las bajas temperaturas. En este mes el rendimiento en la laguna anaerobia fue espectacular, llegando al 92%, lo que contrasta con el 86% conseguido en la misma balsa en el mes de Mayo, en el que las temperaturas, mucho más benignas, hacían predecir mejores resultados. Probablemente no fue así debido a las grandes variaciones de caudal y carga que entran al sistema y al largo tiempo transcurrido entre la entrada y la salida del influente-efluente. Esto dificulta la comparación de análisis que no se realizan en realidad sobre la misma muestra. Por este motivo deberemos tener más en cuenta la DQO del purín tratado a la salida de la depuradora que a los rendimientos en los primeros elementos.

La eliminación de sólidos totales supera ampliamente el 90% y en sólidos en suspensión se alcanzan rendimientos cercanos al 100% en ambos muestreos. La gran mayoría de estos sólidos sedimentan en el fondo del digestor y las balsas, sufriendo un proceso de digestión anaerobia que tiene como resultado unos lodos estabilizados que pueden servir como enmienda orgánica en agricultura. La composición de lodos secos extraídos de balsas de lisier digerido (Matthey-Doret y Garmendia, 1992) se aproxima a la siguiente: 2.34% N, 2.01% P, 0.35% K y 0.3% de Na, Ca y Mg en conjunto (valores expresados sobre materia seca).

En cuanto a la eliminación de nutrientes, como fósforo y nitrógeno, no se redujeron significativamente los valores de entrada si exceptuamos el nitrógeno amoniacal en el mes de Mayo, en el que se obtuvo un rendimiento del 80%. Tenemos que tener en cuenta que en estos resultados no se reflejan las reducciones en el nitrógeno y fósforo orgánicos de los lodos sedimentados en los distintos elementos del proceso de depuración. De todas formas, al utilizar el efluente para riego, no hay posibilidades de eutrofización de ríos o lagos. Hay que tener en cuenta que estos elementos nutrientes pueden reducir o incluso eliminar la necesidad de fertilización mineral.

Centrándonos en los ácidos volátiles y la alcalinidad, según el Manual of Practice de la Water Pollution Control Federation, cuando la relación entre la acidez volatil y la alcalinidad total (alcalinidad al bicarbonato+ácidos grasos volátiles) sobrepasa el valor de 0.3-0.4, la digestión anaerobia no se realiza correctamente. Esto suele ocurrir cuando las sobrecargas orgánicas,

variaciones de temperatura o la existencia de tóxicos, afectan a las bacterias acetogénicas y metanogénicas, que son las encargadas de transformar los ácidos volátiles a ácido acético y metano respectivamente, por lo que se produce una bajada en los niveles de depuración. En nuestro caso esta relación se acerca a 0.3 en el digestor y en la laguna anaerobia, con lo que estamos dentro de los límites expuestos anteriormente.

En lo que se refiere a las medidas de O_2 disuelto, podemos destacar que en épocas frías en las que las algas eran inexistentes se apreciaba la casi total ausencia de oxígeno en todos los elementos de la depuradora (tabla nº3). En épocas cálidas, con abundante presencia de algas en la balsa facultativa, se midieron concentraciones de oxígeno disuelto de hasta 6.2 mg/l, aunque sólo en los primeros 10 cm de profundidad. Dada la alta carga de DQO a la entrada de la balsa facultativa (1000 a 1500 mg/l), lo que significa una DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días) de aproximadamente la mitad (Alvarez de Arcaya et al., 1994), observamos como el ratio de carga superficial en la balsa facultativa alcanza valores de 360 Kg DBO_5 /ha/día, muy superior a los valores recomendados por Middlebrooks (1982) de 90 Kg DBO_5 /ha/día.

Durante los primeros meses de funcionamiento de la depuradora (Noviembre y Diciembre de 1994) el lecho biológico presentaba un aspecto adecuado, con una capa blanquecina grisácea de bacterias adheridas a las piedras. Sin embargo, y debido a las continuas inundaciones ocasionadas por un mal manejo general, la biopelícula no disponía del oxígeno necesario para su desarrollo y se desprendía, haciendo que los rendimientos obtenidos fueran muy pequeños. Pensamos que con un buen manejo, y aumentando la longitud del lecho se podrían obtener efluentes más clarificados y oxigenados, eliminando malos olores residuales.

Las características analíticas del efluente depurado son indicadas para su uso como agua de riego en olivar, siendo la salinidad uno de los aspectos más restrictivos. La conductividad eléctrica a la salida se cifra en 5-5.5 mmhos/cm. Teniendo en cuenta que olivares regados con aguas de 4.9 mmhos/cm a dosis de 300 mm/ha/año en la Estación Experimental de Ksar Ghériss (Túnez) no presentaron acumulación de sales en el suelo, y que el olivo es un árbol resistente a la salinidad, el efluente depurado del sistema parece estar indicado para el riego de este cultivo.

Las necesidades de riego en olivar son relativamente bajas, obteniéndose unos buenos resultados en Andalucía con aportaciones comprendidas entre 150 y 250 mm anuales (Pastor y Orgaz, 1994). La concentración media de NH_4^+ en el efluente depurado se sitúa alrededor de 300 mg/l, y para el caso de las parcelas colindantes a la explotación, con olivos en marco 9x9 m, proponemos el aporte de unos 40 mm de purín tratado por año. Con esta dosis estaríamos aportando aproximadamente 1 kg de nitrógeno por árbol, lo que estaría de acuerdo con las recomendaciones de Fernández Escobar, (1994), y no excediendo los 170 kg de nitrógeno por hectárea, límite establecido por la Comunidad Económica Europea para evitar la lixiviación de nitrógeno hacia los acuíferos. El resto, hasta 200 mm, se aportaría como agua de pozo en nuestro caso, lavándose así los posibles excesos de sales acumuladas en el terreno. En los olivares regados con el purín depurado se han obtenido aumentos de cosecha muy significativos, llegándose en algunas parcelas a superarse el techo productivo de las últimas 30 campañas.

Los costes de inversión del sistema propuesto, considerando un buen nivel de acabado (cercado perimetral, setos, impermeabilización, jardinería, etc...), rondan las 328.000 pts/m³/día, cifra muy inferior al coste de sistemas de aireación prolongada cuya inversión se aproxima a 1.500.000-2.000.000 pts/m³/día. Los costes de explotación y mantenimiento no llegan a 0,5 pts/litro, cifra totalmente asumible por estas pequeñas explotaciones, sobre todo teniendo en cuenta los beneficios reportados por su reutilización.

CONCLUSIONES

El sistema para la depuración del purín de cerdo descrito en la presente comunicación se adapta muy bien a nuestro clima, obteniéndose altos rendimientos en eliminación de DQO y sólidos, totales y en suspensión, con unos costes económicos de inversión, explotación y mantenimiento asequibles para pequeñas granjas. El reciclado, tanto del estiércol sólido como líquido (producción de humus y riego fertilizante), mejora los resultados económicos de la explotación, a la vez que minimiza el impacto ambiental de este tipo de granjas en el entorno.

La aparición y desaparición de algas se producía en cortos períodos de tiempo, lo que atribuimos a la alta sensibilidad de las mismas a altas cargas orgánicas puntuales. La superficie ocupada por la balsa facultativa debe aumentarse para mejorar los rendimientos y aumentar el perfil aerobio de la misma, atendiendo a las fuertes cargas orgánicas de entrada.

AGRADECIMIENTOS al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Córdoba, y en especial al Profesor Antonio Martín por su generosa colaboración en el capítulo de análisis químicos presentados en esta comunicación.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ DE ARCAJA, J.M., URBANO, C., LÓPEZ DE MUNÁIN, B., 1994. "Gestión y tratamiento de residuos porcinos en la Comunidad Autónoma Vasca". III Congreso Internacional de Química de la ANQUE. Puerto de la Cruz. Tenerife. Pág. 251-258.
- APHA, 1985. "Standard methods of the examination of water and wastewater". 15 th ed. American Public Assotiation.
- FERNÁNDEZ ESCOBAR, R., 1994. "Fertilización del olivar". Jornadas Técnicas sobre Olivicultura. Ed. Fundación La Caixa y Agrolatino S.L. Pág. 55-63.
- MATTHEY-DORET, D., GARMENDIA, M., 1992. "Tratamiento integral de los purines de cerdo". Feria Universal Ganadera '92 de Salamanca.
- MIDDLEBROOKS, E.J., MIDDLEBROOKS, C.H., REYNOLDS, J.H., WATERS, G., REED, S., GEORGE, D.B., 1982. "Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance, and Upgrading". McMillan Publishing Co. New York.
- PASTOR, M., ORGAZ, F., 1994. "Riego deficitario en olivar". Agricultura nº 746. Pág. 768-776.
- RIERADEVALL PONS, J., 1992. "Digestión anaerobia de residuos en zonas rurales. Estado actual y perspectivas". Tecnología del Agua nº92. Pág. 24-31.
- RODRIGUEZ, A., CAMARERO, L., 1994. "Diseño de un sistema de tratamiento anaerobio a escala piloto para fracciones sólidas de efluentes porcinos". III Congreso Internacional de Química de la ANQUE. Puerto de la Cruz, Tenerife. Pág. 335-345.
- TORRES, A., AVELLÁ, LL., 1989. "La Ganadería en la C.E.E., España y la Comunidad Valenciana: Situación General". Ed. Conselleria de Agricultura y pesca. Generalitat Valenciana.
- VÁZQUEZ MINGUELA, J., 1991. "Tratamiento de residuos ganaderos". Máquinas y Tractores Agrícolas nº4. Pág. 68-75.
- WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, 1987. "Anaerobic Sludge Digestion". Manual of Practice nº16. Second Edition.

ESTUDIO DE FLUJOS EN PLANTAS DE DESALACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA.

Cánovas Cuenca, Juan (P)

RESUMEN

En este trabajo se analizan los criterios empleados en el diseño de plantas desaladoras por ósmosis inversa para determinar la composición de la salmuera a partir del análisis del agua de alimentación y del recobro de la planta.

ABSTRACT

In this paper, we study the criteria usually applied to infer the composition of brine streams, at RO desalting plants, on the basis of experimental data. We find a closed relation between the brine composition calculated from the feed streams and those obtained analyzing the chemical composition of brine streams.

1.- INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS

El diseño de plantas de ósmosis inversa de aguas salobres consiste, en parte, en conseguir la mayor tasa de recuperación de agua producto con el menor riesgo de precipitación de sales poco solubles en las membranas. Ambos son efectos antagónicos, pues una elevada tasa de recuperación implica trabajar con salmueras, sobre todo en la segunda etapa, de altos valores de fuerza iónica y elevada concentración de iones tales como sulfato, calcio y magnesio, es decir con alto riesgo de precipitación.

El proyectista ha de resolver este problema utilizando la información que le proporciona el análisis del agua objeto de desalación y unos criterios, avalados por la práctica, cuya prudente aplicación le permiten inferir la composición de la salmuera o flujo donde reside el peligro de precipitación de sales. Una vez estimada la composición de la salmuera podrá disponer las medidas necesarias para evitar este riesgo. De la bondad de esta estimación depende el funcionamiento y duración de la planta. Por ello, conviene comprobar los criterios que se emplean en ese proceso lógico a fin de buscar su sanción por la realidad.

Para determinar la composición de la salmuera se admite tradicionalmente que:

- a) Su temperatura es igual a la del agua de alimentación.
- b) Su fuerza iónica (FI) es mayor que la del agua de alimentación tantas veces cuantas indica el valor del factor de concentración (FC).
- c) Su concentración de constituyentes es mayor que la correspondiente al agua de alimentación tantas veces cuantas indica el factor de concentración (FC). En principio, se excluye de esta regla el ión bicarbonato, pues su paso a través de las membranas depende en gran medida del valor del pH; sin embargo, la acidificación que habitualmente se practica hace que este efecto no se deje sentir con demasiada intensidad.

DOCTOR INGENIERO AGRÓNOMO JEFE DEPARTAMENTO DESARROLLO TÉCNICAS DE DESALACIÓN.
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE, AGRICULTURA Y AGUA (MURCIA)

d) Su contenido en CO₂ es similar al del agua de alimentación.

En este trabajo pretendemos estudiar la fiabilidad de estos criterios en plantas de ósmosis inversa, con membranas de poliamida aromática.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

Se parte de los datos analíticos correspondientes a los flujos que intervienen en seis plantas desaladoras de ósmosis inversa con membranas de poliamida aromática, cuyas características son :

Planta 1.- Situada en el Campo de Cartagena, Finca El Arquillo. Producción : 500 m³/día de agua desalada. Recuperación : 75 %. Rechazo : 25 %. FC : 4. Diseño e instalación : LUKAP, S.A.

Planta 2.- Situada en el Campo de Cartagena, Finca Las Monjas. Producción : 2.000 m³/día de agua desalada. Recuperación : 75 %. Rechazo : 25 %. FC : 4. Diseño e instalación : LUKAP, S.A.

Planta 3.- Situada en Mazarrón, finca DURAN. Producción: 1.650 m³/día de agua desalada. Recuperación : 63 %. Rechazo: 37 %. FC : 2,70. Diseño e instalación : LUKAP, S.A.

Planta 4.- Situada en Mazarrón, Comunidad de Regantes. Producción : 13.500 m³/día de agua desalada. Recuperación : 71 %. Rechazo : 29 %. FC : 3,45. Diseño e instalación SADYT.

Planta 5.- Situada en el Campo de Cartagena, La Palma. Producción : 1.750 m³/día. Recuperación : 71 %. Rechazo: 29 %. FC : 3,45. Diseño e instalación : SADYT.

Planta 6.- Situada en Sagunto, Siderurgia del Mediterráneo. Producción : 750 m³/día de agua desalada. Recuperación : 68 %. Diseño e instalación : SADYT.

Todas las plantas son alimentadas con aguas procedentes de acuíferos subterráneos.

A partir de estos datos se han calculado los factores de rechazo de las distintas plantas desaladoras (FC) y de los componentes de cada flujo. El factor de concentración se calculó aplicando la siguiente fórmula :

$$FC = 1 / (1 - Y)$$

en la que :

- FC = Factor de concentración.
- Y = Tasa de recuperación de la planta, expresada en tanto por uno.

Después, se han aplicado los criterios antes enunciados para establecer la composición de la salmuera y finalmente se ha estudiado la concordancia entre los datos empíricos y los inferidos a partir de esos criterios.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3 muestran los datos correspondientes a los flujos de alimentación, de permeado y de salmueras de estas plantas, incluyendo la fuerza iónica (FI).

La Tabla 4 muestra los valores de los factores de concentración (FC) de las plantas estudiadas. Además, se ha calculado el factor de concentración de cada uno de los constituyentes y de la fuerza iónica como cociente entre los valores reales correspondientes en la salmuera y el agua de alimentación.

La Tabla 5 muestra los valores estimados de la composición de la salmuera calculados multiplicando el factor de concentración de la planta y los correspondientes contenidos del agua de alimentación. Los datos en cursiva corresponden a los valores reales de la Tabla 3.

Tabla 1

Composición de las aguas de alimentación de las plantas desaladoras consideradas en este trabajo

ÍNDICES	PLANTAS					
	1	2	3	4	5	6
pH	7,60	6,99	6,60	7,10	7,55	7,60
SDT	3.656,4	4.810,5	5.905,3	7.097,0	5.715,0	1.455,0
Ca ⁺⁺	286,0	276,6	400,8	465,0	312,0	243,0
Mg ⁺⁺	229,0	233,5	330,8	363,0	232,0	66,0
Na ⁺	590,0	1.068,9	878,1	1.422,0	795,0	50,0
K ⁺	10,0	15,0	87,4	52,0	56,0	3,9
Cl ⁻	1.024,0	1.578,3	1.474,7	1.737,0	1.476,0	110,3
SO ₄ ⁼	1.252,0	980,9	551,9	2.314,0	1.249,0	456,0
CO ₃ ⁼	-----	-----	-----	-----	-----	-----
CO ₃ H ⁻	250,0	384,4	2.160,4	414,0	266,0	311,8
NO ₃ ⁻	5,0	62,0	2,7	298,0	-----	135,0
SiO ₂	10,0	30,8	72,5	32,0	-----	-----
FI	0,09	0,11	0,12	0,16	0,10	0,03

NOTA: Las concentraciones se expresan en p.p.m., la fuerza iónica en moles por 1.000 g. de agua.

Tabla 2

Composición de los permeados de las plantas desaladoras consideradas en este trabajo

ÍNDICES	PLANTAS					
	1	2	3	4	5	6
pH	5,10	5,27	5,50	5,60	6,20	5,90
SDT	36,9	119,5	387,3	123,0	73,0	22,3
Ca ⁺⁺	1,1	2,0	25,0	8,0	1,7	2,5
Mg ⁺⁺	0,9	1,7	20,65	6,0	1,3	0,7
Na ⁺	10,6	36,9	54,81	23,0	21,1	2,4
K ⁺	0,2	0,6	11,4	2,0	1,9	0,2
Cl ⁻	14,9	47,1	100,3	36,0	30,6	1,2
SO ₄ ⁼	4,4	6,9	21,1	27,0	6,5	1,3
CO ₃ ⁼	-----	-----	-----	-----	-----	-----
CO ₃ H ⁻	4,4	15,8	143,3	8,5	9,8	6,3
NO ₃ ⁻	0,4	8,0	0,4	13,0	-----	7,7
SiO ₂	0,1	0,4	10,3	1,0	-----	-----
FI	0,0007	0,002	0,007	0,0026	0,0013	0,0005

NOTA: Las concentraciones se expresan en p.p.m., la fuerza iónica en moles por 1.000 g. de agua.

Tabla 3

Composición de las salmueras de las plantas desaladoras consideradas en este trabajo

ÍNDICES	PLANTAS					
	1	2	3	4	5	6
pH	7,29	7,08	6,80	7,50	8,10	8,10
SDT	14.390,3	18.784,9	16.190,8	26.054,0	15.478,0	4.536,0
Ca ⁺⁺	1.140,8	1.100,3	1.101,2	1.565,0	1.110,0	804,0
Mg ⁺⁺	913,4	928,9	908,9	1.221,0	825,0	218,0
Na ⁺	2.328,3	4.164,6	2.412,6	4.785,0	2.785,0	161,0
K ⁺	39,3	58,1	229,0	175,0	195,0	12,5
Cl ⁻	4.223,4	6.891,9	4.036,5	5.844,0	5.192,0	365,0
SO ₄ ⁼	4.994,8	4.270,9	1.541,3	7.786,0	4.444,0	1.517,0
CO ₃ ⁼	-----	-----	-----	-----	-----	-----
CO ₃ H ⁻	691,4	1.024,2	5.765,6	1.393,0	924,0	1.025,0
NO ₃ ⁻	18,9	223,9	7,0	1.003,0	-----	432,0
SiO ₂	39,8	121,9	188,6	107,0	-----	-----
FI	0,35	0,43	0,33	0,56	0,37	0,11

NOTA: Las concentraciones se expresan en p.p.m., la fuerza iónica en moles por 1.000 g. de agua.

Para cada planta se ha estudiado la concordancia entre el factor de concentración (FC), el de los sólidos totales disueltos (STD) y el correspondiente a los siguientes constituyentes: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^- , CO_3H^- , NO_3^- , SiO_2 y FI. En cada caso, el valor de χ^2 fundamenta, al nivel del 99 % de probabilidad, la bondad de la equivalencia estadística entre el factor de concentración (FC) de la planta y el de los componentes estudiados, calculado mediante división entre la concentración en la salmuera y la correspondiente en el agua de alimentación. En consecuencia, para inferir, en primera aproximación, los contenidos de los iones en la salmuera puede ser suficiente con multiplicar su concentración en el agua de alimentación por el factor de concentración (FC) calculado de la planta. A partir de estos datos se puede estimar el valor del índice del Langelier a los efectos de prevención del riesgo de precipitación de carbonatos; y, también, el riesgo de precipitación de sulfatos teniendo en cuenta la fuerza iónica de la disolución y la constante de solubilidad para cada temperatura.

Desde el punto de vista agronómico no se han determinado, por irrelevantes, los índices de calidad del agua de alimentación y de la salmuera o rechazo. Su estudio en el agua producto muestra la bondad de la misma, bondad que podríamos calificar de excesiva debido al bajo contenido de sales, lo que justifica su mezcla con aguas de inferior calidad a fin de obtener una agronómicamente idónea para el cultivo de que se trate.

Tabla 4

Factores de Concentración de los componentes del agua en las plantas objeto de este trabajo

ÍNDICES	PLANTAS						% CV
	1	2	3	4	5	6	
FC	4,00	4,00	2,70	3,45	3,45	3,12	14,64
SDT	3,93	3,90	2,74	3,36	3,53	3,05	13,75
Ca^{++}	3,99	3,97	2,74	3,37	3,56	3,31	13,46
Mg^{++}	3,99	3,97	2,74	3,36	3,56	3,30	13,46
Na^+	3,95	3,89	2,74	3,36	3,50	3,22	13,05
K^+	3,93	3,87	2,62	3,37	3,48	3,21	14,06
Cl^-	4,12	3,92	2,73	3,39	3,52	3,31	14,01
SO_4^-	3,98	4,35	2,79	3,36	3,56	3,33	15,31
CO_3^-	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
CO_3H^-	2,76	2,66	2,67	3,36	3,47	3,29	12,41
NO_3^-	3,78	3,61	2,60	3,37	-----	3,20	13,76
SiO_2	3,98	3,95	2,60	3,34	-----	-----	18,72
FI	3,89	3,90	2,75	3,44	3,70	3,66	11,99
% CV	9,19	10,53	2,37	1,00	2,00	4,83	

Tabla 5

Composición calculada de las aguas salmueras de las plantas desaladoras consideradas en este trabajo

ÍNDICES	PLANTAS					
	1	2	3	4	5	6
SDT	14.625,6	19.242,0	15.944,3	24.484,6	19.716,7	4.546,8
(SDT	14.390,3	18.784,9	16.190,8	26.054,0	15.478,0	4.536,0)
Ca ⁺⁺	1.144,0	1.106,4	1.082,2	1.604,3	1.076,4	759,4
(Ca ⁺⁺	1.140,8	1.100,3	1.101,2	1.565,0	1.110,0	804,0)
Mg ⁺⁺	916,0	934,0	893,2	1.252,4	800,4	206,3
(Mg ⁺⁺	913,4	928,9	908,9	1.221,0	825,0	218,0)
Na ⁺	2.360,0	4.275,6	2.370,9	4.905,9	2.742,7	156,3
(Na ⁺	2.328,3	4.164,6	2.412,6	4.785,0	2.785,0	161,0)
K ⁺	40,0	60,0	236,0	179,4	193,2	12,2
(K ⁺	39,3	58,1	229,0	175,0	195,0	12,5)
Cl ⁻	4.096,0	6.313,2	3.981,7	5.992,6	5.092,2	344,7
(Cl ⁻	4.223,4	6.891,9	4.036,5	5.844,0	5.192,0	365,0)
SO ₄ ⁼	5.008,0	3.923,6	1.490,1	7.983,3	4.309,1	1.425,0
(SO ₄ ⁼	4.994,8	4.270,9	1.541,3	7.786,0	4.444,0	1.517,0)
CO ₃ ⁼	-----	-----	-----	-----	-----	-----
CO ₃ H ⁻	1.000,0	1.537,6	5.833,1	1.428,3	917,7	974,4
(CO ₃ H ⁻	691,4	1.024,2	5.765,6	1.393,0	924,0	1.025,0)
NO ₃ ⁻	20,0	248,0	7,3	1.028,1	-----	421,9
(NO ₃ ⁻	18,9	223,9	7,0	1.003,0	-----	432,0)
SiO ₂	40,0	123,2	195,8	110,4	-----	-----
(SiO ₂	39,8	121,9	188,6	107,0	-----	-----)
FI	0,36	0,44	0,32	0,55	0,35	0,09
(FI	0,35	0,43	0,33	0,56	0,37	0,11)

NOTA: Las concentraciones se expresan en p.p.m., la fuerza iónica en moles por 1.000 g. de agua.

4.- CONCLUSIONES

El presente estudio confirma, con datos reales, lo que es criterio habitual en los proyectos de desaladoras por ósmosis inversa: que se puede deducir la composición de las salmueras a partir de dos informaciones básicas; la primera es el valor del porcentaje de recuperación que se quiere conseguir y el segundo es el análisis del agua de alimentación. Conocidos estos datos, se puede determinar la concentración de iones en la salmuera y la fuerza iónica multiplicando el factor de concentración (FC) de la planta por la concentración de cada uno de ellos en el agua de alimentación.

Una vez practicada esta inferencia, procede diseñar las medidas preventivas de la precipitación de carbonatos; para ello se determina el índice de Langelier y posteriormente la dosis necesaria de ácido que mantenga el pH por debajo del valor de precipitación. Además, la comparación del producto de solubilidad del sulfato de calcio, o de otros cationes, en la salmuera con el valor de saturación de esta constante, para la temperatura a que opere la planta y la correspondiente fuerza iónica, permitirán optimizar el diseño de la planta en lo que a la recuperación se refiere.

5.- BIBLIOGRAFÍA

BLANCO MAYO, B. 1993. La ósmosis inversa aplicada al tratamiento de aguas. Astramátics, S.A. Barcelona.

DAVID, H.P. 1992. Understanding Water Chemistry. Part. 2. The International Desalination & Water Reuse, Vol. 2, Quarterly 1, pág. 49-54. USA.

E.I. DU PONT DE NEMOURS & Co. 1982. Permasep Products Manual. USA.

RECONOCIMIENTOS

El autor agradece a las empresas LUKPA, TRATAMIENTO DE AGUA, S.A. y SADYT, S.A., la información facilitada para la realización de este trabajo.

Torre Pacheco, marzo, 1996.

EFFECTO DEL CLORURO SÓDICO SOBRE LA EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN AVELLANO (*Corylus avellana* L)

Alegre, S. (P), Girona, J. y Mata, M.¹

Resumen:

Para estudiar el efecto del NaCl sobre el avellano (*Corylus avellana* L) y comprobar si existían diferencias en la eficiencia en el uso del agua, se aplicaron 4 concentraciones de NaCl en el agua de riego (1.5, 4, 11 y 30 mM) a plántulas de avellano cv. "Pauetet", cultivadas en macetas y en condiciones de invernadero. El aumento de NaCl en el agua de riego provocó un menor consumo de agua, una menor acumulación de materia seca en las diferentes partes de la plántula, así como una disminución en la eficiencia en el uso del agua. Esta pérdida de eficiencia podría estar relacionada con la necrosis foliar y/o con una limitación de la capacidad de fijación de CO₂ debida a la masiva acumulación de Cl⁻ en las hojas.

Summary:

To study the effects of NaCl on hazelnut (*Corylus avellana* L) and to verify if there were differences in water use efficiency, 4 levels of NaCl (1.5, 4, 11 y 30 mM) were applied in the irrigation water, to potted hazelnut seedlings cv. "Pauetet", grown under greenhouse conditions. Higher rates of NaCl in the irrigation water reduced water consumption and a very low dry weight accumulation was observed in the different parts of the seedlings, therefore water use efficiency went down. This water use efficiency drop could be related with foliar necrosis and/or limitation of CO₂ fixation capacity due to the high accumulation of Cl⁻ in the leaves.

1. Introducción

El déficit hídrico que caracteriza al área mediterránea ha obligado, en la práctica agrícola, a la utilización de un amplio tipo de suministros hídricos para satisfacer los requerimientos mínimos de los cultivos. Estas fuentes son en muchas ocasiones de baja calidad, llegando a utilizarse aguas residuales o con elevados contenidos de sales en disolución.

El avellano (*Corylus avellana* L) es, por su extensión e importancia, uno de los principales cultivos del Camp de Tarragona. Es una especie sensible a la presencia de sales en el agua de riego (Girona y Mata 1987; Girona, 1990). El NaCl provoca la aparición de necrosis foliar en avellano, más relacionada con la acumulación de Cl⁻ a nivel foliar que a la de Na⁺, ion al que el avellano se ha mostrado bastante tolerante (Girona y Mata, 1987).

Si bien parece demostrada la sensibilidad del avellano a la salinidad, así como la relación entre la acumulación de cloruros en hoja y la aparición de necrosis foliar, no se ha realizado ningún tipo de estudio que permita discernir su influencia sobre los factores estomáticos y no estomáticos que afectan a la capacidad fotosintética del avellano.

¹ Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA).
Àrea de Tecnologia Frutícola. Centre UdL-IRTA.
Alcalde Rovira Roure, 177. 25189 Lleida.

El objetivo del presente trabajo es estudiar los efectos de la toxicidad del NaCl en avellano, ya sea por su efecto sobre la acumulación-elaboración de sustancias de reserva y/o sobre la eficiencia en el uso del agua.

2. Materiales y Métodos

En el planteamiento del trabajo experimental se siguió la metodología descrita por *Girona (1990)*, basada en la utilización de plántulas como primer paso para caracterizar el estrés salino.

Se partió de semillas germinadas de la variedad "Pauetet" que se trasladaron a macetas de PVC de 0,14 m de diámetro ($1,2 \times 10^{-3} \text{m}^3$) con sustrato mezcla de arena, turba, perlita y tierra (2:3:1:3 v/v). Durante la fase previa al experimento se regaron con agua corriente ($0,3 \text{ dSm}^{-1}$), y a los 2 meses se inició el ensayo con la aplicación de 4 tratamientos de NaCl en el agua de riego: 1,5, 4, 11 y 30 mM. El ensayo se inició el 4/5/1994 y se consideró finalizado el día 3/8/1994.

Las plántulas se colocaron en mesas de 1 m de altura en condiciones de invernadero (temperatura media $26 \pm 3^\circ\text{C}$, humedad relativa elevada y niveles de radiación sobre los $400 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Las concentraciones de NaCl en el agua de riego se ajustaron incrementando la concentración de cloruros del agua de partida (la disponible en el invernadero) con NaCl hasta la concentración deseada. Las plántulas se regaron individualmente con las respectivas soluciones en función del contenido en humedad del sustrato (mínimo 3 riegos semanales a los que se le añadió solución nutritiva). El riego se aplicó manualmente y sin mojar las hojas, para evitar así posibles acumulaciones de iones por absorción foliar (*Maas, 1985*). Se aplicaron dosis de agua en exceso para asegurar el lavado de las sales y obtener así una diferencia mínima entre la concentración de sales en la solución del sustrato y la del tratamiento.

El diseño experimental se ajustó en base a un modelo en bloques al azar, con 4 bloques que correspondían a las diferentes fases de crecimiento de las plántulas en el momento de iniciar el ensayo. Se utilizaron 20 plántulas por parcela elemental, con un total de 320 plántulas experimentales (20 plántulas por parcela elemental, 4 tratamientos y 4 repeticiones).

Se determinó semanalmente el consumo de agua en las macetas por método gravimétrico, pesándolas 2 horas después de un riego (tiempo suficiente para permitir el drenaje) y volviéndolas a pesar a los dos días. Se calculó el consumo de agua por la diferencia de pesos (*Burger et al., 1987*).

Mediante un equipo IRGA portátil (Analytical Development Co. Mod. LA-2) se determinaron los valores de asimilación neta de CO_2 , concentración de CO_2 en la cámara subestomática, conductancia estomática al vapor de agua y transpiración de las hojas, utilizando para los cálculos las ecuaciones descritas por *von Caemmerer y Farquhar (1981)*. Las determinaciones se realizaron en hojas maduras y totalmente iluminadas, en dos hojas por plántula y diez plántulas por tratamiento, los días 6/5, 27/5, 10/6, 5/7 y 2/8. Las mediciones se realizaron en el exterior del invernadero para asegurar la saturación lumínica de las hojas y reducir el error debido a diferentes niveles de radiación, procediendo a la medición transcurridos 10 minutos de exposición. Todas las mediciones se realizaron entre las 10 y las 12 hora solar.

Al final del ensayo se midieron varios parámetros relacionados con la superficie foliar: el número de hojas por plántula, área foliar de las hojas y porcentaje de necrosis (Leopold y Willing, 1984). Para la determinación del área de las hojas se utilizó un medidor de superficie (ΔT Area Meter, Delta-T Devices.), mientras que el porcentaje de necrosis se determinó visualmente por semejanza a una escala lineal de porcentajes del 0 al 100% en intervalos del 5%.

Para la determinación del peso seco de cada parte de la plántula, se separó la raíz, el tallo y las hojas de cada una y se secaron en estufa a 45°C hasta peso constante.

Se analizaron los contenidos de Na^+ , Cl^- y K^+ en una muestra conjunta por tratamiento de hojas, tallo y raíces. Se utilizó la fotometría de llama (Flame Photometer PFP7. Scharlau Science) para la determinación de los contenidos de Na^+ y K^+ según los métodos descritos por Pinta (1973) y el MAPA (1975), mientras que el contenido del ion Cl^- se determinó mediante un electrodo selectivo (Crison Instruments).

Para el análisis de los datos se utilizó el paquete estadístico SAS (1988) en las versiones de 1993 para SAS-PC y de 1995 para SAS-Windows.

3. Resultados y discusión

El consumo acumulado de agua por maceta disminuyó a medida que aumentaba la salinidad, llegándose a reducciones de hasta el 30 % en el tratamiento de mayor salinidad (fig. 1).

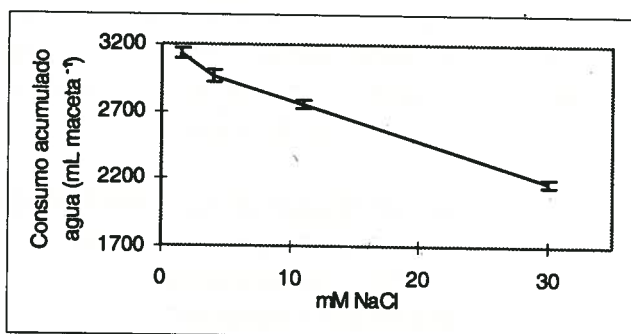


Figura 1- Relación entre el consumo acumulado de agua por maceta y la concentración de NaCl en el agua de riego, en plántulas de avellano. Cada punto representa la media de 80 observaciones \pm error estándar.

Se observó una tendencia a disminuir el número de hojas y tamaño medio de las hojas conforme aumentaba la salinidad. En el tamaño medio de las hojas, no existieron diferencias entre los niveles 4 y 11 mM de NaCl, pero el número de hojas del tratamiento 11 mM de NaCl fue menor, lo que resultó en una clara disminución de la superficie foliar por plántula a medida que aumentaba la salinidad. Los porcentajes de necrosis aumentaron a medida que se incrementaba la concentración de NaCl, lo que, unido a la disminución de la

superficie foliar, provocó una drástica disminución de la superficie fotosintética potencial (superficie verde) a medida que aumentaba la salinidad (fig. 2).

El incremento de NaCl en el agua de riego provocó una menor acumulación de materia seca de las diferentes partes de la planta (fig. 3). No existieron diferencias significativas entre los niveles de NaCl en la relación raíz/tallo en peso seco, con valores entorno a 1,6.

Los valores de asimilación neta el 10/6/1994 (36 días después del inicio del ensayo) disminuyeron a medida que aumentó la concentración de NaCl. Similares tendencias se observaron en la conductancia estomática y en los valores de transpiración, aunque en ambos

casos, y a diferencia de la asimilación neta, se produjo cierto incremento en los niveles 4 mM de NaCl. La concentración subestomática de CO₂ aumentó a medida que lo hizo la de NaCl (fig. 4).

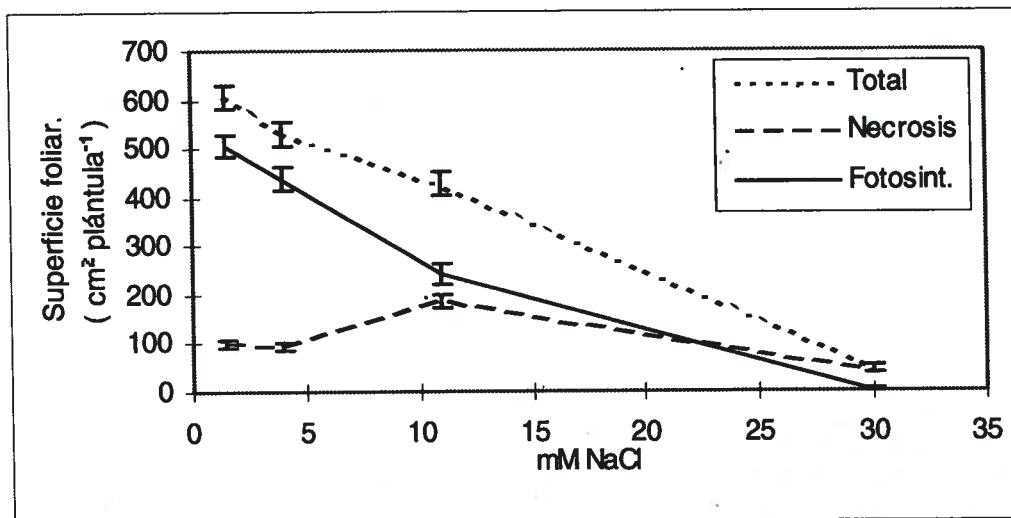


Figura 2.- Relación entre la superficie foliar total por plántula, la superficie necrótica y la superficie fotosintética potencial (superficie verde), y la concentración de NaCl en el agua de riego, en plántulas de avellano. Cada punto representa la media de 80 observaciones \pm error estándar.

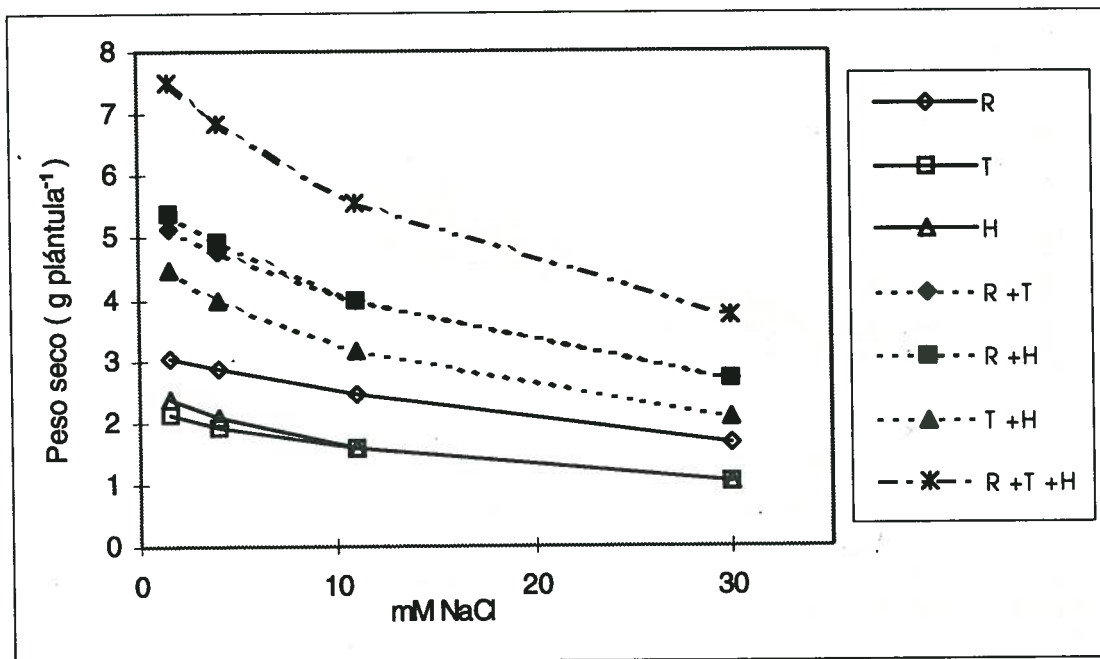


Figura 3.- Relación entre el peso seco de la raíz (R), tronco (T) y hojas (H) y la concentración de NaCl en el agua de riego, en plántulas de avellano. Cada punto representa la media de 80 observaciones.

Al aumentar la concentración de NaCl en el agua de riego, los contenidos de Na⁺ y Cl⁻ en raíces, tallo y hojas aumentaron, mientras que los de K⁺ disminuyeron ligeramente. Las mayores acumulaciones se produjeron en las hojas, con valores entorno al 3,5 % de K⁺, del 0,25 al 4,5 % de Na⁺ y del 2 al 5 % de Cl⁻. Destacó la fuerte acumulación de Na⁺, con valores de hasta 16 veces superiores en el tratamiento 30 mM con respecto al de 1,5 mM de NaCl y los elevados niveles de Cl⁻. La relación K⁺/Na⁺ evidenció una disminución a medida que aumentaba la concentración de NaCl en el agua de riego, debido más a la acumulación de

sodio que no a la disminución de potasio, pero que permitió observar diferencias en el valor de la relación cuando la concentración de sodio o la de potasio no eran significativamente diferentes.

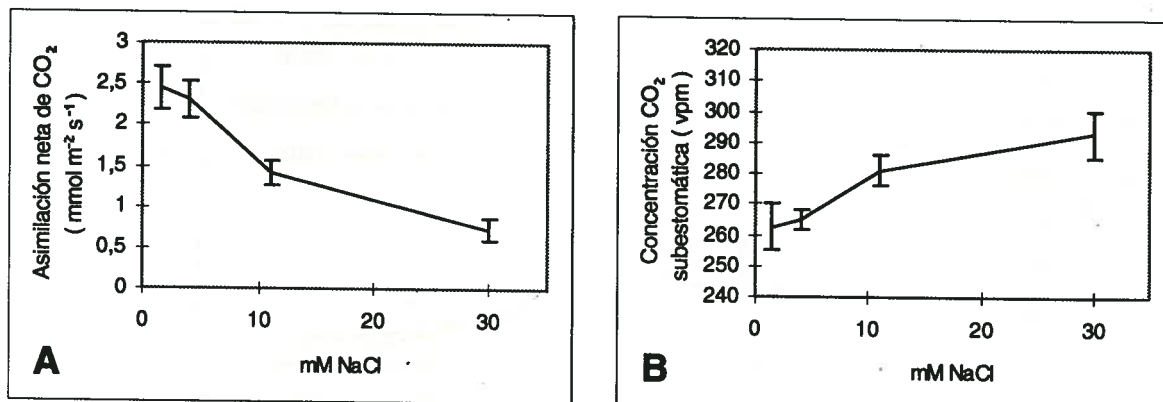


Figura 4.- Relación entre la concentración de NaCl en el agua de riego y la asimilación neta de CO₂ (A) y la concentración de CO₂ subestomática (B) en plántulas de avellano, 36 días después del inicio del ensayo. Cada punto representa la media de 20 observaciones ± error estándar.

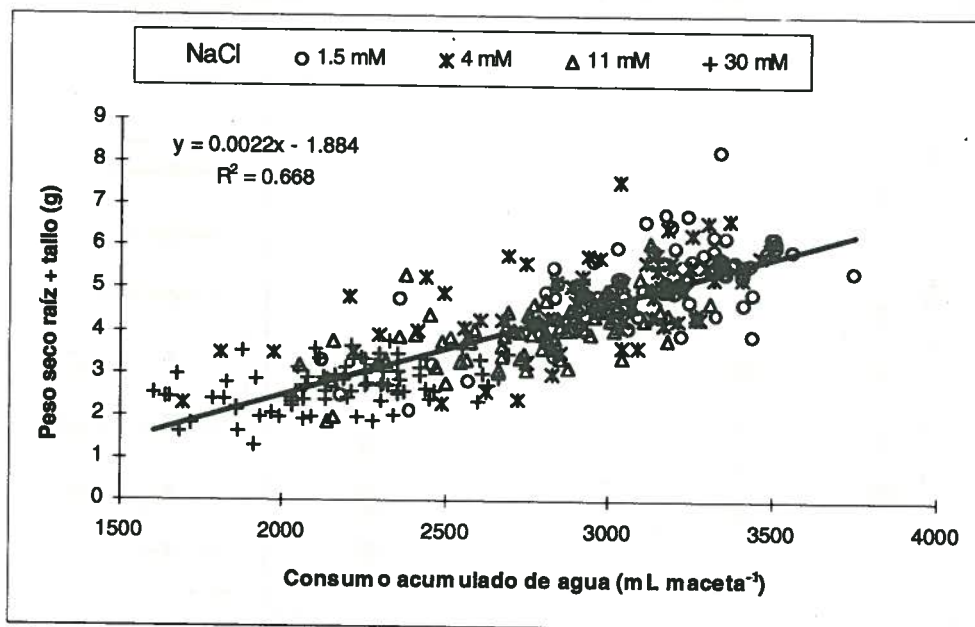


Figura 5.- Relación entre el peso seco de raíz + tallo y el consumo acumulado de agua durante el ensayo, en avellanos regados con diferentes concentraciones de NaCl en el agua de riego.

La relación entre el consumo de agua (evapotranspiración) y el peso seco de la plántula se ha utilizado para relacionar la transpiración y la eficiencia en el uso del agua con la producción y con la acumulación de materia seca y permite averiguar si ha existido algún tipo de cambio fisiológico en la planta como consecuencia de un estrés (Hanks, 1983; Tanner y Sinclair, 1983).

En este sentido, se ha observado como la menor acumulación de materia seca en los tratamientos más salinos está relacionada con el menor consumo de agua (fig. 5), ya que los diferentes tratamientos se sitúan en zonas diferentes dentro de una misma tendencia general. Además, las relaciones consumo de agua/peso seco dependieron del tratamiento salino, lo que

indicaría una clara situación de estrés. A medida que aumentaba la salinidad se apreció una tendencia a que los valores de la pendiente de la relación materia seca/agua consumida disminuyeran (fig. 6), lo que indica que, no solo no hubo una menor acumulación de materia seca como consecuencia de un menor consumo de agua, sino que la acumulación de materia seca por unidad de volumen de agua consumida (eficiencia del uso de agua) era menor.

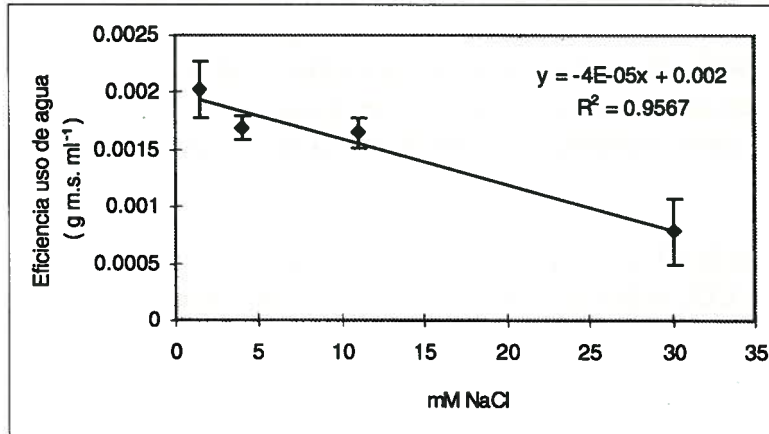


Figura 6.- Relación entre la eficiencia en el uso del agua (gramos de materia seca por unidad de volumen de agua evapotranspirada) y la concentración de NaCl en el agua de riego. Cada punto representa la media de 80 observaciones \pm error estándar.

Estos resultados matizan las relaciones generalmente aceptadas entre la salinidad y la eficiencia en el uso del agua, donde la eficiencia en el uso del agua puede mantenerse o aumentar al aumentar la salinidad (*Hanks et al., 1978; Hoffman et al., 1983; Meiri et al., 1995*). Dicho aumento de la eficiencia al aumentar la salinidad es debido a una disminución en el consumo de agua (ya sea disminuyendo la transpiración y/o la evaporación) en un grado mucho mayor que la disminución en la producción de materia seca. Esta tendencia es cierta si entendemos la salinidad como contenido de sales totales y, por tanto, como disminución del potencial osmótico del agua en el suelo, pero puede ser afectada cuando existe toxicidad de alguno de los iones presentes en la sal.

Se ha descrito que el ion Cl^- tiene un efecto tóxico en el avellano, provocando necrosis foliar (*Girona y Mata, 1987*). En nuestro ensayo, se ha podido comprobar como la rápida acumulación de Cl^- en las hojas provoca una disminución en la elaboración de materia seca mediante dos mecanismos: (a) la pérdida de superficie foliar y (b) la capacidad de asimilación de CO_2 por unidad de superficie foliar.

La pérdida de superficie foliar, entendida como disminución del número de hojas o del tamaño de las mismas mantendría la relación materia seca/consumo de agua constante, al igual que ocurre con la salinidad total (*Meiri et al., 1995*), pero cuando la pérdida de superficie foliar es debida a la caída de hojas necrosadas como consecuencia de una toxicidad, las relaciones pueden no mantenerse constantes. La caída de hojas maduras y la aparición de nuevas provoca la variación de la relación fuentes/sumideros y puede detener el crecimiento vegetativo (*Munns y Termaat, 1986*). Además la cantidad de materia seca fijada a nivel de planta puede disminuir más de lo que lo hace el consumo de agua y por tanto el ratio materia seca/consumo de agua puede disminuir.

El cierre estomático en respuesta a la salinidad es una situación frecuente en especies sensibles (Longstreth y Nobel, 1979; Walker et al., 1981 y 1983; Girona et al., 1994). Aunque en este trabajo se detectó una disminución de la conductancia estomática con la presencia de sales, parece evidente que el descenso en los valores de asimilación neta en los tratamientos con concentraciones más elevadas de NaCl no se debió exclusivamente al descenso de la conductancia, puesto que las concentraciones del CO₂ subestomático se incrementaban a medida que aumentaba la concentración de NaCl en el agua de riego (fig. 4). Por otra parte, Behboudian et al. (1986), que observaron un decremento inicial en la asimilación neta y después en la conductancia estomática en cítricos regados con aguas con NaCl, plantearon la posibilidad de que el cierre estomático se produjera como consecuencia de la caída de los valores de asimilación.

La acumulación de Cl⁻ en hojas puede ser la causante de la disminución en los valores de asimilación neta de CO₂ como los detectados, por afectar negativamente a los factores no estomáticos que controlan la fotosíntesis. Así, Seemann y Critchley (1985) demostraron como en judía la actividad *in vivo* de la Ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa (Rubisco) sufría un descenso de hasta un 40 % con concentraciones altas de Cl⁻ en hojas. Más tarde, Seemann y Sharkey (1986), demostraron como en plantas con altas concentraciones de NaCl en los tejidos es imposible regenerar Rubisco. Por último, Ziska et al. (1990) demostraron como la acumulación de Cl⁻ en hojas provocaba una limitación en la capacidad de regeneración de Rubisco en *Prunus salicina*, incluso antes de apreciar disminución alguna en las concentraciones de clorofila.

Así pues, si bien la eficiencia en el uso del agua no se ve afectada negativamente por la salinidad, entendida como disminución del potencial osmótico del agua, sí que puede verse alterada cuando existen efectos ion específico, hecho que debería tenerse en cuenta al trabajar con modelos de predicción.

5. Conclusiones

La acumulación en las hojas de avellano de grandes cantidades de Cl⁻ provoca una menor acumulación de materia seca en las diferentes partes de la plántula, que es cuantitativamente más importante que la disminución en evapotranspiración, lo que lleva a una menor eficiencia del uso de agua a medida que aumenta la concentración de NaCl en el agua de riego.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido cofinanciado por la empresa Albright & Wilson España S.A., a la que agradecemos su gran interés en el seguimiento del mismo. Se agradece la colaboración de Jordi Marsal, Amadeu Arbonés y Josep Rufat en la parte experimental.

6. Bibliografía

- Behboudian, M.H.; E. Törökfalvy y R.R. Walker, 1986. Effects of salinity on ionic content, water relations and gas exchange parameters in some citrus scion-rootstock combinations. *Scientia Horticulturae* 28:105-116.
- Burger, D.W.; J.S. Hartin; D.R. Holden; T.A. Lukaszewski; S.A. Tjosvold y S.A. Wagner, 1987. Water use in California's ornamental nurseries. *California Agriculture*. September-October 1987:7-8.
- Girona, J. 1990. Nut tree responses to salinity and specific ion toxicity. Work methodologies and first results. En: *Agriculture - Programme de recherche Agrimed - Amélioration génétique de deux espèces de fruits secs méditerranéés: l'amandier et el pistachier*. Huitième Colloque Agrimed-Grempa, Nîmes (France) 1990. Rapport EUR 14081-FR:277-286.
- Girona, J. y M. Mata, 1987. Respuesta del avellano (*Corylus avellana* L.) a condiciones salinas. I,II,III. *Jornadas Técnicas de Riego*. AERYD. Barcelona 1987. Resúmenes de la Jornada:81-85.
- Girona, J.; M. Cohen; M. Mata; J. Marsal y C. Miravete, 1994. Physiological, growth and yields responses of hazelnut (*Corylus avellana* L) to different irrigation regimes. *Acta Horticulturae*. 351: 463-472.
- Hanks, R.J. 1983. Yield and water-use relationships: An overview. En: *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. Taylor, H.M.; W.R. Jordan y T.R., Sinclair (eds). Am. Soc. Agron. Madisson, WI.:392-411.
- Hanks, R.J.; G.L. Ashcroft; V.P. Rasmussen y G.D. Wilson, 1978. Corn production as influenced by irrigation and salinity - Utah studies. *Irrig. Sci.* 1:47-59.
- Hoffman, G.J.; J.A. Jobes y W.J. Alves, 1983. Response of tall fescue to irrigation water salinity, leaching fraction and irrigation frequency. *Agric. Water Manag.* 7:439-456.
- Leopold, A.C. y R.P. Willing, 1984. Evidence for toxicity effects of salt on membranes. En: *Salinity Tolerance in Plants: Strategies for Crop Improvement*. R.C. Staples y G.H. Toenniessen (eds.). John Wiley and Sons Inc.:67-76.
- Longstreth, D.J. y P.S. Nobel, 1979. Salinity effects on leaf anatomy. Consequences for photosynthesis. *Plant Physiol.* 63:700-703.
- Maas, E.V. 1985. Crop tolerance to saline sprinkling water. *Plant and Soil.* 89: 273-284.
- MAPA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1975. *Métodos Oficiales de Análisis de suelos y aguas*. MAPA (España) 1975.
- Meiri, A.; D.J. Lauter y N. Sharabani, 1995. Shoot growth and fruit development of muskmelon under saline and non-saline soil water deficit. *Irrig. Sci.* 16:15-21.
- Munns, R y A. Termaat, 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 143-160.
- Pinta, A. 1973. Méthodes de référence pour la détermination des éléments minéraux dans le végétal. *Oléagineux* 28 années. n° 2:87-92.
- SAS Institute Inc. 1988. *SAS/STAT Users Guide*, Release 6.03 Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc. 1028 pp.
- Seemann, J.R. y C. Crichley, 1985. Effects of salts stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L. *Planta* 164: 151-162.
- Seeman, J.R. y T.D. Sharkey, 1986. Salinity and nitrogen effects on photosynthesis, Ribulose-1,5- Biphosphate carboxylase and metabolite pool sizes in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Physiol.* 82:555-560.
- Tanner, C.B. y T.R. Sinclair, 1983. Efficient water use in crop production: Research or re-search?. En: *Limitations to Efficient Water Use in Crop production*. Taylor, H.M., W.R., Jordan y T.R., Sinclair (eds). Am. Soc. Agron. Madisson, WI.1-27.
- von Caemmerer, S. y G.D. Farquhar, 1981. Some relationships between biochemistry of photosynthesis and gas exchange of leaves. *Planta* 153:376-387.
- Walker, R.R.; E. Törökfalvy y W.J.S. Dowton, 1983. Photosynthetic responses of citrus varieties rangpur lime and etrog citron to salt treatment. *Aust. J. Plant. Physiol.* 9:783-790.
- Walker, R.R.; E. Törökfalvy; N. Steele y P.E. Kriedemann, 1981. An analysis of photosynthetic response to salt treatment in *Vitis vinifera*. *Aust. J. Plant Physiol.* 8:359-374.
- Ziska, L.H.; J.R. Seeman y T.M. DeJong, 1990. Salinity induced limitations on photosynthesis in *Prunus salicina*, a deciduous tree species. *Plant Physiol.* 93:864-870.

DISEÑO DE UN MODELO DE INFILTRACIÓN PARA OLIVAR

Gómez Calero, J.A.¹(P), Giráldez Cervera, J.V²., Fereres Castiel, E^{1,2}.

RESUMEN

Se describe el esquema, las bases teóricas y el dispositivo experimental previsto para el desarrollo de un modelo de infiltración en olivar. Contempla el efecto y la persistencia de las labores, y tiene la doble finalidad de servir como herramienta de análisis de los diferentes sistemas de manejo del suelo, y como parte integrante del submodelo de balance de agua dentro de un modelo de simulación del cultivo. Se basa en el modelo de Green y Ampt, modificado concentrando el esfuerzo en la parte experimental requerida para su calibración y validación.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se viene observando un creciente interés sobre todos los aspectos relacionados con el olivar. Desde el punto de vista agronómico destaca el ensayo de nuevos sistemas de manejo del suelo, tales como el no laboreo, laboreo mínimo o uso de cubiertas vivas (Pastor, 1988; Castro, 1993). Estos trabajos demuestran el impacto que los diferentes sistemas tienen sobre el agua disponible para el árbol y en última instancia sobre la producción final. Hasta la fecha el análisis de estas técnicas se ha abordado siguiendo la metodología clásica de ensayo en parcela experimental, lo que ha permitido disponer de numerosos y valiosos datos y campos de ensayo. Existen, no obstante, numerosas cuestiones por resolver, entre las que destaca la generalización de los resultados experimentales a distintas combinaciones clima/suelo/sistema de manejo y el impacto de una determinada práctica de laboreo a largo plazo, mediante un modelo que simule la evolución que la capacidad de infiltración sufre a través del tiempo como consecuencia del tipo y frecuencia de las labores, régimen de lluvias, tipo de suelo, etc..., permitiría una interpretación más completa de los datos disponibles, a la vez que serviría para orientar futuros ensayos. Adicionalmente, una simulación de este tipo que permite abordar el balance de agua en olivar desde un punto de vista funcional sería de gran utilidad para un modelo del cultivo de olivar, como el que actualmente viene desarrollándose en el Instituto de Agricultura Sostenible y del que forma parte.

2. OBJETIVOS

1: Construir un modelo funcional que simule la evolución de la infiltración de la manera más simple posible tanto en sus requerimientos de cálculo, como de datos de entrada. Su finalidad será servir de herramienta de análisis para evaluar estrategias de manejo del suelo bajo diferentes condiciones edafológicas y climáticas, y también integrar los resultados de ensayos realizados hasta la fecha .

2: En una segunda etapa integrar el modelo de infiltración en uno de balance hídrico para simular el balance de agua a lo largo de un año de modo que sea utilizable dentro de un modelo de simulación del crecimiento del olivo.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL. SUPUESTOS BÁSICOS.

¹ Instituto de Agricultura Sostenible, C.S.I.C., Córdoba.

² Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba.

El modelo parte de una serie de supuestos básicos que simplifican su formulación estas son:

- El modelo calculará la infiltración a intervalos de minutos durante cada episodio de lluvia, y actualiza la evolución del estado del suelo (humedad, características hidrológicas...) diariamente hasta el siguiente evento de lluvia.

- Se asume un flujo vertical unidimensional y se considerará a efectos de cálculo el suelo dividido en dos semiespacios: bajo la copa, y en las calles. Esta solución se basa en observaciones realizadas, y que se describen en el apartado 6. En cada una de ellas se estimará la infiltración en base a un modelo de Green y Ampt modificado, que distinguirá diferentes horizontes en el perfil y el estado de humedad antecedente de cada uno.

- Los fenómenos que harán evolucionar las características de infiltración en el tiempo serán las labores (con una persistencia variable) y la modificación de la superficie del suelo como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia (sellado superficial). Estos fenómenos estarán recogidos en la evolución de los parámetros de G&A, y de la rugosidad superficial.

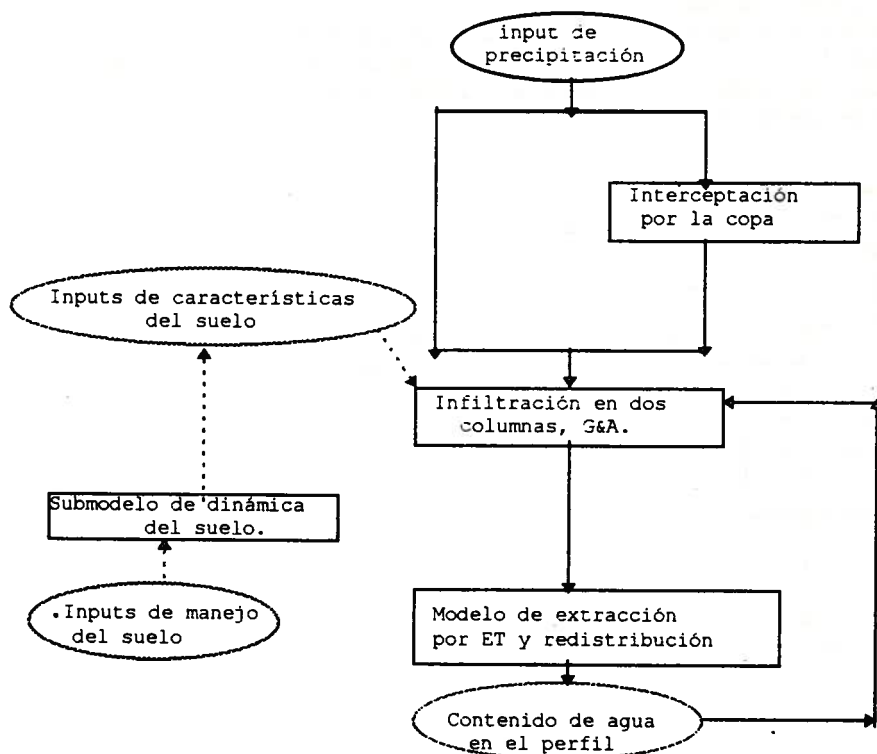


Figura 1: Diagrama simplificado del modelo de infiltración

4. DATOS DE PRECIPITACIÓN.

La escala temporal escogida para la precipitación es la lluvia horaria. Es la escala más pequeña disponible y la que puede proporcionar mayor información. No parece consistente construir un modelo que pretende ser funcional, para finalmente introducir la incertidumbre en forma de una lluvia diaria.

Se utilizarán datos de tres localidades, Córdoba, Almería y Lanjarón disponibles desde 1982 hasta hoy (Ayuso, J.L., comunicación personal), con

ellos se podrá validar el modelo para Córdoba, y también simular tres regímenes distintos. Para aplicarlo a otras zonas de Andalucía que no sean las citadas se utilizarán los datos diarios de lluvia de la estación/es más cercanas y se desagregarán en horarios mediante un modelo de desagregación calibrado y validado para Córdoba (García Guzmán et al., 1990) que ha demostrado ser suficientemente estable en localidades andaluzas distintas de Córdoba (García Guzmán, comunicación personal).

5. INTERCEPTACIÓN DE LLUVIA.

La copa del árbol intercepta una fracción de la lluvia, transformando la distribución de la precipitación (de Luna, 1994), especialmente en los instantes iniciales o si éstas son de poca intensidad. Este fenómeno es recogido por el modelo, no sólo por el valor absoluto de la lluvia interceptada, sino también por su influencia en otros fenómenos: erosión, evaporación desde el suelo, redistribución, etc..., para los que es útil disponer de esa información.

El esquema del mismo se recoge en la figura 2. Se basa en el modelo de Rutter (de Luna, 1994, Calder, 1990), aunque modificado para incorporar el efecto de una lluvia variable, y ajustando sus parámetros en función de una característica del árbol, el Índice de Area Foliar (Pitman, 1989), relativamente fácil de medir (Villalobos, 1995) que permita su aplicación a olivos de diferentes características.

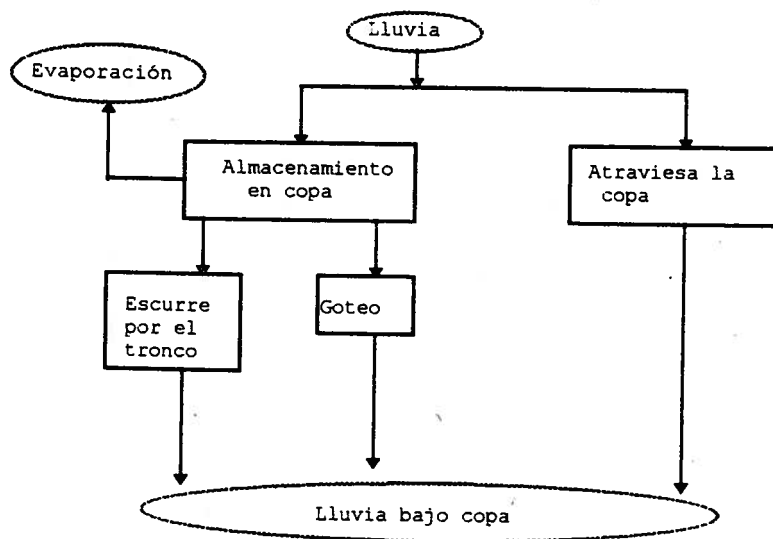


Figura 2: Esquema de interceptación

Los parámetros serán, capacidad de almacenamiento máxima en copa (C_{mx}), capacidad de almacenamiento en copa sin goteo (C_{min}), coeficiente de llenado de copa (K), coeficiente de vaciado de copa (K'), fracción de lluvia no interceptada (f) y fracción de lluvia que escurre por el tronco (Stf). Todos estos parámetros se calibrarán y validarán mediante ensayos en campo en árboles con distinto porte refiriéndose al IAF. (Pitman, 1989). Se empleará un dispositivo experimental situado en un árbol aislado que, usando un paraguas invertido y un pluviógrafo, obtiene un registro continuo de la lluvia total bajo el árbol (incluido el escurrimiento por el tronco). La intensidad de lluvia sobre el olivo se monitorizará con otro pluviógrafo situado junto al árbol en zona despejada. Los inputs necesarios para el modelo son, tamaño de copa e IAF, además de la precipitación.

6. VARIABILIDAD ESPACIAL EN LA INFILTRACION DE LA LLUVIA EN UN HUERTO DE OLIVO

Se dividirá la parcela en dos zonas, calle y bajo copa, en función del marco y el diámetro de copa. En cada una se ellas se calculará el agua infiltrada considerando dos columnas independientes de suelo. Esta simplificación se sustenta sobre las referencias recogidas en la bibliografía (Pastor, 1988) contrastadas con información experimental. En la tabla 1 se recogen los valores de agua infiltrada recogidos por el autor en Casillas (CIFA, Alameda del Obispo, Córdoba) para las precipitaciones de los días 10, 11 y 12 de Noviembre de 1995, que sumaron un total de 68 mm. Para su determinación se tomaron muestras de todo el perfil del suelo hasta alcanzar el frente de humedad. El agua infiltrada se determinó mediante muestreo gravimétrico de la humedad del suelo en todo el perfil, antes y después de las lluvias. Se tomaron cuatro puntos por repetición, dos bajo copa y dos en la calle, formando una línea recta entre dos árboles adyacentes, y desechando aquellas zonas alteradas o donde no se pudo profundizar por la presencia de piedra. Se hicieron cuatro repeticiones por tratamiento (Laboreo y No Laboreo), lo que supone un total de 32 puntos muestreados (2x4x4).

POSICIÓN	Inf., mm.	POSICIÓN	Inf., mm.
Laboreo, calle	43	No laboreo, calle	39
Laboreo, bajo árbol	72	No Laboreo, bajo copa	71

A esto se suman los valores de resistencia a la penetración en el perfil del suelo para el mismo ensayo (Pastor, 1988) que confirman la diferenciación entre las dos zonas definidas. Las posibles correcciones a esta simplificación se determinarán en la fase de validación del modelo, y se incluirán como una redistribución del contenido de agua entre las dos columnas durante los periodos entre lluvias.

7. SUBMODELO DE INFILTRACIÓN

Para calcular la infiltración, se usará un modelo de Green y Ampt modificado para representar un suelo constituido por cuatro capas: la zona labrada, la suela de labor, la zona inferior y la costra superficial que se forma como consecuencia del sellado debido a la precipitación. En síntesis se trata de resolver la ecuación de infiltración a la vez que se reduce la infiltración de una primera capa superficial. Esta variación de su capacidad de infiltración se recoge mediante una ecuación exponencial en la que la conductividad en saturación se reduce en función de la energía cinética de la lluvia, y los parámetros ajustan esta reducción en función del tipo de suelo, (ecuaciones 1 y 2).

$$Ks(t) = Ks_{final} + (Ks_{inicial} - Ks_{final}) e^{-CEc} \quad (1)$$

$$C = \ln \left(\frac{K_{final}}{K_{inicial} - K_{final}} \right) B \frac{\left(1 - \frac{RR}{4} \right)}{E_0} \quad (2)$$

Siendo Ks la conductividad hidráulica en saturación, B el tanto por uno de superficie expuesta, E_0 es la energía cinética de la lluvia necesaria para que Ks sea la mitad de la inicial, RR es la rugosidad superficial y E_c la energía cinética acumulada de la lluvia.

Esta conductividad variable impone una ecuación diferencial resuelta mediante un método numérico (Runge- Kutta). Una descripción completa de este modelo de infiltración, su aplicación y validaciones aparece en la bibliografía (Chu, 1985; Chu y Rawls 1986; Kim y Chung, 1994; Rawls y Brankensiek, 1983; Rawls, Brankensiek et al., 1989).

La infiltración se calculará a intervalos de minutos, y el exceso se acumulará en un factor de almacenamiento en superficie, que dependerá del tipo de labor, tiempo transcurrido desde ella y de la pendiente. Una vez superada esta capacidad de almacenamiento se considerará escorrentía .

También se considera la influencia del contenido de humedad del suelo en los parámetros de la ecuación de infiltración, siguiendo el método propuesto por Chu (1995).

Los parámetros necesarios para el modelo son :

- Para cada una de las tres capas en que se divide el perfil: espesor, curva de retención, conductividad en saturación, tensión del frente de humedad, humedad volumétrica en saturación y en el punto de marchitez permanente.

- Para la costra superficial, su conductividad en saturación inicial y final, y la energía necesaria para que K_s sea la mitad de la inicial.

- Capacidad de almacenamiento en superficie.

Todos estos parámetros se determinarán para dos suelos: Casillas y El Gujarrillo (Pastor, 1988), que son las localidades donde se calibrará y validará el modelo. Su determinación se hará en campo siempre que sea posible, empleando técnicas que emplean un infiltrómetro de lluvia por su mayor aptitud para evaluar la infiltración (Frasier et al., 1995; Potter et al., 1995; Parkin et al., 1995; White et al., 1989; Schroeder et al., 1982). Para la validación del mismo se obtendrán valores de contenido de agua en el perfil durante una o dos campañas, lo cual permitirá contrastar las predicciones del modelo . Previendo la aplicación del modelo a localidades donde no sea posible disponer de los inputs requeridos para el esquema anterior, se diseñará una versión simplificada en base a una ecuación tipo Philips de forma que pueda ejecutarse una simulación a partir de la información disponible en un catálogo de suelos. Los resultados de los ensayos destinados a conocer la evolución del sellado, impacto y persistencia de las labores (ver apartado posterior) se referirán mediante a un ajuste empírico a esta versión simplificada.

8. SUBMODELO DE DINÁMICA DEL SUELO

Como ya se comentó en la introducción, el tipo y la frecuencia de labores aplicadas al olivar combinadas con su diferente impacto dependiendo del tipo de suelo y régimen de lluvias, genera una gran cantidad de situaciones posibles que no permiten establecer una serie de reglas y recomendaciones generales, sino que justifican el uso de un modelo que permita evaluarlas. Por ello, las características del suelo no se consideran constantes, sino que se recoge la variación que sufren como consecuencia fundamentalmente del tipo y profundidad de la labor, y de su persistencia. Dada la poca información cuantitativa disponible (Giráldez, comunicación personal), se pretende profundizar especialmente en este aspecto. Para ello, se dispone de la posibilidad de caracterizar completamente los aspectos extremos en cuanto a técnicas de cultivo, Laboreo convencional y No laboreo estabilizado (más de diez años) en los dos ensayos seleccionados. Para completar el abanico se efectuaran ensayos para determinar la alteración de

las características de infiltración debido a algunos tipos de labor y a la duración de su impacto.

El efecto de las labores se recogerá en el valor que tomen los parámetros del modelo formulados para ese suelo y situación, que se referirán respecto a su valor para una labor estándar (Rawls et al., 1983). La duración se determinará experimentalmente, y se ajustará la duración para cada suelo a una función que tenga el tiempo transcurrido y la precipitación como variables independientes. Los parámetros de este submodelo son los de ajuste de las funciones.

9. SUBMODELO DE REDISTRIBUCIÓN Y ACTUALIZACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

Como se recoge en la descripción general, el modelo tiene como segundo objetivo simular la infiltración y contenido de agua durante una campaña en la parcela. Por este motivo aborda la redistribución del agua en el perfil y la extracción por el cultivo y la debida a la evaporación. Para la redistribución seguirá el esquema usado por Killen y Slack, 1987, y para la evapotranspiración incorporará el resultado del trabajo que actualmente se viene desarrollando sobre transpiración y evaporación desde el suelo para el olivar (Orgaz, comunicación personal), no siendo este un objetivo de la presente comunicación. Para ambos se recurrirá a implementar los resultados en forma de algoritmos, que sustraigan diariamente el agua evapotranspirada del perfil. Para determinar la profundidad y distribución de esta extracción se precisan datos experimentales de densidad radicular en función de la profundidad, simulandose distintas funciones de extracción que se compararan con los datos experimentales obtenidos en estudios ya realizados.

10. REFERENCIAS

- Calder, I.R. (1990). *Evaporation in the Uplands*. J. Wiley . Chichester.
- Castro, J. (1993). *Control de la Erosión en Cultivos Leñosos con Cubiertas Vegetales Vivas*. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.
- Chu, S.T. (1978). "Infiltration During an Unsteady Rain." *Water Resour. Res.* 14 (3), 461-466.
- Chu, S.T. (1985). "Modelling Infiltration into Tilled Soil during Non Uniform Rainfall." *TRANSACTIONS of the ASAE* 28 (4), 1226-1229, 1232
- Chu, S.T., Onstad C.A. y Rawls W.J. (1986). "Field Evaluation of Layered Green-Ampt Model for Transient Crust Conditions." *TRANSACTIONS of the ASAE* 29 (5), 1268-1272, 1277.
- Chu, S.T. (1995) "Effect of Initial Water Content on Green-Ampt Parameters." *TRANSACTIONS of the ASAE* 38(3), 839-841.
- de Luna E. (1994). *Protección del Suelo contra la Erosión en el Cultivo del Olivo*. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.
- Frasier, G.W., Hart, R.H. y Schuman G.E. (1995). "Rainfall Simulation to Evaluate Infiltration/runoff Characteristics of Shortgrass Prairie." *J. Soil and Water Cons.* 50 (5), 460-463.

- García Guzmán, A. y Aranda Oliver, E. (1993) "A Stochastic Model of Dimensionless Hyetograph." *Water Resour. Res.* 29 (7), 2363-2370.
- Killen, M.A. y Slack, D.C. (1987). "Green-Ampt Model to Predict Surge Irrigation Phenomena." *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 113(4), 575-584
- Kim, S.J. y Chung H.W. (1994). "Field Evaluation of Layered Green-Ampt Infiltration Model Considering Temporal Variation of Physical Properties." *TRANSACTIONS of the ASAE* 37 (6), 1845-1852.
- Parker, G.W., Kachanowsky R.G., Elrick, D.E. y Gibson R.E. (1995). "Unsaturated Hydraulic Conductivity Measured by Time Domain Reflectometry under a Rainfall Simulator." *Water Resour. Res.* 31 (3), 447-454.
- Pastor, M. (1988). *Sistemas de Manejo del suelo en el Olivar*. Tesis Doctoral, Universidad de Córdoba.
- Pitman, J.I. (1989). "Rainfall Interception by Bracken in Open Habitats Relations Between Leaf Area, Canopy Storage and Drainage Rate". *Journal of Hydrology* 105 , 317-334.
- Potter, K.N., Torber, H.A. y Morrison J.E. (1995). "Tillage and Residue Effects on Infiltration and Sediment Losses on Vertisols." *TRANSACTIONS of the ASAE* 38 (5), 1413-1419.
- Rawls, W.J., Brankensiek, D.L. y Soni, B. (1983) " Agricultural Effects on Soil Water Processes Part I: Soil Water Retention and Green-Ampt Infiltration Parameters." *TRANSACTIONS of the ASAE* 26 (6), 1747-1752.
- Rawls, W.J., Brankensiek, D.L. y Soni, B. (1983) " Agricultural Effects on Soil Water Processes Part II: Green-Ampt Parameters for Crusting Soils." *TRANSACTIONS of the ASAE* 26 (6), 1753-1757.
- Rawls, W.J., Brankensiek, D.L., Simanton, J.R. y Kohl, K.d. (1990). "Development of a Crust Factor for a Green-Ampt Model." *TRANSACTIONS of the ASAE* 33 (4), 1224-1228.
- Schroeder, S.A., Foster, G.R., Moldenhauer, W.C. y Mannering J.V. (1982). "Hydraulic Conductivity of Soil as Determined from Cumulative Runoff." *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46, 1267-1270.
- Villalobos, F.J., Orgaz, F. y Mateos L. (1995). "Non-destructive Measurement of Leaf Area in Olive (*Olea Europaea*) Trees Using a Gap Inversion Method." *Agricultural and Forest Meteorology* 73, 29-42.
- White, J., Sully, M.J. y Melville M.D. (1989). "Use and Hydrological Robutness of Time to Incipient Ponding." *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 1343-1346.

APLICACIÓN DE FERTILIZANTES CON EL RIEGO POR SUPERFICIE : **ANÁLISIS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Playán Jubillar ¹, E. (P) y Faci González ², J. M.

Resumen :

La incorporación de fertilizantes al agua en el riego por superficie puede ser una buena alternativa en aquellos casos en que el porte del cultivo no permite usar maquinaria específica. En este trabajo se presenta un análisis del fertirriego por superficie y se comparan tres evaluaciones de fertirriego. La aplicación del fertilizante duró 5 min, y se inició cuando el proceso de avance había cubierto el 0%, 33% y 50% del tablar, respectivamente. En los tres casos analizados la uniformidad de la aplicación del fertilizante es menor que la del riego. Ensayos como los que se presentan pueden servir para validar modelos de fertirriego por superficie. Estos modelos podrían estar basados en el análisis expuesto y permitirían optimizar conjuntamente la aplicación del agua y el fertilizante.

Summary :

Surface fertirrigation can be a good alternative to conventional fertilization in cases when the status of the crop prevents using specific machinery. We present an analysis of surface fertirrigation and compare the results of three field evaluations. In them, the fertilizer was applied at a continuous rate during five minutes. In the three cases application started when the advance reached 0%, 33% and 50% of the border area, respectively. The distribution uniformity was always smaller for the fertilizer than for the irrigation water. This kind of experiments can be useful to validate future surface fertirrigation models based on the presented analysis. Such models could assist in the conjunctive optimization of water and fertilizer.

Introducción

En muchos cultivos herbáceos extensivos resulta casi imposible aplicar fertilizantes por medios convencionales una vez que éstos están establecidos. Una de las posibles alternativas es la aplicación del fertilizante con el agua de riego. Ésta es una práctica habitual en otros cultivos, como en árboles frutales o en algunos hortícolas, en los que el fertirriego está asociado muy frecuentemente al riego por goteo. En este sistema de riego se puede aplicar el agua, y por tanto el fertilizante, de una manera muy controlada.

¹ Departamento de Genética y Producción Vegetal
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (CSIC-DGA).
Estación Experimental de Aula Dei (CSIC)
Apdo. 202, 50080 Zaragoza

² Unidad de Suelos y Riegos (SIA)
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (CSIC-DGA).
Servicio de Investigación Agroalimentaria (DGA)
Apdo 727, 50080 Zaragoza.

Los cultivos herbáceos extensivos se riegan casi exclusivamente por superficie y aspersión. En el riego por aspersión, resulta ya muy frecuente encontrar en instalaciones comerciales bombas inyectoras que permiten mezclar el agua de riego y el fertilizante en relaciones fijadas por los agricultores. En el riego por superficie se comenzó aplicando fertilizante sólido de forma puntual en el agua de riego. Esto se consigue en la práctica arrojando el contenido de uno o varios sacos de abono al punto de entrada de agua al campo. En la actualidad, la aplicación se hace generalmente de forma continua, usando soluciones nitrogenadas. De esta manera, el agua y el fertilizante se mezclan en proporciones prefijadas, de la misma manera que ocurre en el riego por aspersión.

Cuando la relación de mezcla es constante, la uniformidad de aplicación del fertilizante es la misma que la del riego. Si la relación varía con el tiempo (como es el caso de las aplicaciones puntuales), la uniformidad de aplicación del fertilizante puede ser mayor, menor o igual que la del riego. En el caso del agua de riego, la estimación de la uniformidad y la eficiencia puede hacerse en base a modelos de distintos tipos (Walker y Skogerboe, 1987). En el caso del fertilizante, la eficiencia de la aplicación es difícil de estimar y medir, y desborda sin lugar a dudas los objetivos de este trabajo. Es por ello que hemos optado por la uniformidad como índice de la calidad de la aplicación. La uniformidad es un requisito indispensable para la eficiencia.

En este trabajo presentamos un análisis del fenómeno del fertirriego por superficie que pretende ser la base de futuros modelos simplificados que sirvan para predecir la uniformidad de distribución de fertilizantes bajo diversas variables de operación. Seguidamente, presentamos datos de tres ensayos de fertirriego en los que se calcula la uniformidad de distribución del fertilizante. Finalmente, se discuten los resultados y se analizan las limitaciones del método usado para determinar la uniformidad.

Análisis del fertirriego por superficie

La variables de una aplicación puntual de fertilizante en el riego por superficie son los tiempos de inicio y fin de la aplicación del fertilizante (t_i y t_f , respectivamente) y la masa total de fertilizante a aplicar (M). La aplicación en mezcla constante del fertilizante es un caso particular de aplicación puntual en la que $t_i = 0$ y $t_f = t_c$, donde t_c es el tiempo de corte del riego. La Figura 1 presenta tres instantes (t_1 , t_2 y t_3) del fertirriego de un tablar o surco. En la figura se indica el agua que contiene fertilizante tanto sobre como bajo la superficie del suelo. La parte izquierda de la figura presenta el caso real, mientras que en la parte derecha se presenta el modelo conceptual que se está proponiendo. De la figura se desprende que $0 < t_i < t_1$ y $t_1 < t_f < t_2$.

El movimiento del fertilizante disuelto sobre la superficie del suelo está gobernado por las ecuaciones del flujo en lámina libre. Si éste fuera el único proceso que actuara sobre la masa de fertilizante disuelto, el modelo propuesto reproduciría el fenómeno con fidelidad. La concentración inicial del fertilizante, C , se puede calcular como :

$$C = \frac{M}{Q(t_f - t_i)} \quad [1]$$

donde Q es el caudal de riego (supuesto constante). En este caso, la concentración es constante en el tiempo y uniforme dentro del volumen de agua que se desplaza aguas abajo. Este volumen de control es el delimitado por el agua que entra en el campo entre t_i y t_f . En su curso, el volumen superficial de agua fertilizada disminuye debido al proceso de infiltración. Los extremos aguas arriba y aguas abajo del volumen pueden determinarse en cada momento determinando la trayectoria de las partículas de agua que entran en el campo a tiempos t_i y t_f , respectivamente. El flujo del agua superficial en el riego por superficie es esencialmente turbulento, por lo que no hay desplazamiento de capas del fluido. Esta es la garantía de que el fertilizante queda contenido dentro de este volumen de control.

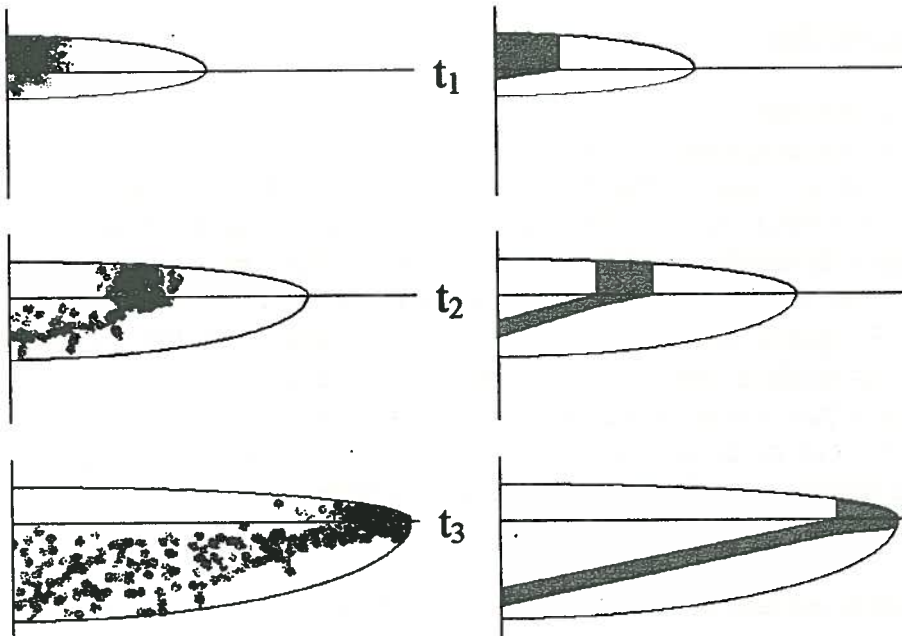


Figura 1. *Distribución del fertilizante disuelto en el agua del riego por superficie (izquierda) y modelo conceptual propuesto (derecha) en tres tiempos durante el riego.*

Otros procesos, como la turbulencia y la difusión, son los responsables de que el fenómeno real difiera del modelo aquí presentado. La turbulencia es debida a aceleraciones verticales y pequeños remolinos producidos por irregularidades de la superficie del suelo o por la misma presencia del cultivo. Si la turbulencia ocurre en los extremos de la mancha fertilizada, el resultado es un gradiente suave de concentración en ambos extremos, tal como se muestra en la parte izquierda de la Figura 1. El proceso de difusión produce un efecto similar, aunque su relevancia en este caso es despreciable.

La cantidad de fertilizante que atraviesa el suelo en cada momento es función de su concentración y de la tasa instantánea de infiltración, que es a su vez función del tiempo de contacto. El destino del fertilizante dentro del suelo está determinado por la hidráulica del medio poroso, las transformaciones físico-químicas del fertilizante, el flujo preferencial a través de macroporos y la difusión. Estos procesos son los que determinan el volumen de percolación profunda de fertilizante, que es un factor esencial en la determinación de la eficiencia de su aplicación. La Figura 1 presenta en la derecha un flujo idealizado de tipo pistón, mientras que en la izquierda se presenta una situación posiblemente más cercana a la real.

El flujo subsuperficial del fertilizante ha sido estudiado por muchos autores en los últimos años (Jaynes *et al.*, 1992 ; Sousa *et al.*, 1993 ; Cameira *et al.*, 1996), mientras que el flujo superficial en el riego por superficie ha recibido poca atención. Un análisis centrado exclusivamente en el flujo superficial y en la interfase entre el agua y la superficie del suelo puede llegar a estimaciones de uniformidad de aplicación basadas en la combinación de concentración y tasa de infiltración. En el caso del riego con escorrentía, se puede utilizar el mismo enfoque para estimar el porcentaje de escorrentía superficial del fertilizante. La determinación de la percolación profunda es un problema mucho más complejo, para cuyo análisis es preciso considerar múltiples factores.

Materiales y métodos

Para caracterizar el proceso del fertirriego por superficie realizamos tres evaluaciones de riego por escurrimiento en tablares cerrados. Las tres evaluaciones se realizaron sucesivamente en un mismo tablar de 280 m de largo y 2.90 m de ancho. La pendiente del terreno, que fue nivelado con LASER, resultó ser del 1.0 por mil. El tablar estaba cultivado de maíz, con líneas de siembra paralelas a la dirección del flujo, por lo que la n de Manning se estimó como 0.04. El caudal se determinó con un contador volumétrico Woltman de 200 mm de diámetro. El agua se distribuyó uniformemente a lo ancho del tablar utilizando una tubería perforada de las utilizadas para riego por surcos. En cada caso el corte se realizó antes del fin de la fase avance para intentar evitar encharcamientos prolongados del extremo aguas abajo del tablar. El porcentaje de avance en el momento del corte fue del 73% en promedio. En cada evaluación se determinaron los tiempos de avance y receso en estaciones separadas 20 m a lo largo del tablar.

Se realizó una aplicación pulsada un total de 50 kg de nitrato amónico al 33.5%, que se mezcló uniformemente con el agua de riego durante un tiempo de 5 min. Esta aplicación comenzó en un momento distinto en cada evaluación. Así, t_i coincidió con el tiempo en que se alcanzó el porcentaje de avance del 0, 33 ó 50%. Estos porcentajes se usaron para dar nombre a cada una de las evaluaciones. La Tabla 1 presenta las principales características de cada uno de los riegos.

Tabla 1. Principales características de los ensayos de riego.

Evaluación	Caudal ($l s^{-1}$)	Caudal Unit. ($l s^{-1} m^{-1}$)	T. de inicio, t_i (min)	Tiempo de corte (min)	Volumen (m^3)	Dosis bruta de riego (mm)
0%	22.1	7.61	0	45	59.6	73
33%	23.9	8.24	13	30	43.0	53
50%	22.1	7.61	23	37	49.0	60

Para caracterizar la infiltración se utilizó la ecuación empírica de Kostiakov-Lewis :

$$Z = k\tau^a + f_0\tau \quad [2]$$

donde τ es el tiempo de contacto (min), k es un parámetro empírico ($m \text{ min}^{-a}$). a es un exponente empírico y f_0 es un parámetro empírico ($m \text{ min}^{-1}$). Los parámetros correspondientes a cada tablar se determinaron en base a los resultados de las evaluaciones, utilizando la técnica de ajuste de las curvas de avance y receso. Para estimar el valor de a se contó con la experiencia previa de mediciones de infiltración en el terreno. En la determinación de k y f_0 se

utilizó en primer lugar el método de los dos puntos (Walker y Skogerboe, 1987). Estas estimaciones se refinaron posteriormente por comparación con los resultados de la simulación del riego con un modelo hidrodinámico (Walker, 1993).

La aplicación del fertilizante provoca un acusado aumento de la salinidad del agua de riego. Se utilizaron medidores portátiles de conductividad eléctrica para aproximar la trayectoria de la mancha fertilizante a través de la salinidad del agua de riego. Cuando la salinidad aumentaba en cada una de las estaciones, se comenzaba a tomar muestras de agua a intervalos variables de entre 1 y 2 min. Cuando la salinidad volvía a ser similar a la del agua de riego se dejaba de tomar muestras. Posteriormente se analizó el contenido en nitratos de las muestras utilizando cromatografía iónica.

En base a la evolución del contenido de nitratos del agua que fluye sobre cada estación en determinados tiempos, se estimó la uniformidad de distribución del NO_3^- correspondiente a cada estrategia de aplicación. Para ello, se supuso que el agua que infiltra entre dos tiempos de toma de muestras en cada estación lo hace al ritmo dictado por el tiempo de contacto promedio de las dos medidas y con la concentración media de las dos. De esta manera, se puede calcular la dosis de nitratos aplicada en cada estación en g m^{-2} . A partir de estas dosis se calculó la uniformidad de distribución siguiendo la metodología presentada por Merriam y Keller (1978) para el agua de riego.

Resultados y discusión

La Figura 2 presenta las curvas de avance y receso correspondientes a los tres ensayos (símbolos). El avance es bastante rápido, siendo las diferencias entre las tres evaluaciones debidas principalmente a las diferencias en los parámetros de infiltración. En cuanto al receso, se produce en los tres casos un encharcamiento del extremo aguas abajo del tablar que pudo ser evitado con un corte ligeramente más temprano. Esta circunstancia hace que el tiempo de contacto sea mucho mayor en esta zona que en el resto del tablar. En la misma figura se presentan los resultados de la simulación con el modelo hidrodinámico (líneas). La Tabla 2 muestra los valores de los parámetros de infiltración empleados en el modelo. Éstos son los que produjeron un mejor acuerdo entre los datos observados y la simulación.

La Figura 3 presenta la evolución de la concentración de nitratos del agua en cada estación. Cuando el fertilizante se aplica desde el inicio del riego, el frente de avance tiene concentraciones elevadas de fertilizante hasta que éste se consume. Esto se evidencia en la figura por el hecho de que en cada estación (salvo en la primera) el pico de concentración se produce al inicio de la medida, que en este caso coincide con el tiempo de avance a cada estación.

Tabla 2. *Parámetros de infiltración estimados por ajuste de las curvas de avance y receso a los resultados del modelo hidrodinámico.*

Evaluación	k (m min^{-a})	a	f_0 (m min^{-1})
0%	0,0234	0.166	0.00010
33%	0.0065	0.166	0.00008
50%	0.0130	0.166	0.00017

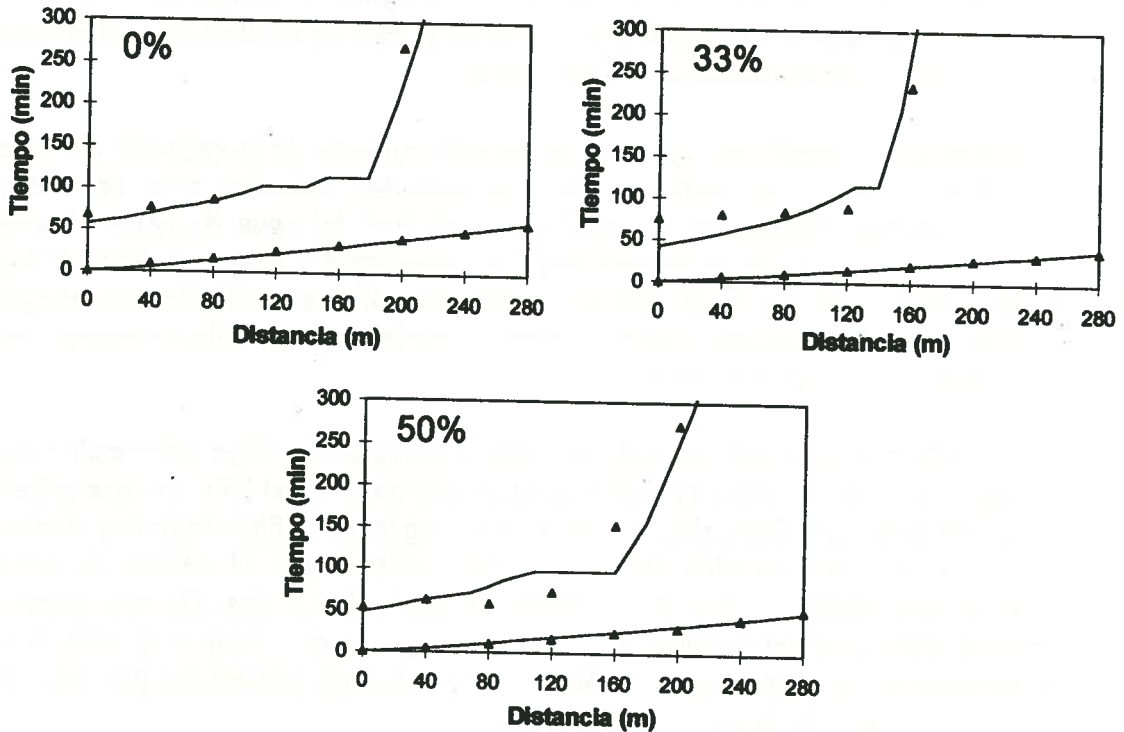


Figura 2. Curvas de avance y receso para los ensayos de aplicación de fertilizante al 0, 33 y 50% de avance. Se presentan los datos medidos (símbolos) y los resultados de la simulación (líneas).

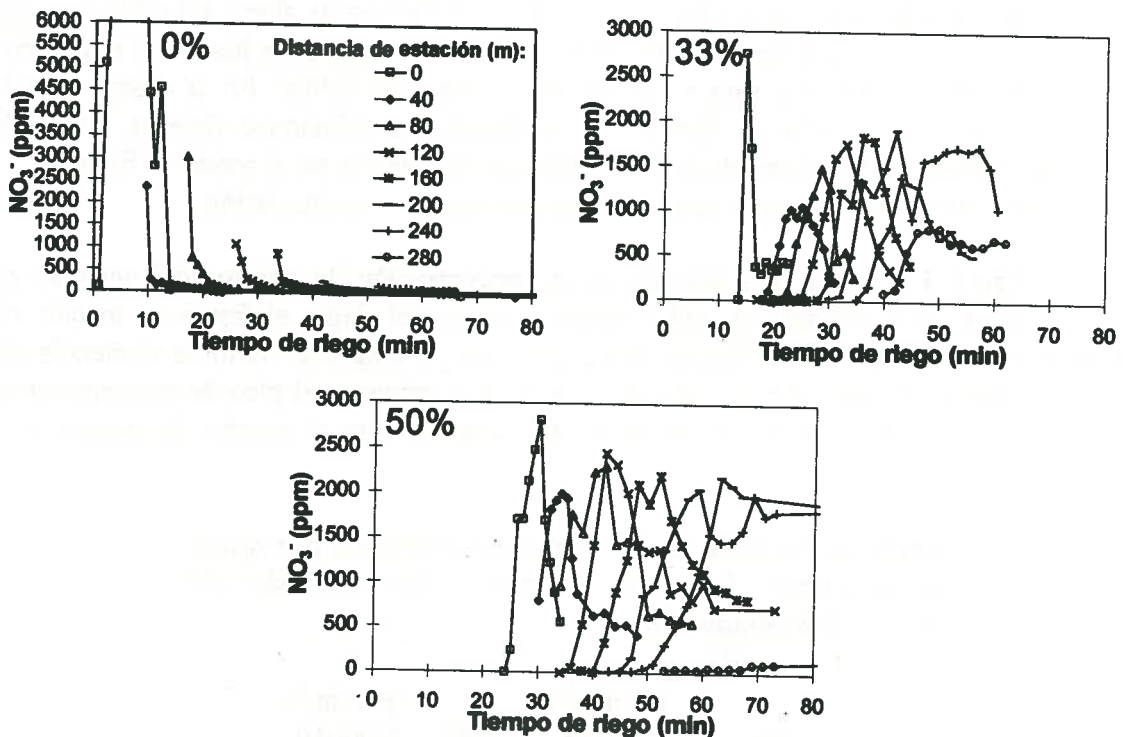


Figura 3. Evolución temporal del contenido de nitratos de las aguas de cada punto de estación para los ensayos de aplicación de fertilizante al 0, 33 y 50% de avance.

En el caso 33%, el frente de avance siempre está formado por agua no fertilizada, salvo en la última estación, en la que el nivel inicial de nitratos ya es significativo. En ésta, el nivel de nitratos alcanza un nivel elevado y estabilizado. Esto es una indicación de que el agua ha quedado estancada, tal como se puede observar en la Figura 2. En las dos estaciones anteriores también se produjo encharcamiento, pero en ese momento el agua fertilizada ya se encontraba aguas abajo de éstas. Esto revela que el agua estancada tuvo un fuerte gradiente de concentración de nitratos. En estas condiciones la difusión es el único proceso que puede homogeneizar la concentración, pero la velocidad de este proceso es despreciable en las condiciones del ensayo.

En el fertirriego con aplicación al 50% del avance la concentración de nitratos evoluciona de forma similar al caso anterior salvo en la parte final. En las estaciones de 200 y 240 m se alcanzan valores elevados y estacionarios de nitratos, pero en la estación 280 el nivel de nitratos apenas aumenta. El agua dulce que llegó al inicio del avance a esta estación quedó estancada y el fertilizante quedó atrapado en las dos estaciones anteriores. El ligero y sostenido aumento de la concentración en la estación 280 puede estar explicado por un suave flujo laminar desde las estaciones anteriores.

En la Figura 4 se presentan las dosis finales de fertilizante recogidas en cada estación y riego. De la figura se desprende que todas las aplicaciones de fertilizante resultaron poco uniformes, y, previsiblemente, poco eficientes. La aplicación 0% tiene mucha más concentración aguas arriba del tablar, mientras que la 33% hace lo contrario. En la aplicación 50% se observa claramente el hecho de que una masa de agua dulce quedó estancada en el extremo inferior del tablar.

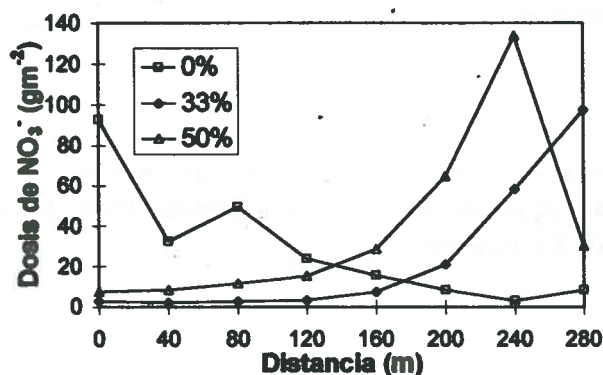


Figura 4. Dosis final de NO_3^- infiltrado en cada punto de estación para los ensayos de aplicación de fertilizante al 0, 33 y 50% de avance.

La Tabla 3 presenta los coeficientes de uniformidad de distribución correspondientes al agua de riego y al fertilizante en las tres evaluaciones. La uniformidad del fertilizante es en todos los casos marcadamente inferior a la del agua. Esto es una clara indicación de que en este caso hubiera sido más interesante mezclar fertilizante y agua durante todo el riego. Las abultadas diferencias en los parámetros de infiltración de las tres evaluaciones no permiten evaluar la aplicación del fertilizante como la única diferencia entre éstas, por lo que no se puede en rigor tomar partido por una estrategia de aplicación del fertilizante para este caso. Sin embargo, es probable que la mejor práctica estuviera en este caso alrededor del 33%, si la infiltración hubiera sido similar a la de las otras dos evaluaciones. En las condiciones del

ensayo ésta es la evaluación que presenta una peor uniformidad tanto para el agua como para el fertilizante.

Tabla 3. Uniformidad de distribución (DU, %) del riego y del fertilizante para los ensayos de aplicación del fertilizante al 0, 33 y 50% de avance.

Evaluación	DU (%)	DU (%)
	Agua	Fertilizante
0%	72	20
33%	32	10
50%	58	21

Conclusiones

El elevado número de variables que suman el manejo del riego y el del fertilizante hace que el enfoque experimental tenga un valor limitado a la hora de determinar la mejor estrategia de fertirriego. En este caso, la variabilidad de la infiltración ha impedido extraer conclusiones sólidas siquiera para un caso particular. Los trabajos actuales se orientan hacia la elaboración de un modelo del fertirriego por superficie basado en el análisis aquí expuesto. Si se pudiera contar con un modelo de estas características se podría determinar para cada riego la combinación de tiempos de inicio y final de la aplicación que optimizaran la uniformidad del fertilizante. De la misma manera, se podría estudiar la optimización conjunta de riego y fertilización en base a variables fácilmente controlables por el agricultor, como el tiempo de riego y la posibilidad o no de escorrentía superficial. La realización de experimentos como los aquí presentados será de vital importancia para la calibración y/o validación de tales modelos.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a todos los que nos ayudaron a realizar el trabajo de campo : Miguel Izquierdo, Jesús Gaudó, Antonio Basa, becarios del Laboratorio y estudiantes de la EUITA de La Almunia, entre otros.

Bibliografía

- Cameira, M. R., Sousa, P. L., Santos, D. V., 1996. *Gestão integrada da rega e da fertirrega com recurso ao modelo RZWQM*. En: III Seminario Luso-Espanhol "A água e a agricultura mediterrânica", Vilamoura, Portugal.
- Jaynes, D. B., Rice, R. C., Hunsaker, D. J., 1992. *Solute transport during chemigation of a level basin*. Trans. ASAE., 35(6), 1809-1815.
- Merriam, J. L., Keller, J., 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Utah State University, Logan, Utah. 271 pp.
- Sousa, P. L., Simoes dos Santos, D., Cameira, M. R., 1993. *Fertirrega, aplicação de fertilizantes em sistemas de rega de gravidade*. En: "Desenvolvimento de equipamentos mecanizados para rega de gravidade", P. L. Sousa, Cameira, M. R., (Eds.). Lisboa. 149 pp.
- Walker, W. R., Skogerboe, G. V., 1987. *Surface irrigation. Theory and practice*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 386 pp.
- Walker, W. R., 1993. *SIRMOD, Surface irrigation simulation software*. Utah State University. Logan, Utah. 25 pp.

"ESTUDIO HIDROGEOLOGICO-ESTRUCTURAL E INSTALACION DE UNA RED AUTOMATIZADA DE CONTROL EN LA ZONA REGABLE DE LA MORAÑA (AVILA)

Javier Bengoechea Peré (*)
Alvaro Martínez Alvarez (*) P
Francisco José López Mendieta (**)
Juan Martínez Rubio (***)

Resumen:

Esta comunicación se centra sobre los últimos trabajos realizados por la Dirección General de Estructuras Agrarias, Consejería de Agricultura y Ganadería (Junta de Castilla y León), en la Comarca de La Moraña.

Los planes de transformación a partir del embalse de Las Cogotas, situado en el río Adaja aguas abajo de Avila capital, contemplan la implantación progresiva de sectores de La Moraña en regadío con aguas superficiales. Esto supondrá unas importantes incidencias en el régimen hidrológico subterráneo de la zona, que se considera de interés controlar y evaluar.

La investigación planteada se ha centrado en las siguientes actuaciones:

- Análisis hidrogeológico-estructural del sistema acuífero: Se ha realizado un completo análisis estructural del basamento cristalino de este sector de la Cuenca del Duero, basado en geofísica (gravimetría) y teledetección. Con este estudio se ha tratado de definir la evolución tectónica del zócalo y, en consecuencia, de los paleoambientes sedimentarios que controlaron el relleno de la Cuenca, y que por tanto condicionan la hidrogeología del sistema.
- Definición e implantación de una moderna red automática (1ª fase) de control de piezometría y calidad, dentro y en el entorno de la primera fase de transformación del regadío del Adaja.

En esta comunicación se resumen dichas actuaciones, que demuestran la importancia del análisis multidisciplinar en la gestión de los recursos hídricos aplicados a zonas regables.

Abstract:

This communication describes the recent studies accomplished by the Dirección General de Estructuras Agrarias, Consejería de Agricultura y Ganadería (Castilla y León Government) in the area of La Moraña (Avila).

The irrigation schemes associated to Las Cogotas damp, downstream from Avila city, conceive the progressive implementation of irrigation with surface water of the different sectors of La Moraña.

The investigation has been focused on:

- Structural hydrogeological analysis of the aquifer system. An intensive structural analysis of the crystalline basement has been carried out using geophysics (gravimetry) and remote sensing techniques. This study has been used to define the tectonic evolution of the basement and consequently the evolution of the sedimentary paleo-ambient that controlled the filling of the basin conditioning the hydrogeology of the system.
- Design and implementation of a modern automatic network (1st. phase) to control the piezometry and quality of the area of the first irrigation sector of the Adaja scheme.

This communication summarizes all the activities undertaken, stressing the importance of the multidisciplinary analysis in the integrated planning and management of the hydraulic resources of irrigation areas.

* *Dcs. I. Agrónomos. Consejería de Agricultura y Ganadería. Dirección General de Estructuras Agrarias. Junta de Castilla y León.*

** *Geólogo TRAGSA*

*** *Geólogo TRAGSATEC*

1.- OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO REALIZADO

Dentro de los programas de actuación que en materia de aguas subterráneas y regadíos desarrolla la Dirección General de Estructuras Agrarias de la Consejería de Agricultura y Ganadería de la Junta de Castilla y León, se lleva realizando desde 1994 el "*Proyecto de actualización y ampliación de medidas piezométricas en la zona de La Moraña (Avila), 1ª fase*". Los trabajos han sido realizados por las empresas TRAGSA y TRAGSATEC, con la colaboración de C.G.S., la facultad de C.Geológicas de la Universidad de Zaragoza y RAMTOR S.A. Los objetivos propuestos en el proyecto fueron:

- * Definición estructural del zócalo cristalino, con análisis de su evolución tectónica y de su incidencia en la cobertera terciaria que constituye el sistema acuífero multicapa. En definitiva se trataba de analizar la influencia de la dinámica estructural del zócalo, tanto en la evolución de los ambientes sedimentarios durante el Terciario, como la de los rejuegos posteriores. Con ello podría avanzarse en el conocimiento hidrogeológico del sistema acuífero, estableciendo si existe o no una cierta zonificación de origen paleogeográfico y/o estructural, que condicione la heterogeneidad detectada en los sondeos realizados en la zona.
- * Actualización y ampliación de la red automática de control piezométrico y de calidad de aguas de La Moraña. Aunque en origen el Proyecto contemplaba la utilización de la red automática instalada en 1986 por la Junta de Castilla y León, posteriormente se decidió instalar una nueva red, en función de los resultados del estudio estructural y de las nuevas necesidades. La nueva red se ha diseñado con los objetivos esenciales de controlar la evolución del sistema acuífero en los futuros sectores regables con la presa de Las Cogotas, y en su área de influencia, así como comprobar algunas de las conclusiones del estudio estructural.

2.- METODOLOGIA Y TRABAJO REALIZADO

Los trabajos realizados han sido:

- Recopilación de los trabajos geológicos hidrogeológicos y geofísicos realizados en la zona.
- El análisis estructural se ha realizado desde dos vías independientes: un estudio geofísico mediante gravimetría, y un estudio fotogeológico. En esta comunicación se realiza la síntesis de ambos trabajos.
- Revisión de la antigua red piezométrica de La Moraña, y definición de la nueva red.
- Implantación y puesta en servicio de la nueva red de control (1ª fase).

3.- ESTUDIO HIDROGEOLOGICO-ESTRUCTURAL

Para el análisis hidrogeológico de la zona de estudio, la información básica necesaria era el conocimiento de la estructura del zócalo y su evolución tectónica. El fracturamiento

en bloques y sus reactivaciones y rejuegos condicionaron, sin duda alguna, los ambientes deposicionales, durante el Terciario y Cuaternario.

El conocimiento de la estructura actual y de la evolución tectónica durante el relleno de la cuenca, permitirán avanzar en la definición hidrogeológica de la zona. En una simplificación, se trata de identificar los umbrales y surcos de los sucesivos ambientes paleogeográficos, que condicionaron la organización de las redes aluviales-coluviales, y por tanto las facies deposicionales del Terciario.

Para ello se ha realizado un análisis desde dos vías: por una parte un estudio fotogeológico, basado en teledetección (fotos satélite y aéreas) y campaña de campo, y por otra de una campaña de prospección geofísica basada en un estudio gravimétrico.

Dadas las limitaciones de extensión de la presente comunicación nos limitaremos a resumir a continuación algunos de las conclusiones más relevantes de estos estudios:

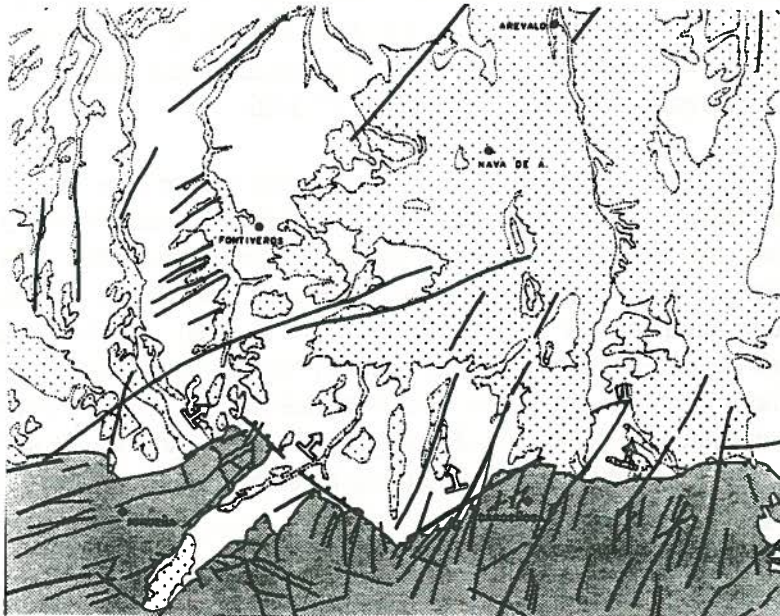


FIGURA 1: ESQUEMA GEOLOGICO-ESTRUCTURAL DEL AREA DE ESTUDIO

3.1.- SINTESIS DEL ESTUDIO FOTOGEOLOGICO

Este estudio estructural se ha centrado esencialmente en la fracturación del área, y ha sido realizado con la colaboración del profesor J.L.Simón, de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad de Zaragoza. El objetivo fundamental es determinar las direcciones de fracturación de la zona a todas las escalas, definiendo y caracterizando familias y sistemas de acuerdo con sus aspectos geométricos y su posible significado tectónico. Asimismo se trataba de identificarse los posibles accidentes mayores que afectan al Terciario o a su sustrato, llegando finalmente a una interpretación de la evolución tectónica

del área durante el Terciario y su eventual prolongación en tiempos cuaternarios. Por esta vía podrían determinarse los patrones del flujo de agua subterránea en la zona

La región de La Moraña formó parte, durante el Mioceno, del sector meridional de la cuenca terciaria del Duero. En ella se acumularon potentes espesores de sedimentos finos de carácter arcósico provenientes del desmantelamiento erosivo del Sistema Central. Desde el inicio del Mioceno esta cadena se había levantado e individualizado de la Cuenca del Duero, si bien es a comienzos del Mioceno superior cuando experimenta la tectónica más violenta, determinada por una compresión SE a SSE proveniente del margen sur de la Placa Ibérica. Muchas de las antiguas fallas tardihercínicas son reactivadas como desgarres o cabalgamientos, formando algunas de ellas el propio borde cabalgante del Hercínico del Sistema Central sobre el Terciario de la Cuenca del Duero.

El campo compresivo SSE se mantuvo probablemente durante todo el Neógeno y Cuaternario. No obstante, la tendencia evolutiva hacia un régimen progresivamente más distensivo (tendencia que se da a escala peninsular) pudo producir eventualmente intercambios de los ejes de esfuerzos máximo e intermedio (σ_1 y σ_2), manteniendo un campo de esfuerzos coaxial y, concretamente, un eje de extensión σ_3 constante en dirección E a ENE. A este marco tectónico se superpuso un segundo mecanismo que tenía su propia dinámica: el levantamiento isostático del Sistema Central.

Cada uno de estos mecanismos dió lugar a un sistema de fracturas distinto. El levantamiento isostático produjo rejuegos de componente vertical de forma indiscriminada sobre todas las familias de fallas presentes ya en el Hercínico: NNE, ENE y ESE. Los bloques de basamento delimitados por estas fallas se hundieron de modo diferencial controlando la sedimentación en la cuenca terciaria, al igual que lo venían haciendo en contexto compresivo ya desde el Paleógeno. Sus movimientos indujeron en los materiales miocenos leves basculamientos, a la vez que sistemas de fracturas de pequeña escala con aquellas mismas orientaciones. Algunas de las grandes líneas de fractura se "transparentan" en forma de lineamientos visibles en las imágenes de satélite, que siguen asimismo esas tres direcciones principales.

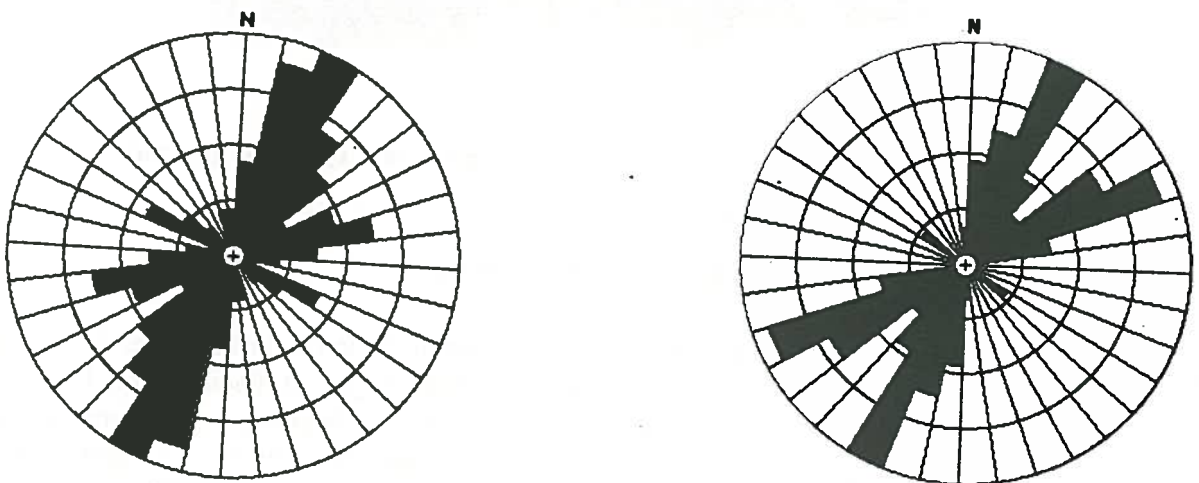


FIGURA 2: DIAGRAMAS DE FRECUENCIAS DE FALLAS IDENTIFICADAS EN LA ZONA

Por su parte, el **campo de esfuerzos intraplaca** tuvo un doble resultado en la fracturación. En primer lugar, produjo una reactivación preferente de la familia preexistente N a NNE, la de orientación más propicia para moverse bajo una extensión E a ENE. Esta preferencia pudo manifestarse tanto a escala macro como, sobre todo, microestructural, haciendo que la familia de fracturas N a NNE sea, de hecho, la dominante en la zona. En segundo lugar, dio origen a fracturas de neoformación a escalas micro y mesoestructural, que sistemáticamente se orientan **NNW-SSE** allí donde no registran la influencia de grandes accidentes cartográficos capaces de desviar las trayectorias de esfuerzos. Las fracturas NNW y NNE se distinguen bien en general a escala de afloramiento, si bien en el conjunto regional han acabado confundándose en un único máximo en torno a N-S.

Ambos mecanismos tectónicos debieron de funcionar simultáneamente durante gran parte del Neógeno y Cuaternario. No obstante, hay varios datos que sugieren que el desarrollo del sistema de fracturas N-S ha tenido continuidad hasta tiempos más recientes. Por un lado está el propio predominio de dicha dirección en todos los diagramas de frecuencia de fracturas, incluido el que corresponde a la única estación en materiales cuaternarios. Por otro, la relación cronológica local observada en la estación 11, donde las fracturas SSE parecen posteriores a las NE (desplazan o se interrumpen en éstas).

3.2.- SINTESIS DEL ESTUDIO GEOFISICO-ESTRUCTURAL

Para el análisis estructural de la zona de La Moraña la técnica geofísica empleada ha sido *gravimetría*. El objetivo planteado era la determinación de la geometría y estructuración del basamento cristalino, para llegar a través de modelización, a detectar la compartimentación del terciario detrítico reflejo de la estructura en bloques del zócalo.

Se han medido un total de 1.500 estaciones y seis bases gravimétricas. El equipo empleado ha sido un gravímetro **SODIN 226-T**, con sensibilidad de 0.01 miligales. Los datos se han tratado con los programas **GRAVIM** y **CONOS**, generándose con **SURFER** y **AUTOCAD** los mapas de resultados. Los trabajos han sido desarrollados con la colaboración de la empresa C.G.S.

Sin entrar en esta comunicación en detalles sobre el fundamento teórico del sistema ni en la complejidad de su interpretación, los resultados obtenidos se han plasmado en una serie de mapas de anomalías gravimétricas (anomalías de Bouguer y anomalías residuales). La interpretación cualitativa de los mapas generados proporciona datos sobre los conjuntos litológicos y sus relaciones estructurales.

Las conclusiones del estudio geofísico se resumen a continuación:

- El estudio gravimétrico ha permitido la definición de un modelo estructural que es bastante coherente con la información de la geología regional, lo que evidencia tanto su validez metodológica como la corrección en la toma y procesado de los datos.
- Quedan perfectamente diferenciados los dos grandes conjuntos litológicos en los mapas de anomalías de Bouguer y Residual.

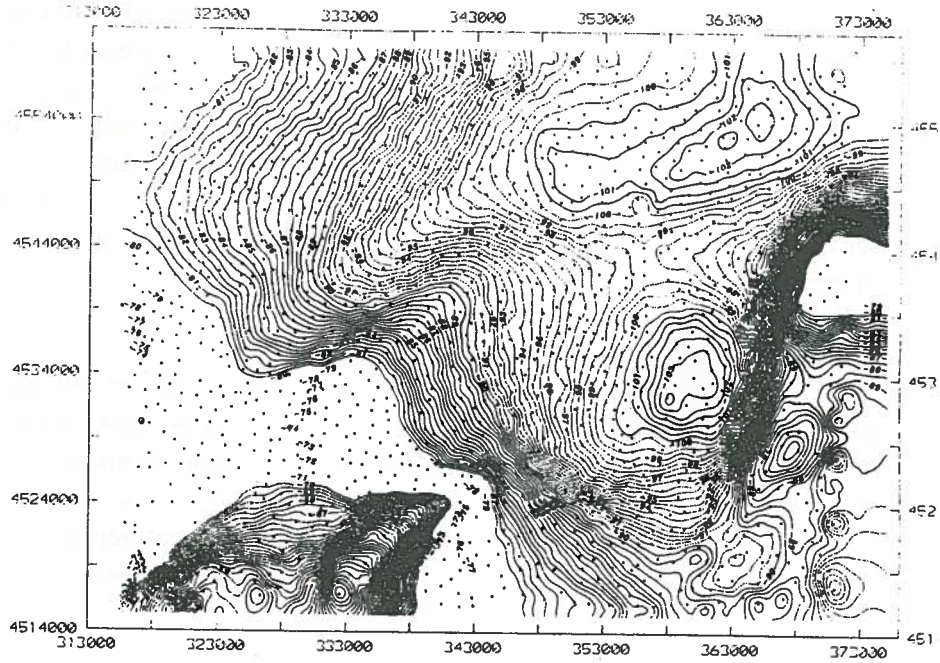


FIGURA 3: EJEMPLO DE MAPA DE ANOMALIAS DE BOUGUER

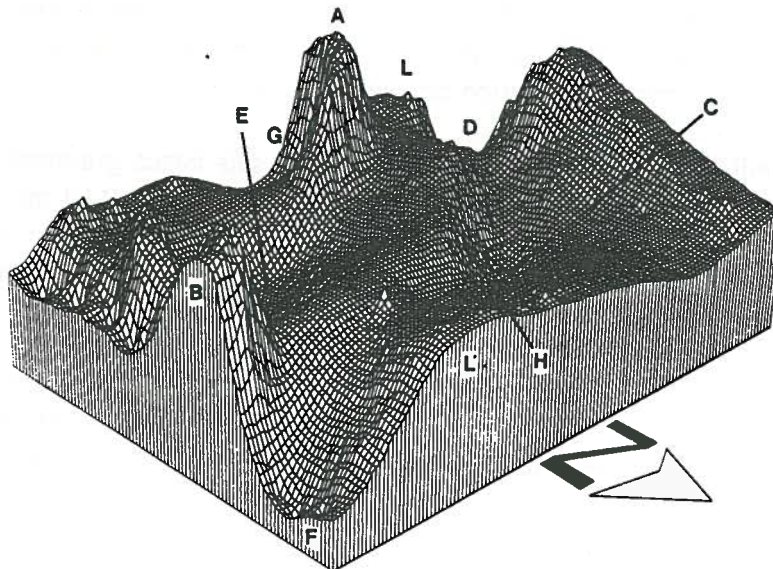


FIGURA 4: REPRESENTACION 3D DE ANOMALIA DE BOUGUER

- En los modelos gravimétricos queda identificada la distribución de umbrales y surcos, destacándose su aceptable correlación con los accidentes estructurales regionales (fosa de Muñico, dique de Plasencia, etc).

- Las estimaciones de los espesores de los materiales detríticos oscilan entre pocos metros (umbral de Muñico) y más de 2.000 m (sector de Tiñosillos), si bien estos valores proceden de la modelización realizada, y deben ser contrastados (SEDT, sísmica de reflexión, sondeos de investigación)

- El análisis geológico estructural define así la compartimentación del zócalo cristalino en el área de estudio, con zonas de umbrales y surcos de dirección dominante SO-NE delimitadas por fracturas tardihercínicas reactivadas en las etapas alpinas. Estas fracturas tienen su reflejo en superficie en lineamientos de gran magnitud, o en bandas de gran densidad de lineamientos menores. Lógicamente esta actividad tectónica habrá condicionado la sedimentación de los tramos finales de la serie neógena, al menos en el sector central de la Cuenca del Duero.

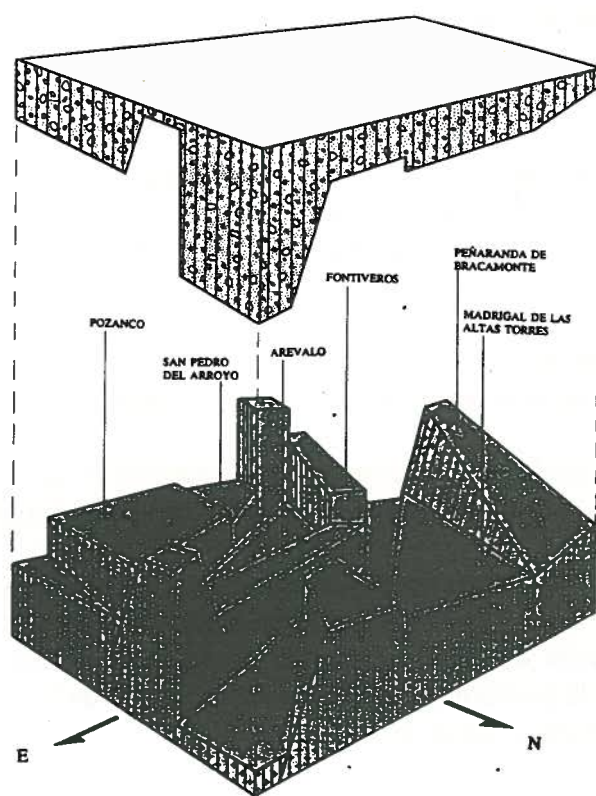


FIGURA 5: MODELIZACION ESTRUCTURAL A PARTIR DE LA INFORMACION GEOFISICA

4.- ESTABLECIMIENTO DE LA RED AUTOMATIZADA DE CONTROL DE PIEZOMETRIA Y CALIDAD

Entre 1985 y 1986 la Junta de Castilla y León diseñó e instaló en la comarca denominada La Moraña una red automatizada de control de piezometría y calidad de aguas

subterráneas, con objeto de tratar de identificar los problemas de progresivo descenso de los niveles en los sondeos de la zona. Esta red constó de 12 sondeos, en los que se establecieron distintas sondas. Desafortunadamente esta red apenas estuvo operativa durante un año, abandonándose su control y mantenimiento posteriormente por causas de diversa índole. Sin embargo, en el corto periodo de operatividad, suministró una serie de datos que, unidos a los tomados por el ITGE en su antigua red piezométrica, ya avanzaron información sobre el heterogéneo comportamiento hidrogeológico de la zona, que hacía pensar en la posibilidad de cierta compartimentación.

Originariamente el "*Proyecto de actualización y ampliación de medidas piezométricas en la zona de La Moraña (Avila), 1ª fase*" contemplaba la revisión, ampliación y puesta en funcionamiento de dicha red. Sin embargo, ante el deterioro de algunos de los equipos, y la desaparición incluso de otros, se decidió finalmente construir una nueva red, basada en los siguientes criterios:

- La nueva red se instalaría sobre sondeos suficientemente conocidos, y de características lo más homogéneas posibles, además de ser representativos de la captación-tipo de la zona.
- Los equipos (sondas y data logger) instalados en campo deberían cumplir las máximas exigencias en cuanto a resistencia a intemperie y autonomía operativa. Además deberían quedar instaladas de forma que dificultaran el acceso a personas no autorizadas.
- Dada la imposibilidad de cubrir toda la zona estudiada, se localizarían en lo posible sondeos que permitieran alcanzar los siguientes objetivos:
 - 1.- Analizar las diferencias de comportamientos entre las distintas subzonas, separadas por los umbrales, detectadas en el estudio geológico-estructural.
 - 2.- Servir de futura infraestructura de control de la respuesta del sistema acuífero, ante las modificaciones que causará en el régimen hídrico (disminución de las extracciones, incremento de los recarga procedente de retornos) la prevista transformación en regadío de la Zona Regable del Adaja, con aguas de la presa de Las Cogotas.

De forma esquemática el sistema consta de tres elementos:

- **Estaciones automáticas de medida:** Incluyen las sondas y equipos de medición de nivel y del resto de los parámetros, así como los elementos de almacenamiento de datos.
- **Equipos de adquisición de datos:** Mediante estos equipos se realizará la succión de los datos almacenados en las unidades de memoria de las estaciones, y su posterior procesado o volcado al sistema central de proceso y análisis.
- **Equipo y sistemas lógicos de proceso de datos:** Permitirá el procesado y explotación de la información recogida por la red.

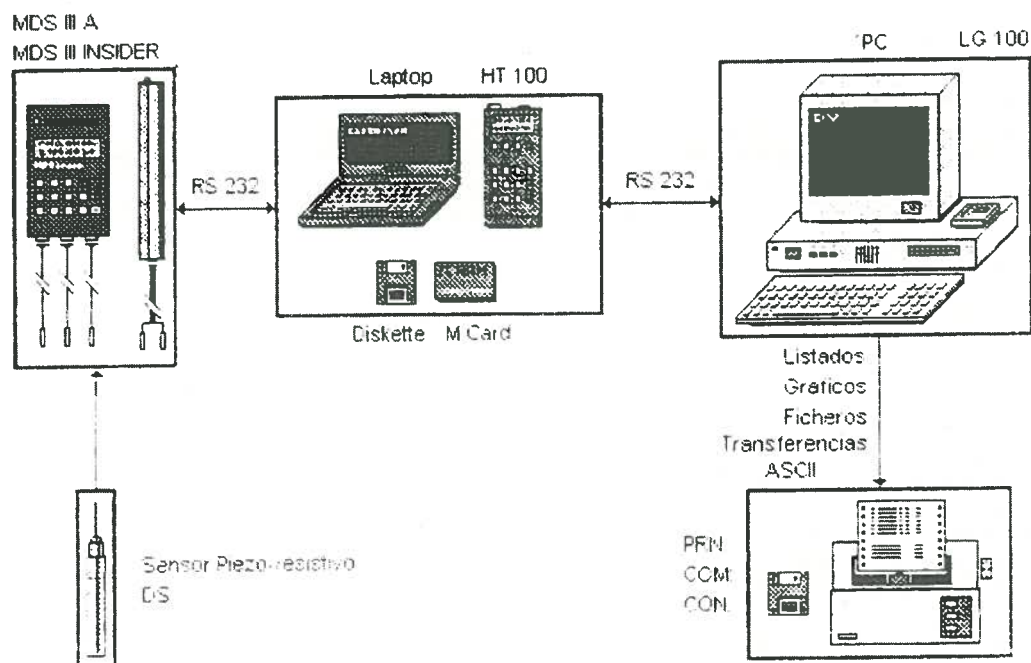


FIGURA 6. ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA INSTALADO

Los equipos han quedado instalados en el interior de arquetas, de diseño específico para protección de intemperie y antivandálica.

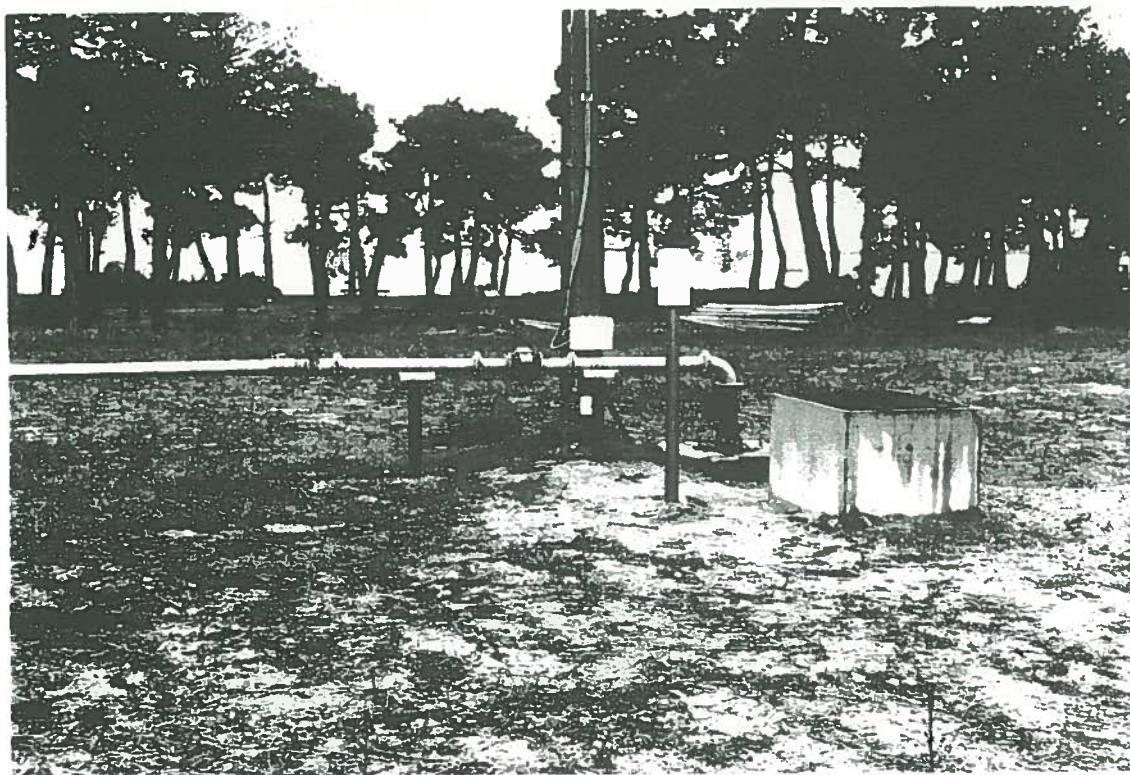


FIGURA 7. INSTALACION DE CONTROL MULTIPARAMETRICA DEL SONDEO PALACIOS RUBIOS

Los equipos instalados en esta primera fase han sido los siguientes:

Nº	T.MUNICIPAL	PROF.	NIV.	CON.	TEM.	CAU.	PLUV
1	San Vicente de Arevalo	223	****	****			
2	Palacios Rubios	204	****	****	****	****	****
3	Noharre	212	****	****			
4	Aldeaseca	450	****	****			
5	Langa	170	****	****			
6	Barromán	153	****	****			
7	Sinlabajos	220	****	****	****	****	****
8	Moraleja de Matababras	204	****	****			

La adquisición de datos puede realizarse mediante dos sistemas: una tarjeta de memoria RAM, o bien un terminal portátil específico, el HT 100, que permite además una interpretación "in situ", así como la reprogramación del equipo de medida.

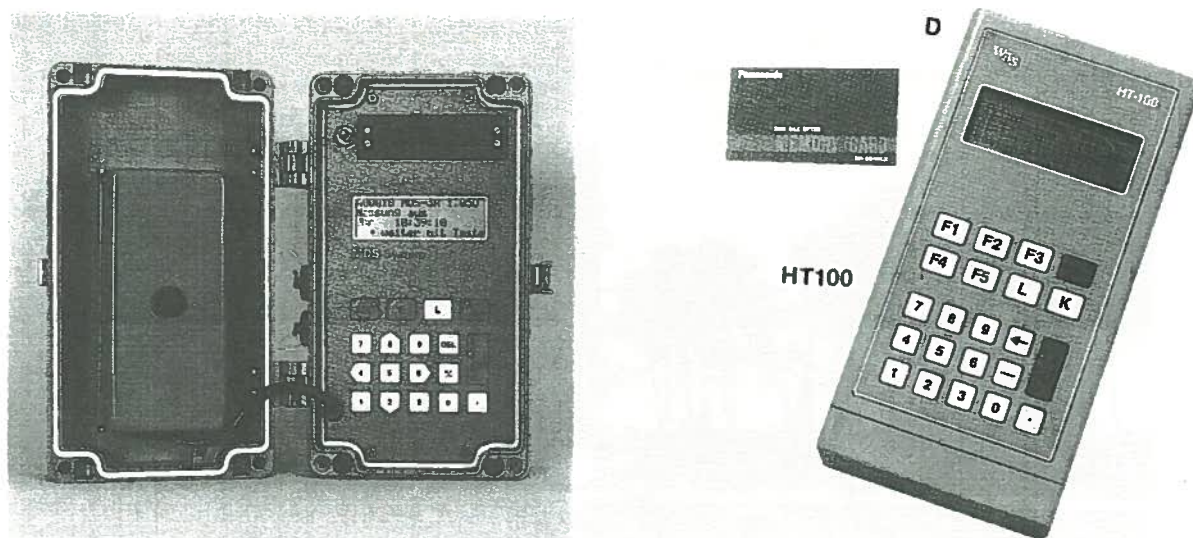


FIGURA 8: DATA LOGGER MPS 3, TARJETA DE MEMORIA RAM Y TERMINAL HT 100

Para el procesado y explotación suministrada por la red se ha instalado un sistema informático, compuesto por un ordenador PC de arquitectura PENTIUM y 16 Mb de RAM, en el que se ha instalado las aplicaciones específicas MGMTS/Win y MLMDS/Win. Estos programas, que pueden trabajar tanto en entorno WINDOWS como en DOS, permiten el proceso completo, numérico y gráfico. Los gráficos y listados múltiples obtenidos constituyen una valiosa herramienta en el análisis hidrogeológico de la zona cubierta por la red.

5.- RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los resultados de los trabajos desarrollados en el Proyecto a que se refiere la presente comunicación se resumen en los siguientes puntos:

- La información obtenida del estudio geológico-estructural permite delimitar los sectores potencialmente más interesantes desde el punto de vista hidrogeológico, que se corresponden con los surcos o fosas estructurales del zócalo. En cualquier caso se insiste en que el modelo estructural propuesto queda pendiente de calar mediante técnicas geofísicas alternativas (prospección sísmica, SEDT) y/o sondeos de investigación.

Otros estudios que se están realizando en la zona, y que contemplan un importante esfuerzo en análisis y correlación de columnas estratigráficas de sondeos, permitirán también establecer la validez del modelo.

- Respecto a la red automatizada, que está totalmente operativa desde principios del presente año, habrá que esperar cierto tiempo para comprobar su eficacia. De todas formas se prevé ir aumentando en fases sucesivas el número de sondeos de la red de control, de forma que se cubran los objetivos propuestos.

EFECTO DEL PERIMETRO MOJADO SOBRE LA INFILTRACION EN EL RIEGO POR SURCOS

Palomo, M.J.^{1,2} (P); N.A. Oyonarte³; L. Mateos¹ y J. Roldán²

RESUMEN

Este trabajo analiza el efecto de la variación en el perímetro mojado durante el riego por surcos sobre la infiltración. Con esta finalidad se han llevado a cabo dos ensayos de campo con infiltrómetros sobre surcos bloqueados (PM-I y PM-II) y se ha calibrado un modelo para tratar de relacionar la infiltración acumulada con el perímetro mojado. Este modelo proporciona una dependencia no lineal entre ambas variables (un incremento en el perímetro mojado produce un incremento en la infiltración, pero en menor proporción que el del perímetro mojado).

Además se analizaron dos características del suelo (resistencia a la penetración y textura), con el objeto de analizar si su variación dentro del campo de estudio podía explicar la variación de la infiltración no atribuible al perímetro mojado. Ninguna de las propiedades mencionadas explican la variabilidad espacial de la infiltración.

SUMMARY

Infiltration under surface furrow irrigation, was investigated in this study. Two field tests were carried out to study the effect of wetted perimeter on infiltration (PM-I and PM-II). Blocked furrow infiltrometers were used to carry out all test. A model was calibrated to obtain the relationship between cumulative infiltration and wetted perimeter. The main conclusion was that the aforementioned relationship is no lineal (if wetted perimeter is increased, infiltration is increased too, but this increment is smaller).

Furthermore, two soil characteristics (resistance to penetration and texture) were studied, in order to know if their spatial variation is the responsible of the experimental infiltration data variation, in the part that wetted perimeter is no responsible. However, no relationship was found.

1. INTRODUCCION.

A pesar de lo extendido que se encuentra el riego por superficie, su bajo rendimiento hace necesario un esfuerzo investigador para intentar explotar su potencial de eficiencia, mejorando el diseño y manejo de estos sistemas de riego. Con respecto al manejo, acciones tan sencillas como las de usar caudales próximos a los óptimos o como el recorte de caudal, no sólo están al alcance de cualquier regante, sino que además son práctica común entre muchos agricultores.

(1) CSIC, Instituto de Agricultura Sostenible, Córdoba. (2) Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.
(3) Tecnirriegos S.A., Córdoba.

La necesidad de considerar el efecto del perímetro mojado (PM) sobre la infiltración en el riego por surcos es reconocida por numerosos investigadores, pero su inclusión en los modelos no está generalizada. Esta necesidad se deriva de la variación espacial y temporal del PM durante el riego por surcos, y de la reducción que en este PM se provoca al hacer recorte de caudal, práctica recomendable en el riego por escurrimiento para disminuir la escorrentía.

1.1. Funciones de infiltración para riego por surcos.

La infiltración en canteros es principalmente un proceso unidimensional, existiendo varias funciones con base física que la describen (Green y Ampt, 1911; Richards, 1931; Philip, 1957). Sin embargo, la infiltración en surcos es un proceso de dos dimensiones, y es más difícil de simular. Algunos autores (Fok y Chiang, 1984; Fonteh y Podmore, 1993; Tabuada y col., 1995) desarrollaron incluso modelos bidimensionales para surcos, pero, probablemente ninguno es tan versátil como las relaciones empíricas de Kostiakov y de Kostiakov-Lewis, siendo la segunda de ellas:

$$Z = k \cdot t^a + f_o \cdot t \quad (1)$$

donde Z es la infiltración acumulada (m^2), t el tiempo de contacto (min), k (m^2/min^a) y a parámetros empíricos y f_o (m^2/min) la infiltración básica.

Para estudiar el efecto del cambio de calado y por tanto del PM en la infiltración, diversos autores (Fangmeier y Ramsey, 1978; Strelkoff y Souza, 1984; El Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de EEUU (Walker, 1989); Blair y Smerdon, 1987; Schwankl y Wallender, 1988) utilizaron modelos que calculaban la infiltración acumulada en un punto con ecuaciones de la siguiente forma:

$$Z = (k \cdot t^a + f_o \cdot t) \cdot PM^b \quad (2)$$

siendo PM el perímetro mojado y b un coeficiente que ha sido considerado igual a la unidad en la mayoría de los casos, lo cual implica una relación lineal entre Z y PM .

1.2. Variabilidad de la infiltración en riego por surcos.

Normalmente los modelos de riego por superficie consideran que la variación del agua infiltrada se debe únicamente a la variación del tiempo de contacto; sin embargo, la variabilidad que se observa en la realidad es mayor que la que se obtiene de considerar dicho tiempo como única fuente de variación (Schwankl y Wallender, 1988; Childs y col., 1993; Oyonarte y Mateos, 1994). En el caso de riego por surcos esto se debe a dos factores, que son la variabilidad de las características de infiltración del suelo y la variación del PM a lo largo del surco. Según Izadi y Wallender (1985), aproximadamente una tercera parte de la variabilidad de la infiltración se puede explicar por diferencias en el PM, siendo el resto atribuible al error de medida y a la variabilidad del suelo. También Jaynes y Clemmens (1986) y Oyonarte y Mateos (1995) analizaron la variabilidad de la infiltración descomponiéndola en diferentes términos. Estos últimos autores encontraron que para el primer riego la variación del tiempo de contacto explica del orden de un 10% de la variación en la infiltración, mientras que PM y variabilidad del suelo llegan a explicar hasta un 25 y 65 % de la variación total respectivamente, llegando a ser esta última la causa de casi el 100% de la variabilidad encontrada en suelos previamente regados.

La variabilidad temporal y espacial de las características del suelo crea problemas a la hora de predecir los parámetros de infiltración. Desde el punto de vista práctico, esto se ha resuelto utilizando curvas de infiltración medias ajustadas de forma que el avance simulado se aproxime al real. En este sentido cabe mencionar el trabajo de Pérez y col. (1995) por haberse desarrollado en parcelas próximas a los campos en los que se han hecho nuestros ensayos.

1.3. Objetivos.

En este trabajo se plantean los siguientes objetivos:

- * Calibración de un modelo que permita simular la variación de la infiltración como consecuencia de los cambios de perímetro mojado.
- * Cuantificación de la contribución de la variación del PM a la variabilidad de la infiltración.

2. MATERIALES Y METODOS.

2.1. Ensayos de infiltración.

Los ensayos se realizaron sobre un suelo franco del Centro de Investigación y Desarrollo Agrario (CIDA) de Córdoba, utilizando segmentos de surco bloqueados.

Se llevaron a cabo dos ensayos (PM-I y PM-II), cada uno de ellos en condiciones de primer y segundo riego, que compararon tres tratamientos consistentes en perímetros mojados de aproximadamente 15, 25 y 40 cm. El diseño estadístico utilizado fue bloques al azar con tres o cuatro repeticiones, siendo 20 el número total de determinaciones de infiltración. No se realizaron nunca riegos propiamente dichos, sino ensayos sobre un suelo en condiciones de primer y segundo riego, dejando transcurrir una semana entre ambos y localizándolos en los mismos puntos de medida.

2.2. Infiltrómetros.

Los ensayos se llevaron a cabo mediante infiltrómetros de surco bloqueado (figura 1). Las medidas se realizaron sobre un surco (4) no pisado por el tractor durante el asurcado, situado entre dos surcos borde (5) para simular en lo posible una situación de riego real. Los tramos de surco regados eran aproximadamente de 1.5 m. El segmento controlado se encontraba centrado en el surco intermedio y delimitado por dos placas de hierro (6) que se introducían verticalmente hasta una profundidad de 45 cm aproximadamente. Para obtener el efecto borde deseado se hacían caballones (1) a 0.5 m de distancia de las placas metálicas, aguas arriba y aguas abajo, de forma transversal al surco, tanto en el central como en los dos laterales.

Con el fin de controlar la cantidad de agua aplicada en el surco, se emplearon depósitos (9) que llevaban instalados en su parte inferior un tubo de salida (7) con un grifo para facilitar su manejo, y una boya articulada que permitiese mantener el calado deseado en el surco. Además, en un lateral, se colocó un tubo de material transparente junto a una regla en la cual

se contabilizaban los descensos de nivel producidos. El depósito así equipado se situaba aguas arriba del tramo de control, sobre unos tablones (8) colocados de forma perpendicular a la línea del surco y que a su vez apoyaban sobre tablas (10) dispuestas paralelamente al mismo sobre terreno seco, con lo que se evitaba el hundimiento del depósito al humedecerse el suelo. La posible erosión producida por la presión del agua se evitaba con láminas de plástico (2) colocadas sobre los surcos durante el llenado.

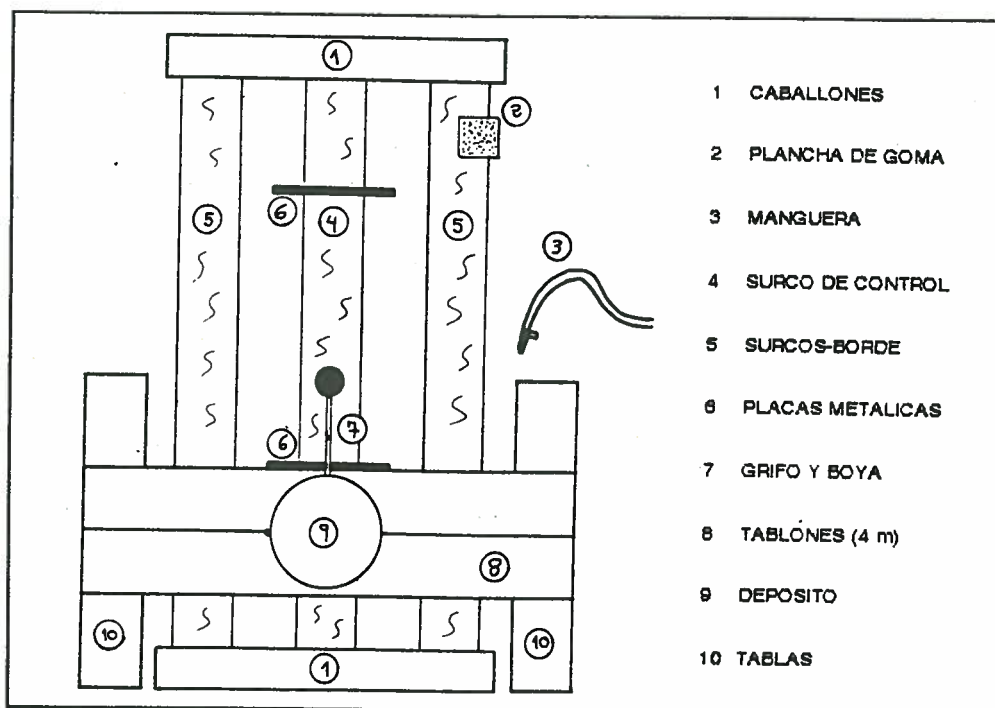


FIGURA 1. Esquema de la instalación en campo de los materiales para el ensayo (planta).

Para distribuir el agua se partía de una toma de la red de riegos del CIDA, a la que se conectaba una tubería de aspersión que se extendía por toda la longitud del campo, y en la que se colocaban mangueras (3) que permitían disponer de agua a la altura de cada infiltrómetro. Los ensayos comenzaban midiendo aproximadamente el perímetro mojado (PM) que se deseaba obtener, posteriormente se llenaba el depósito con las mangueras, y a la vez que se llenaban de agua los surcos borde, se procedía a abrir el grifo del depósito, a anotar el tiempo de inicio y a regular la boya para que el calado se mantuviese constante. Una vez estabilizado el nivel, se comenzaba a tomar pares de valores tiempo-descenso de nivel del agua, lo que permitiría posteriormente obtener las curvas de infiltración correspondientes. Con el fin de poder calcular la infiltración básica, la duración mínima del ensayo se fijó en cinco horas, durante las cuales se anotaban los valores antes mencionados y se mantenían los surcos laterales con el mismo calado que el central.

2.3. Análisis del terreno posterior al riego.

Una vez completamente seco el suelo, se hicieron diferentes medidas dentro del surco de control:

* Geométricas: medición de la distancia exacta entre placas metálicas, de la anchura de la arista superior de la sección mojada (en 8 puntos) y de los perfiles transversales a lo largo

del segmento de surco (en 4 puntos).

* Resistencia del suelo a la penetración, para lo que se utilizó un penetrómetro portátil de accionamiento manual (Agüera, 1986), que proporciona el valor del índice de cono (IC) de acuerdo con el estándar de ASAE. El intervalo de medida fue de 0-50 cm de profundidad y 0-5 MPa de IC, y se realizaron 2 medidas en cada segmento bloqueado.

* Edáficas: se tomaron muestras de suelo en cada una de las localizaciones de las pruebas de infiltración, con objeto de analizar su textura.

2.4. Modelos de infiltración y ajuste de parámetros.

El modelo de infiltración que se utiliza en este estudio es el de Kostiakov-Lewis (ecuación 1). El ajuste de este modelo a los datos de campo se hizo mediante regresión lineal (después de la transformación correspondiente) una vez que se hubo obtenido independientemente f_0 a partir de la pendiente de la fase final recta de las curvas de infiltración acumulada, de acuerdo con las recomendaciones de Walker (1989).

El modelo que se empleó para investigar el efecto del PM sobre la infiltración se basa en la ecuación antes mencionada multiplicada por un factor que depende del PM del surco:

$$Z = (k \cdot t^a + f_0 \cdot t) \cdot \left(\frac{PM}{PM_r} \right)^b \quad (3)$$

siendo k , a y f_0 los parámetros de la ecuación de infiltración obtenida en un surco con perímetro mojado PM_r , PM el perímetro mojado del surco en el que se quiere conocer la infiltración (m), PM_r el perímetro mojado del surco de referencia (m) (ver apartado 3.1.), que se corresponde con la ecuación de infiltración entre paréntesis y b un exponente adimensional que se pretende ajustar en este trabajo.

Este modelo es una modificación realizada por Oyonarte y Mateos (1995) del propuesto por Blair y Smerdon (1987). La ecuación 3 tiene tres variables (Z , t y PM) y cinco parámetros, tres que definen la ecuación de Kostiakov-Lewis de referencia (k , a , f_0), un cuarto (PM_r) que es el PM correspondiente a esta función de referencia, y un quinto (b) que refleja como el PM afecta a la infiltración. El ajuste de los parámetros puede hacerse buscando los que minimizan la suma de los cuadrados de las diferencias entre valores de infiltración medidos, $(Z_{j,i})_{medida}$, y valores simulados, $(Z_{j,i})_{simulada}$:

$$A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(Z_{j,i})_{medida} - (Z_{j,i})_{simulada}]^2 \quad (4)$$

extendiéndose el sumatorio de j desde la primera medida hasta la última (n) en cada ensayo de infiltración, y el segundo sumatorio desde el primer ensayo de infiltración hasta el último (m) que en nuestro caso es igual a veinte. Los ajustes se realizaron minimizando A utilizando el algoritmo de optimización de Rosenbrock (Press y col., 1992).

2.5. Descomposición de la varianza de la infiltración.

Para descomponer la varianza de la infiltración se siguió el método utilizado por Jaynes y Clemmens (1986) para canteros sin pendiente y adaptado a surcos por Oyonarte y Mateos (1995) considerando la variación de PM. Dicho método parte de la ecuación 3, en la que el primer paréntesis representará la variación debida al suelo y al tiempo de contacto y el

segundo la debida al PM. Si se fija t (es decir, si se analiza la infiltración ocurrida hasta un tiempo de contacto determinado), el primer paréntesis estará controlado por los parámetros de infiltración característicos del suelo y será independiente del tiempo de contacto. Llamando:

$$c = k \cdot t^a + f_o \cdot t \quad \text{y} \quad pm = \left(\frac{PM}{PM_r} \right)^b \quad (5)$$

queda:

$$Z = c \cdot pm \quad (6)$$

donde se tienen dos variables, c y pm , cuyas desviaciones respecto a sus medias son:

$$\delta c = c - \mu_c \quad \text{y} \quad \delta pm = pm - \mu_{pm} \quad (7)$$

siendo μ el valor medio de la variable.

La ecuación 6 se podrá escribir entonces como:

$$Z = (\delta c + \mu_c) \cdot (\delta pm + \mu_{pm}) = \mu_c \cdot \mu_{pm} + \mu_c \cdot \delta pm + \mu_{pm} \cdot \delta c + \delta c \cdot \delta pm \quad (8)$$

Para calcular la varianza de Z se utilizan las propiedades de la esperanza matemática, obteniéndose la expresión:

$$V(Z) = V(Z_{pm}) + V(Z_s) + V(Z_{s*pm}) \quad (9)$$

siendo $V(Z_{pm})$ la varianza de la infiltración acumulada debida a la varianza del PM, $V(Z_s)$ la debida a la de las propiedades del suelo y $V(Z_{s*pm})$ la debida a la interacción entre suelo y PM.

El valor de cada uno de los sumandos anteriores es:

$$V(Z_{pm}) = \mu_c^2 \cdot V(pm) \quad (10)$$

$$V(Z_s) = \mu_{pm}^2 \cdot V(c) \quad (11)$$

$$V(Z_{s*pm}) = 2 \cdot \mu_c \cdot \mu_{pm} \cdot COV(c, pm) + 2 \cdot \mu_c \cdot E(\delta c \cdot \delta pm^2) + 2 \cdot \mu_{pm} \cdot E(\delta c^2 \cdot \delta pm) + E(\delta c^2 \cdot \delta pm^2) - [COV(c, pm)]^2 \quad (12)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSION.

3.1. Efecto del perímetro mojado en la infiltración.

Los ensayos de campo dieron lugar a abanicos de curvas de infiltración, como el de la figura 2, que muestran la variación de la infiltración obtenida en respuesta a los cambios de PM, en condiciones de primer riego, aunque parte de la variación es también debida a la variabilidad de las propiedades del suelo. En condiciones de segundo riego los resultados fueron similares, aunque la variabilidad de la infiltración disminuyó (Palomo, 1996).

El modelo de infiltración contenido en la ecuación 3 y que incluye el PM como variable, fue calibrado asumiendo que la infiltración de referencia es la correspondiente al PM

medio del tratamiento de mayor PM. Esta asunción es adecuada ya que, si la utilidad del modelo es simular la infiltración tras el recorte de caudal, utilizando para ello la curva ajustada a la trayectoria de avance, esta curva corresponderá a un PM mayor que el resultante

tras el recorte. Los valores utilizados fueron $PM_r=0.4295$ m en el primer riego y $PM_r=0.4380$ m en el segundo. Minimizando la función A (ecuación 4) se ajustaron los parámetros k , a y f_0 de la función de infiltración de referencia así como el exponente b . Los valores obtenidos para estos cuatro parámetros se recogen en la tabla 1.

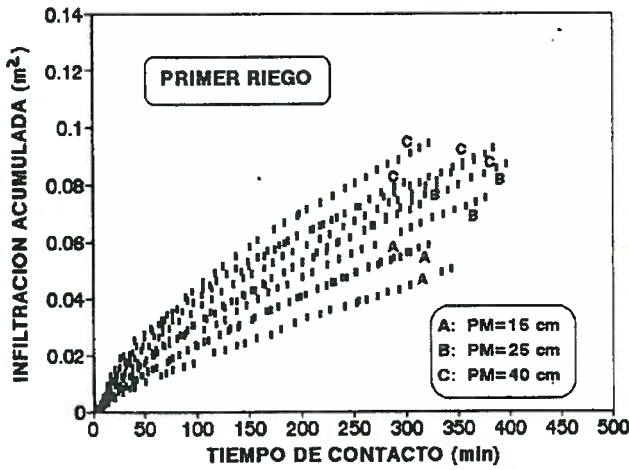


FIGURA 2. Curvas de infiltración acumulada para primer riego.

Si la relación entre infiltración e infiltración de referencia fuera simplemente lineal, en otras palabras, si la infiltración para un perímetro mojado PM pudiera obtenerse simplemente multiplicando la infiltración referida a la unidad de superficie por PM, entonces b valdría 1 (figura 3). Esta solución es la propuesta por algunos

autores (por ejemplo Strelkoff y Souza, 1984) pero no la que resulta de nuestros ensayos, donde b es 0.64 en el primer riego y 0.29 en el segundo. Por tanto, para un PM inferior al de referencia, la infiltración en el primer riego disminuye con respecto a la de referencia en una proporción inferior a la proporción en que se ha disminuido PM (figura 3). Valores de b superiores a 1 como los encontrados por Blair y Smerdon (1987) son claramente inapropiados para los surcos de este ensayo, e incluso un valor de 0.9, como el utilizado por Oyonarte y Mateos (1995), aún parece excesivamente elevado. En el segundo riego, la infiltración es incluso más insensible que en el primero a los cambios de PM dentro del intervalo de valores de este estudio. Este cambio en el valor del exponente puede deberse a una distribución del agua distinta después del primer riego.

TABLA 1. Valor de los parámetros ajustados del modelo de infiltración y suma del cuadrado de las diferencias entre infiltraciones observadas y simuladas (A).

PARAMETRO	1 ^{er} Riego	2 ^o Riego
$k(m^2/min^a)$	0.001817	0.000783
a	0.6000	0.5559
$f_0(m^2/min)$	0.000113	0.000109
b	0.6405	0.2890
A	0.04013	0.02410

En cualquier caso, el modelo de infiltración que se propone en este trabajo parece reproducir adecuadamente la realidad ya que, a pesar de la dispersión de los datos de campo,

se ajusta a ellos y hace la infiltración nula para PM cero, lo cual no se hubiera conseguido haciendo simplemente un ajuste lineal entre PM y Z.

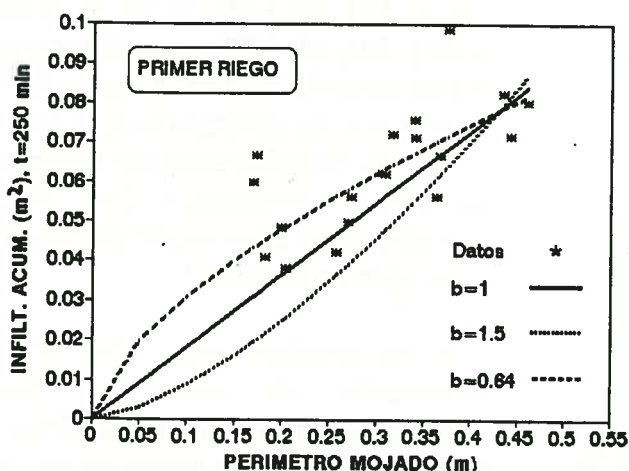


FIGURA 3. Relación Z-PM para primer riego.

3.2. Variabilidad de la infiltración en el riego por surcos.

Al descomponer la varianza de la infiltración como previamente se ha expuesto en el apartado 2.5., adoptando para ello un valor del tiempo acumulado de 250 minutos (aunque similares valores se obtuvieron con otros tiempos), se alcanzaron los resultados que se presentan en la tabla 2. Como puede comprobarse, la varianza debida al PM ($V(Z_{pm})$) es bastante menor que la varianza debida a la variabilidad del suelo ($V(Z_s)$) y a la interacción suelo-PM ($V(Z_{s*pm})$). En

efecto, durante el primer riego es prácticamente la mitad de estas dos últimas, y pierde importancia en el segundo, en el que sólo alcanza un 11% frente a $V(Z_s)$, que aumenta su valor hasta un 67% en detrimento tanto de $V(Z_{pm})$ como de $V(Z_{s*pm})$.

TABLA 2. Valor de los componentes de la varianza de la infiltración (m⁴). Entre paréntesis se indica el porcentaje respecto a la varianza total ($V(Z)$).

RIEGO	$V(Z)$	$V(Z_{pm})$	$V(Z_s)$	$V(Z_{s*pm})$
1°	0.000576 (100)	0.000115 (20)	0.000228 (40)	0.000233 (40)
2°	0.000099 (100)	0.000011 (11)	0.000067 (67)	0.000022 (22)

Por tanto, ya que el suelo parece ser el principal agente provocador de la variabilidad, se emplearon los datos recogidos de resistencia a la penetración y textura para estudiar una posible explicación de la misma. Con este fin se realizaron regresiones entre la infiltración acumulada a un determinado tiempo (250 min) en primer y segundo riego y la resistencia máxima a la penetración ($R_{m\acute{a}x}$), la profundidad a la que se produce $R_{m\acute{a}x}$, la integral de resistencia en el intervalo de profundidad de medida y los porcentajes de arena, arcilla y limo. Como ejemplo se muestran en la figura 4 la realizada con la $R_{m\acute{a}x}$ y el % de arena, ambas en condiciones de primer riego.

En todos los casos los coeficientes de correlación tomaron valores bastante bajos (entre 0.05 y 0.10), lo que nos lleva a dudar sobre la capacidad de estas propiedades para explicar el comportamiento del suelo frente a la infiltración.

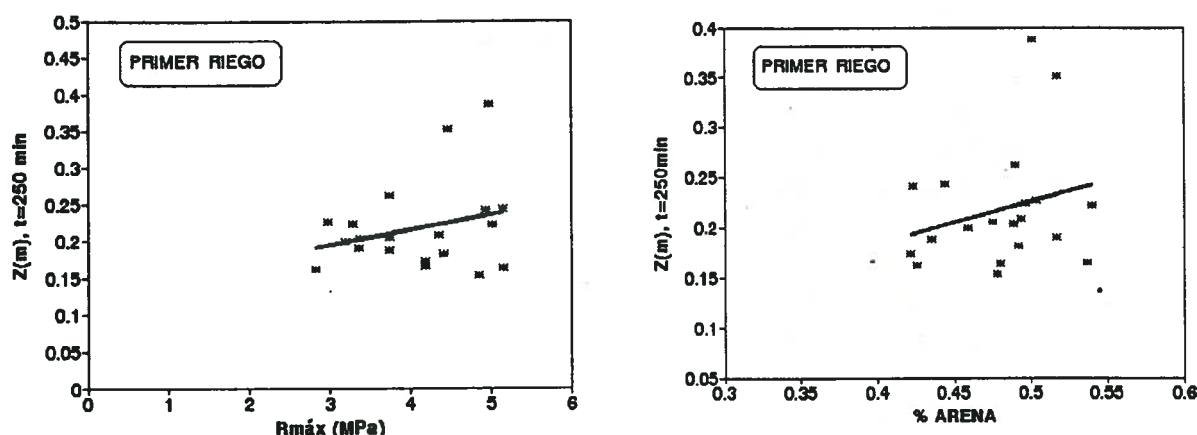


FIGURA 4. Regresiones entre la infiltración acumulada a los 250 min y las propiedades del suelo.

4. CONCLUSIONES.

La variación del perímetro mojado tiene un efecto sobre la infiltración en el riego por surcos pero, al menos en las condiciones de nuestro estudio, su magnitud no es la que los modelos existentes suponen. En efecto, un incremento en el perímetro mojado produce un incremento en la infiltración, pero en menor proporción que el del perímetro mojado.

El modelo de infiltración calibrado en este estudio, puede ser incluido en modelos de riego por superficie con el fin de mejorar la estimación de la infiltración a lo largo del tiempo y del espacio, y para poder simular el cambio en la infiltración consecuencia de la disminución del perímetro mojado tras el recorte de caudal.

La gran variación existente en los resultados de infiltración se debe sin duda a la variabilidad espacial de las características del suelo, pero a pesar de esta seguridad, ni textura ni resistencia a la penetración la explican. Deben por tanto existir otras propiedades, quizás más relacionadas con la estructura y la distribución de macroporos, responsables de la dispersión encontrada.

5. BIBLIOGRAFIA.

- Agüera, J. 1986. Diseño y aplicación de un penetrómetro registrador de precisión para la determinación de la compactación en suelos agrícolas. Tesis Doctoral, Dpto. de Mecanización Agraria y Construcciones Agroindustriales, Universidad de Córdoba.
- Blair, A.W. y E.T. Smerdon. 1987. Modeling Surge Irrigation Infiltration. ASCE, J. Irrig. Drain. Engin. 113: 497-515.
- Childs, J.L.; W.W. Wallender y J.W. Hopmans. 1993. Spatial and Seasonal Variation of Furrow Irrigation. ASCE, J. Irrig. Drain. Engin. 119: 74-90.
- Fangmeier, D.D. y M.K. Ramsey. 1978. Intake Characteristics of Irrigation Furrows. Trans. ASAE: 696-700, 705.
- Fok, Y.S. y S. Chiang. 1984. 2-D Infiltration Equations For Furrow Irrigation. ASCE, J.

- Irrig. Drain. Engin. 110: 208-217.
- Fonteh, M.F. y T.H. Podmore. 1993. A Physically Based Infiltration Model for Furrow Irrigation. *Agric. Water Manag.* 23: 271-284.
- Green, W.H. y Ampt, G.A. 1911. Studies on Soil Physics. I. The Flow of Air and Water through Soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24.
- Izadi, B. y W.W. Wallender. 1985. Furrow Hydraulic Characteristic and Infiltration. *Trans. ASAE.* 28: 1901-1908.
- Jaynes, D.B. y A.J. Clemmens. 1986. Accounting For Spatially Variable Infiltration in Border Irrigation Models. *Water Resour. Res.* 22: 1257-1262.
- Oyonarte, N.A. y L. Mateos. 1994. Uniformity and Application Efficiency of Continuous vs. Surge Irrigation. *Proc. Third Congress ESA. Padua:* 200-202.
- Oyonarte, N.A. y L. Mateos. 1995. Variabilidad del agua infiltrada en riego por surcos. XIII Jornadas Técnicas de Riego. Puerto de la Cruz, Tenerife. Junio, 1995. pp: 443-450.
- Palomo, M.J. 1996. Infiltración en riego por surcos mediante pulsaciones intermitentes. Trabajo profesional fin de carrera. Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba.
- Pérez, C.; E. Camacho; J. Roldán; M. Alcaide y J. Reza. 1995. A Control System of Furrow Irrigation in Real Time. *Phys. Chem. Earth.* 20: 351-358.
- Philip, J.R. 1957. The Theory of Infiltration: I. The Infiltration Equation and its Solution. *Soil Sci.* 83: 345-357.
- Press, W.H.; S.A. Teukolsky; W.T. Vetterling y B.P. Flannery. 1992. *Numerical Recipes in Fortran. The Art of Scientific Computing (2nd ed.).* Cambridge University Press. pp: 731-735.
- Richards, L.A. 1931. Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums. *Physics* 1: 318-333.
- Schwank, L.J. y W.W. Wallender. 1988. Zero Inertia Furrow Modeling with Variable Infiltration and Hydraulic Characteristics. *Trans. ASAE.* 31: 1470-1475.
- Strelkoff, T. y F. Souza. 1984. Modeling Effect of Depth on Furrow Infiltration. *ASCE, J. Irrig. Drain. Engin.* 110: 375-387.
- Tabuada, M.A.; Z.J.C. Rego; G. Vachaud y L.S. Pereira. 1995. Modelling of Furrow Irrigation. Advance with Two-dimensional Infiltration. *Agric. Water Manag.* 28: 201-221.
- USDA. 1986. *Surge Flow Irrigation Field Guide.* Soil Conservation Service, 32 p.
- Walker, W.R. 1989. *Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems.* FAO Irrigation and Drainage Paper. N° 45.

INFILTRACION EN RIEGO POR SURCOS MEDIANTE PULSACIONES INTERMITENTES

Palomo, M.J.^{1,2} (P); N.A. Oyonarte³; L. Mateos¹ y J. Roldán²

RESUMEN

Se han realizado dos ensayos de campo para analizar el comportamiento de la infiltración producida en el riego por surcos mediante pulsaciones intermitentes. Dichos ensayos se han llevado a cabo con infiltrómetros sobre surcos bloqueados. El primero de ellos sirvió para comparar la infiltración en esta modalidad de riego con la obtenida en riego continuo. El segundo ensayo sirvió para evaluar y adaptar los modelos de infiltración propuestos en la literatura para riego mediante pulsaciones.

Los resultados obtenidos muestran una disminución de la infiltración en pulsaciones respecto a riego continuo y una reducción drástica de la velocidad de infiltración después de la primera pulsación, siendo la transición supuesta para la segunda pulsación prácticamente inexistente. De los modelos evaluados, uno se demostró inadecuado, otro adecuado tras pequeñas modificaciones y las simulaciones de otros dos mostraron buen acuerdo con los valores medidos. No obstante, se discute la aplicabilidad de cada uno de ellos.

SUMMARY

Two field tests were carried out to study the infiltration under furrow surge irrigation. The first of them was used to compare surge and continuous flow irrigation. The second one was used to evaluate and calibrate several infiltration models for surge irrigation. Blocked furrow infiltrometers were used to carry out both tests.

The main conclusions were that infiltration under surge irrigation is reduced with respect to continuous flow application. A drastic decrease of the infiltration rate is produced after the first pulse; and finally the supposed transition phase of the second pulse does not exist. One of the models that have been studied was inadequate, another one, after small modifications, was appropriate, and the other two models provided a good fit of observed values. The applicability of each model is also discussed.

1. INTRODUCCION.

El método de riego más extendido en España es el riego por superficie, que cubre alrededor del 70% del suelo regable. Dentro de este método, la modalidad de surcos es la más común en regiones como Andalucía. A pesar de su extensión, el riego por superficie es el más ineficiente de los tres grandes grupos (superficie, aspersión y localizado), lo que le está haciendo ganar la imagen de "despilfarrador" de un recurso, agua, que se ha demostrado

(1) CSIC, Instituto de Agricultura Sostenible, Córdoba. (2) Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.
(3) Tecnirriegos S.A., Córdoba.

escaso. Esta imagen, que se intercambia en distintas esferas sociales y políticas, ha llevado a que planes como el recientemente aprobado Plan Nacional de Regadíos lleven implícita la idea de reemplazar el riego por superficie por otros métodos en teoría más eficientes.

El coste de esta reforma es enorme, y su justificación es más que dudosa si técnicos y agricultores son capaces de explotar el potencial de eficiencia del riego por superficie, lo que pasa por la mejora del diseño y manejo de estos sistemas de riego. No debe olvidarse, por otro lado, su baja demanda energética, lo que debe impulsar estudios que, al favorecer su uso, reduzcan el consumo total de energía por el riego. Entre las últimas prácticas que están saltando al campo científico y tecnológico, una de las más prometedoras es la del riego mediante pulsaciones intermitentes. Su origen como práctica es antiguo, porque desde hace tiempo, agricultores que encontraban dificultades para completar el avance del agua, interrumpían la aplicación para reiniciarla horas más tarde, consiguiendo con ello completar el riego. Sin embargo, como técnica, el riego por superficie mediante pulsaciones nació hace sólo unos quince años en EEUU (Camacho, 1993).

En muchos suelos la experiencia ha demostrado que, para un mismo caudal, el tiempo, y por tanto el volumen de agua, necesario para alcanzar el final de surcos regados mediante pulsaciones, es sensiblemente menor que el tiempo utilizado con un riego continuo (Camacho, 1993; Mateos, 1993; Goldhamer y col., 1987; Purkey y Wallender, 1989). La principal razón de esta disminución, es la reducción en la velocidad de infiltración que se produce después de la primera pulsación. Por tanto, las principales ventajas del riego mediante pulsaciones son que el agua avanza más rápidamente, con lo que se consigue una aplicación más uniforme y que el gasto de agua sea menor, obteniéndose un mayor rendimiento. Los inconvenientes que se presentan se deben principalmente a que es un riego más tecnificado que el convencional, requiriendo un mayor mantenimiento de los equipos y especialización de la mano de obra; además, un funcionamiento incorrecto del sistema puede producir un exceso de escorrentía.

Las peculiaridades del riego mediante pulsaciones intermitentes han obligado a adaptar las funciones de infiltración del riego continuo a esta nueva modalidad. Para ello se han desarrollado distintos modelos cuya verificación ha sido sólo parcial, y que suelen distinguir tres regímenes de infiltración, que corresponden a suelo seco, transición y húmedo. Algunos de estos modelos se describen a continuación:

1.1. Izuno y Podmore (1985).

Estos autores utilizan la función partida de Clemmens (1981) para el primer humedecimiento:

$$\begin{aligned} Z &= k \cdot t^a & t < t_b \\ Z &= k \cdot t_b^a + f_o \cdot (t - t_b) & t > t_b \end{aligned} \quad (1)$$

siendo Z la infiltración acumulada, en unidades de volumen infiltrado por unidad de longitud (m^2), k (m^2/min^a) y a parámetros empíricos que dependen del tipo de suelo, t el tiempo de contacto acumulado (min) y t_b el tiempo (min) en el que se alcanza la infiltración básica, f_o (m^2/min). Como la duración de la primera pulsación suele ser corta (normalmente inferior a una hora), es de esperar que no se alcance f_o , por lo que emplean la primera de las expresiones.

A partir de la tercera pulsación (incluida), el agua al fluir se encuentra con secciones húmeda, transición y seca por este orden. En las secciones húmedas la infiltración acumulada se describe como:

$$Z=f_o \cdot t \quad (2)$$

En las secciones de transición la función de infiltración aplicada para un ciclo n es:

$$Z=k' \cdot t^a + f_o' \cdot t \quad (3)$$

donde:

$$k' = k - k \cdot (OPP_j) \quad (4)$$

$$f_o' = f_o \cdot (OPP_j) \quad (5)$$

$$OPP_j = \frac{(t_{n-1})_j}{(t_{on})_{n-1}} \quad (6)$$

siendo j el punto de estudio, n el número de la pulsación, $(t_{n-1})_j$ el tiempo de contacto en el punto j durante el ciclo n-1 y $(t_{on})_{n-1}$ el tiempo durante el que se aplica el agua correspondiente al ciclo n-1.

1.2. Blair y Smerdon (1987).

Según estos autores, la curva de infiltración acumulada para riego por pulsaciones se dibuja eliminando las porciones de la curva de riego continuo que ocurren durante los tiempos sin aplicación de agua en cada ciclo (t_{off}) y colocando los tramos restantes uno a continuación de otro. Así pues, la infiltración resultante es discontinua en tiempo de contacto (sólo se consideran períodos con aplicación de agua), coincidiendo tiempo real y de contacto únicamente para el primer t_{on} .

1.3. Purkey y Wallender (1989).

Este trabajo se basa en observaciones realizadas con infiltrómetros, que muestran que la velocidad de infiltración disminuye con el tiempo en la primera pulsación, asumiendo sin embargo, que durante las posteriores pulsaciones se mantiene constante en el tiempo, disminuyendo de cada una a la siguiente. Los cambios de velocidad de infiltración entre pulsaciones lo establecieron como el cociente entre la velocidad de infiltración al comienzo de una pulsación y la velocidad de infiltración al final de la anterior. Este factor de reducción lo calcularon para cada transición entre pulsaciones ajustando una recta (que resultó ser horizontal).

El modelo de infiltración que utilizaron estos autores fue el de Kostiakov para la primera pulsación y en las pulsaciones posteriores multiplicaban la velocidad de infiltración al final de la pulsación anterior por el factor de reducción, asumiendo linealidad de Z frente a t.

1.4. Walker y Humpherys (1983), corregido por Oweis y Walker (1990).

En este modelo se distinguen tres fases:

* Para la fase seca (zona humedecida por una pulsación) se utiliza la ecuación:

$$Z_c = k_c \cdot t^{a_c} + f_{oc} \cdot t \quad (7)$$

siendo k_c , a_c y f_{oc} los parámetros de las curvas de continuo.

* Para la fase húmeda (zona humedecida por al menos 3 pulsaciones) la ecuación es:

$$Z_s = k_s \cdot t^{a_s} + f_{os} \cdot t \quad (8)$$

siendo k_s , a_s y f_{os} los parámetros de las curvas de pulsaciones.

* En la fase de transición (zona humedecida por 2 pulsaciones) se consideran condiciones intermedias entre las secas y las húmedas. Para un punto (X) se tienen las ecuaciones:

$$Z = k \cdot t^a + f_o \cdot t \quad (9)$$

$$k = k_s + (k_c - k_s) \cdot (X/X_1)^\lambda \quad (10)$$

$$a = a_s + (a_c - a_s) \cdot (X/X_1)^\lambda \quad (11)$$

$$f_o = f_{os} + (f_{oc} - f_{os}) \cdot (X/X_1)^\lambda \quad (12)$$

siendo X_1 la distancia desde cabeza de surco a la interfase transición-seca y λ la constante empírica que refleja la distribución del efecto de las pulsaciones y que los autores toman con un valor de 3.

1.5. Objetivos que se plantean en este trabajo.

Los objetivos que se plantean en este trabajo son los siguientes:

* Comprobación de que el riego mediante pulsaciones intermitentes reduce la infiltración respecto al riego continuo en un suelo franco de la Vega del Guadalquivir.

* Evaluación de las ecuaciones de infiltración en riego por pulsaciones intermitentes.

2. MATERIALES Y METODOS.

2.1. Ensayos de infiltración.

Los distintos ensayos se realizaron sobre un suelo franco del Centro de Investigación y Desarrollo Agrario (CIDA) de Córdoba. Se llevaron a cabo dos tipos de ensayos de infiltración utilizando segmentos de surco bloqueados a los que se aplicaba el agua mediante pulsaciones intermitentes. Una descripción detallada de los infiltrómetros puede encontrarse en Palomo y col. (1996).

El primer tipo de ensayo (Pul-I) pretendía caracterizar la infiltración de agua aplicada en pulsaciones con t_{on} y t_{off} fijos, comparando los resultados con datos de riego continuo obtenidos para iguales perímetros mojados en un ensayo paralelo (Palomo y col., 1996). Se realizaron medidas en condiciones de 1^{er}, 2^o y 3^{er} riego con diversas repeticiones de cada uno (entre 3 y 4), según disponibilidad. El número de pulsaciones establecidas fue de 3, con los siguientes t_{on} y t_{off} :

- 1ª → $t_{on} = 25$ min, $t_{off} = 25$ min
- 2ª → $t_{on} = 40$ min, $t_{off} = 40$ min
- 3ª → hasta completar 5 horas de riego (para calcular f_0).

El segundo tipo de ensayo (Pul-II) estudiaba la infiltración en las fases de transición y húmeda haciendo variar el t_{on} de la primera pulsación. Se compararon 5 tratamientos en un diseño estadístico de bloques al azar con 2 repeticiones de cada uno. En este caso también se establecieron 3 pulsaciones, con los tiempos:

- 1ª → $t_{on} = 10, 20, 30, 40$ y 60 min, $t_{off} = 60$ min
- 2ª → $t_{on} = 60$ min, $t_{off} = 60$ min
- 3ª → hasta completar 5 horas de riego (para calcular f_0).

2.2. Modelos de infiltración y ajuste de parámetros.

Nuestro análisis se va a basar en la aplicación de los modelos mencionados en los apartados 1.1. a 1.4. a las condiciones de los ensayos realizados, para comparar sus resultados con los obtenidos en el campo. El ajuste de estos datos de campo a cada uno de los modelos se hizo mediante regresión lineal (después de la transformación correspondiente) una vez que se hubo obtenido independientemente f_0 , a partir de la pendiente de la fase final recta de las curvas de infiltración acumulada, de acuerdo con las recomendaciones de Walker (1989).

3. RESULTADOS Y DISCUSION.

3.1. Comparación del riego continuo con el riego mediante pulsaciones.

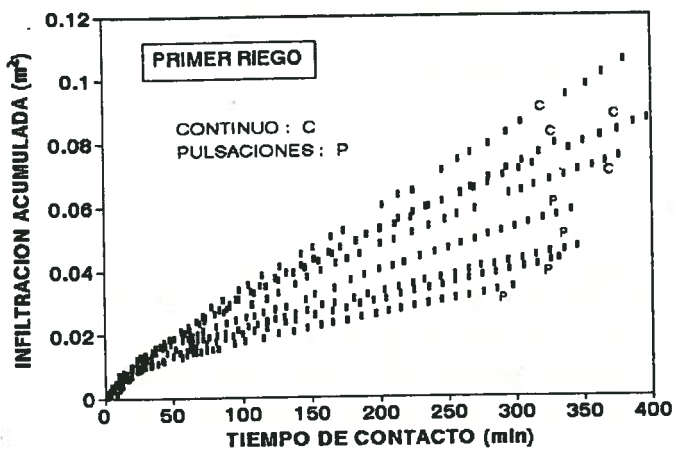


FIGURA 1. Comparación de la infiltración acumulada en continuo y pulsaciones para 1º riego.

Con el fin de mostrar la reducción producida en la infiltración al regar mediante pulsaciones, se muestran en la figura 1 las curvas de infiltración acumulada obtenidas en el ensayo Pul-I y en un ensayo de riego continuo realizado en circunstancias similares, ambas en condiciones de primer riego. La diferencia es manifiesta al quedar las curvas de riego continuo sobre las de riego por pulsaciones. Esto mismo ocurrió en el segundo riego (Palomo, 1996), aunque la diferencia entonces fue menor. A la vez se

comprobó que en nuestro suelo no existe la transición definida en los modelos descritos, sino que se pasa directamente después de la primera pulsación a una infiltración básica inferior a la del riego continuo.

3.2. Funciones de infiltración en riego mediante pulsaciones.

A continuación se analiza, basándose en el ensayo Pul-II, el comportamiento de los modelos descritos anteriormente. En la figura 2 se muestran los resultados relativos a la comparación entre la infiltración observada y la simulada.

3.2.1. Izuno y Podmore (1985).

Una vez se obtuvieron los parámetros como se explicó en el apartado 2.2., se calculó la infiltración en la primera pulsación mediante la ecuación 1; para la segunda hacía falta conocer la relación OPP en cada punto, que se obtiene con la ecuación 6 asumiendo $(t_{on})_{n-1}$ igual al t_{on} del tratamiento con la primera pulsación más larga: $(t_{on})_1 = 60$ min.

Aunque las ecuaciones propuestas por los autores para los parámetros k' y f_o' de la fase de transición no incluyen ningún exponente para el valor de OPP, se introdujo uno con el fin de ver si existía alguna posibilidad de ajustarse mejor a los datos de campo. Así pues, se calculó la infiltración igual que ellos y con esta modificación de OPP:

$$\begin{aligned} k' &= k - k \cdot OPP_j^w \\ f_o' &= f_o \cdot OPP_j^w \end{aligned} \quad (13)$$

buscando el valor de w que minimice las diferencias entre cálculos y datos. Los resultados se muestran la figura 2.a, donde se observa que este modelo sobreestima la infiltración en la fase de transición y que la transformación de OPP elevándolo a un exponente mejora el acuerdo entre valores simulados y observados, el valor que se obtuvo para w fue muy pequeño (0.0005), el cual produjo un mejor ajuste a los datos, pero a costa de que OPP^w tienda a uno y que por tanto $k' \rightarrow 0$ y $f_o' \rightarrow f_o$, quedando la ecuación de infiltración de la segunda pulsación igual que la de la tercera, como si no existiese transición.

Por otro lado, para calcular la infiltración durante la fase húmeda, se utilizó la ecuación 2, a la que también se propuso una innovación: usar el valor de f_o'' (infiltración básica en fase húmeda) en lugar del de f_o . Esta modificación está justificada por la observación de que la infiltración básica después de varias pulsaciones es sensiblemente menor que cuando el flujo se ha mantenido continuo; la mejora proporcionada por esta última modificación puede observarse en la figura 2.a.

3.2.2. Blair y Smerdon (1987).

En este caso se utiliza el t_{off} como variable y el valor de los parámetros obtenidos en riego continuo. Al aplicarlo se obtuvo una sobreestimación aún mayor que en el caso anterior, tanto en la fase de transición como en la húmeda (figura 2.b), en esta última los valores se alejan bastante de los observados, lo que produce un valor alto de las diferencias entre ambos y por tanto del error del modelo. En definitiva, parece, por un lado, que la duración del t_{off} , una vez transcurrido un intervalo razonable, no tiene tanta importancia como la que se le adjudica al operar tal como proponen estos autores, y, por otro lado, a que al no tener en cuenta la reducción en la infiltración básica que se produce al regar mediante pulsaciones se sobreestima la realidad.

3.2.3. Purkey y Wallender (1989).

El factor de reducción de la velocidad de infiltración se obtuvo a partir de las curvas de infiltración de los ensayos, y aunque los puntos aparecen bastante más dispersos que en los

resultados ofrecidos por Purkey y Wallender, lo cierto es que no parece apreciarse una tendencia ascendente ni descendente, debiéndose posiblemente la irregularidad a la variabilidad espacial del suelo. Además los valores obtenidos ($r_1 = 0'62$, $r_2 = 0'85$), están bastante próximos a los suyos ($r_1 = 0'58$, $r_2 = 0'83$).

Con estos valores se calculó la infiltración para la 2ª y 3ª pulsación y se compararon los valores de Z simulados con los observados, resultando en este caso una buena aproximación entre ambos (figura 2.c), aunque su extrapolabilidad es incierta, por ser absolutamente empírico.

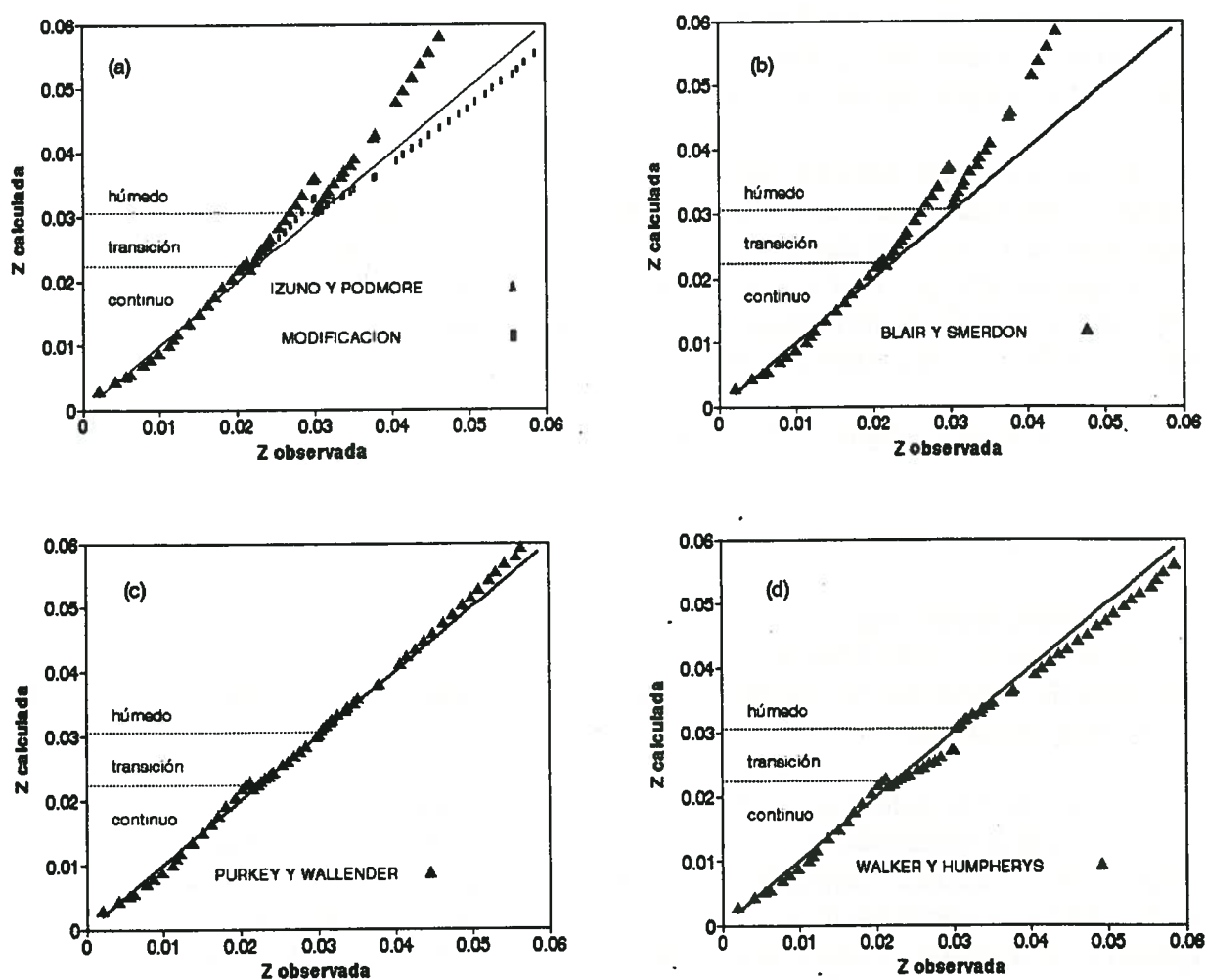


FIGURA 2. Comparación de la Z observada y calculada con los distintos modelos: (a) Izuno y Podmore (1985), (b) Blair y Smerdon (1987), (c) Purkey y Wallender (1989) y (d) Walker y Humpherys (1983).

3.2.4. Walker y Humpherys (1983).

La función de transición propuesta por estos autores depende, como se recogió en el apartado 1.4., de las distancias de avance. Estos avances no existieron en nuestro estudio ya que se ha trabajado con segmentos de surco bloqueados, por lo que se propuso usar una relación de tiempos de contacto en lugar de distancias de avance para modificar los valores de los parámetros durante la fase de transición, es decir, en lugar de emplear:

$$T = \left(\frac{X}{X_I} \right) \quad (14)$$

se utilizará:

$$T = 1 - \left(\frac{t_{i-1}}{(t_{m\acute{a}x})_{i-1}} \right) \quad (15)$$

siendo i el número de la pulsación, t_{i-1} el tiempo de contacto en la pulsación anterior y $(t_{m\acute{a}x})_{i-1}$ el máximo tiempo de contacto en la pulsación anterior (t_{on}). Dado que T va elevado a un exponente en el caso de la relación entre distancias de avance, se necesitará otro exponente "y" para T en el caso de la relación entre tiempos de contacto; el valor que produjo la mejor aproximación entre datos y cálculos fue $y = 3.1$, prácticamente el mismo que utilizan los autores al relacionar distancias de avance ($\lambda = 3$).

El inconveniente adicional de este modelo es el elevado número de parámetros que requiere (tres para la infiltración en fase seca, tres para la infiltración en fase húmeda y el exponente de T). Con los datos recogidos en nuestro estudio no fue posible ajustarlos todos, por lo que se optó por fijar a_s y k_s debido a la dificultad que se presentó para su cálculo. Dado que la función de infiltración era muy lineal en esta fase, se le asignaron unos valores bajos para dar más importancia al segundo sumando de la ecuación 9.

Como se observa (figura 2.d), se obtuvo un ajuste bastante bueno a los datos de campo.

4. CONCLUSIONES.

La infiltración en riego mediante pulsaciones intermitentes en un suelo franco de la Vega del Guadalquivir es más lenta que bajo flujo continuo. Después de la primera pulsación, la velocidad de infiltración se reduce drásticamente, y la transición supuesta para la segunda pulsación es prácticamente inexistente.

De los cuatro modelos estudiados que describen la infiltración en el riego por pulsaciones, se recomienda la utilización del de Izuno y Podmore con la modificación propuesta, ya que proporciona un resultado aceptable con mayor facilidad de uso. Aunque el modelo de Walker y Humpherys se comporta muy bien en estas condiciones, presenta una gran dificultad de aplicación al necesitar la estimación de siete parámetros. El modelo de Purkey y Wallender también nos dio buenos resultados, pero debido a su empirismo no es adecuado recomendarlo para condiciones distintas a las de nuestros ensayos. El peor resultado viene dado por el modelo de Blair y Smerdon, al sobrevalorar en gran medida la infiltración.

5. BIBLIOGRAFIA.

- Blair, A.W. y E.T. Smerdon. 1987. Modeling Surge Irrigation Infiltration. ASCE, J. Irrig. Drain. Engin. 113: 497-515.
- Camacho, E. 1993. Caracterización, optimización y manejo del riego por surcos mediante pulsaciones intermitentes. Tesis Doctoral, Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba.

- Clemmens, A.J. 1981. Evaluation of Infiltration Measurement for Border Irrigation. *Agric. Water Manag.* 3: 251-267.
- Goldhamer, D.A.; M.H. Alemi y R.C. Phene. 1987. Surge vs. Continuous-flow Irrigation. *Calif. Agric.* Sept-Oct. 1987: 29-32.
- Izuno, F.T. y T.H. Podmore. 1985. Kinematic Wave Model for Surge Irrigation Research in Furrow. *Trans. ASAE.* 28: 1145-1150.
- Mateos, L. 1993. Riego por pulsos en el Valle del Guadalquivir. En: *Necesidades hídricas de la agricultura.* (Coordinadores científicos J. Berengena y E. Fereres). Convenio CEDEX - Universidad de Córdoba.
- Oweis, T.Y. y W.R. Walker. 1990. Zero-inertia Model for Surge Flow Furrow Irrigation. *Irrig. Sci.* 11: 131-136.
- Palomo, M.J. 1996. Infiltración en riego por surcos mediante pulsaciones intermitentes. Trabajo profesional fin de carrera. Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba.
- Palomo, M.J.; N.A. Oyonarte; L. Mateos y J. Roldán. 1996. Efecto del perímetro mojado sobre la infiltración en el riego por surcos. XIV Congreso Nacional de Riegos. Aguadulce, Almería. Junio, 1996.
- Purkey, D.R. y W.W. Wallender. 1989. Surge Flow Infiltration Variability. *Trans. ASAE.* 32: 894-900.
- Walker, W.R. y A.S. Humpherys. 1983. Kinematic-wave Furrow Irrigation Model. *ASCE, J. Irrig. Drain. Engin.* 109: 377-392.
- Walker, W.R. 1989. Guidelines for Designing and Evaluating Surface Irrigation Systems. *FAO Irrigation and Drainage Paper.* N° 45.

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA INFILTRACION EN RIEGO POR SURCOS

Oyonarte, N.A. (P)¹ y L. Mateos²

(1) TECNIRRIEGOS S.A., Córdoba

(2) Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Córdoba.

Resumen

Se ha evaluado una serie de riegos por surcos considerando tanto la infiltración como el perímetro mojado variables, y se compara el resultado con el obtenido cuando el tiempo de contacto es la única fuente de variación considerada. La uniformidad resulta notablemente sobreestimada en este último caso, siéndolo también la eficiencia de aplicación aunque en menor grado.

Los parámetros de infiltración de la ecuación de infiltración pueden ajustarse tanto a una distribución normal como a una logarítmico-normal. No se ha encontrado autocorrelación espacial de estos parámetros para distancias mayores de 23 m.

Abstract

Tree furrow irrigations were evaluated on the same irrigated field considering varying or constant infiltration function and wetted perimeter. Uniformity was overestimated when infiltration was estimated only as a function of intake opportunity time. Application efficiency was also slightly overestimated.

The frequency distribution of the parameters of the infiltration function were approximated either by a normal or a log-normal distribution. Spatial autocorrelation was not found at distances longer than 23 m.

Introducción

La uniformidad con la que el agua se distribuye durante el riego puede tener un impacto directo sobre la eficiencia, la producción de los cultivos y el lavado de solutos. En el riego por surcos, una serie de factores influyen en esta uniformidad: variaciones en el tiempo de contacto, en las propiedades de infiltración del suelo, en el perímetro mojado del surco, en el caudal aportado por surco y en el tiempo de riego entre series de surcos regadas sucesivamente.

La variabilidad de las propiedades de infiltración del suelo tiene una seria influencia en la variabilidad de la lámina de agua infiltrada (Clemmens, 1988; Childs y cols, 1993, Oyonarte y Mateos; 1995). Sin embargo en la simulación y/o evaluación del riego por surcos se suele considerar el tiempo de contacto como única fuente de variación, asumiendo una función de infiltración, usualmente la de Kostiaikov o alguna de sus modificaciones, en las

que se consideran constantes los parámetros de infiltración. Esto provoca una infraestimación de la variabilidad de la lámina de agua infiltrada. También la variación del perímetro mojado en el riego es considerable y tiene un impacto en la infiltración (Palomo y cols. 1996).

El conocimiento de la variabilidad de los parámetros de infiltración supone conocer su distribución de frecuencias. La distribución de frecuencias de propiedades de infiltración del suelo ha sido estudiada por distintos autores (p.e. Sharma y cols, 1980; Sisson y Wierenga, 1981). Además, interesa conocer si los valores que toman estos parámetros en cada punto son independientes o por el contrario están relacionados con los valores que toman en sitios próximos. Normalmente, se ha encontrado autocorrelación espacial de las propiedades de infiltración del suelo a distancias comprendidas entre 8 y 25 m (Sisson y Wierenga, 1981; Vieira y cols, 1981; Bautista y Wallender, 1985; Fonteh y Podmore, 1994).

Material y métodos

Trabajo experimental

En el verano de 1994 se realizaron ensayos de riego por surcos. Se aplicaron tres riegos en una parcela de 18*235m de suelo franco, muy homogéneo en cuanto a textura, con dos repeticiones de cinco surcos cada una. Los tiempos de riego fueron elevados -hasta 515 min- y se aplicó recorte de caudal en todos los riegos.

En cada riego se midieron los tiempos de avance y receso cada 20 m, se midieron los caudales de entrada y salida en cada surco controlado y se obtuvieron los parámetros de forma del surco. Los parámetros de la función de infiltración se obtuvieron por balance volumétrico durante la fase de avance (Walker y Skogerboe, 1987). La lámina de agua infiltrada se obtuvo mediante medidas con sonda de neutrones un día antes y dos después del riego, realizadas en 10 puntos a lo largo de cada parcela elemental, y corregidas para ET y drenaje. El perímetro mojado se estimó para cada punto de medida con sonda, cada cinco minutos, mediante un modelo de onda cinemática (Rafael Fernández, com. per.). El lector interesado encontrará mas información sobre estos ensayos en Oyonarte y Mateos (1995).

En el verano de 1995, en la misma parcela experimental de nuevo sembrada de girasol, se midió la infiltración a lo largo de cada una de las parcelas elementales mediante infiltrómetros de surco bloqueado en condiciones de un primer, un segundo y un tercer riego. Para conocer los detalles de los infiltrómetros y su operación, el lector puede remitirse a Palomo y cols. (1996). Se realizaron 10 medidas de infiltración en cada parcela elemental y riego. Los infiltrómetros se colocaron en la misma línea donde el año anterior se habían instalado los tubos de acceso para sonda de neutrones, a lo largo de la parcela elemental cada 23 m. Tras medir la infiltración en condiciones

de un primer riego, se levantaron los infiltrómetros y se procedió al riego de la parcela experimental, instalándolos de nuevo para realizar la medidas en condiciones de un segundo riego. La operación se repitió para realizar nuevas medidas en condiciones de un tercer riego. Los infiltrómetros se colocaron cada vez en el mismo surco, pero levemente desplazados para evitar alteraciones producidas en anteriores emplazamientos.

Funciones de infiltración

La función de infiltración utilizada ha sido la denominada "dividida" (Clemmens 1981), que es una modificación de la de Kostiakov-Lewis más adecuada que esta para altos tiempos de contacto. Esta función de infiltración tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Z &= k \cdot \tau^a & \tau < \tau_s \\ Z &= k \cdot \tau_s^a + f_o \cdot (\tau - \tau_s) & \tau > \tau_s \end{aligned} \quad (1)$$

donde Z es la infiltración acumulada, k y a son parámetros empíricos, f_o es la infiltración básica, τ es el tiempo de contacto y τ_s es el tiempo en el que se alcanza la infiltración básica. El parámetro a se ha considerado constante ($a=0.75$). Para cada punto de medida de infiltración se obtuvo f_o por regresión lineal de los pares (Z, τ) para $\tau > \tau_s$. Con los pares (Z, τ) para $\tau < \tau_s$, se obtuvo también por regresión lineal el parámetro k .

Para aplicar los parámetros de infiltración obtenidos de los infiltrómetros a condiciones de infiltración con diferente perímetro mojado, se hace la modificación propuesta por Oyonarte y Mateos (1995) y calibrada por Palomo y cols. (1996):

$$Z = Z_r \cdot (PM / PM_r)^b \quad (2)$$

en la que PM_r es el perímetro mojado de referencia para los que se han obtenido los parámetros de infiltración, Z_r es la infiltración obtenida con esos parámetros, PM es el nuevo perímetro mojado para el que se calcula la infiltración acumulada y Z es esta última. El coeficiente b toma el valor de 0.64 para condiciones de primer riego y 0.29 para los siguientes en las condiciones de nuestros ensayos (Palomo y cols. 1996).

Con los tiempos de contacto medidos en los ensayos de riego por surcos y los parámetros de infiltración obtenidos para cada distancia con los infiltrómetros se estimó el agua infiltrada en cada riego y repetición. La ecuación de infiltración, considerando el recorte de caudal y las diferencias entre el PM a lo largo del surco y de los infiltrómetros se ha aplicado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Z &= [k \cdot \tau_s^a + f_o \cdot (\tau - \tau_s)] \cdot (PM_{dr} / PM_r)^b + \\ &+ [k \cdot \tau_s^a + f_o \cdot (\tau_r - \tau_s)] \cdot [(PM_{ar} / PM_r)^b - (PM_{dr} / PM_r)^b] \end{aligned} \quad (3)$$

donde τ_r es el tiempo de contacto hasta del recorte, PM_{ar} es el perímetro mojado en esa distancia antes del recorte, PM_{dr} es el

perímetro mojado después del recorte y PM_r es el perímetro mojado del infiltrómetro. En el caso de infiltración variable y PM cte, PM_{ar} es el perímetro mojado medio del surco antes del recorte de caudal y PM_{dr} el medio tras el recorte de caudal.

Resultados y discusión

Las funciones de infiltración obtenidas con infiltrómetro de surco bloqueado (Z_{inf}) tienen, en condiciones de primer riego, valores de k y f_0 más bajos que las obtenidas de la fase de avance del riego (Z_{aw}), lo que da lugar a que la infiltración acumulada sea mayor cuando se estima con Z_{aw} , como puede apreciarse en la figura 1^a.

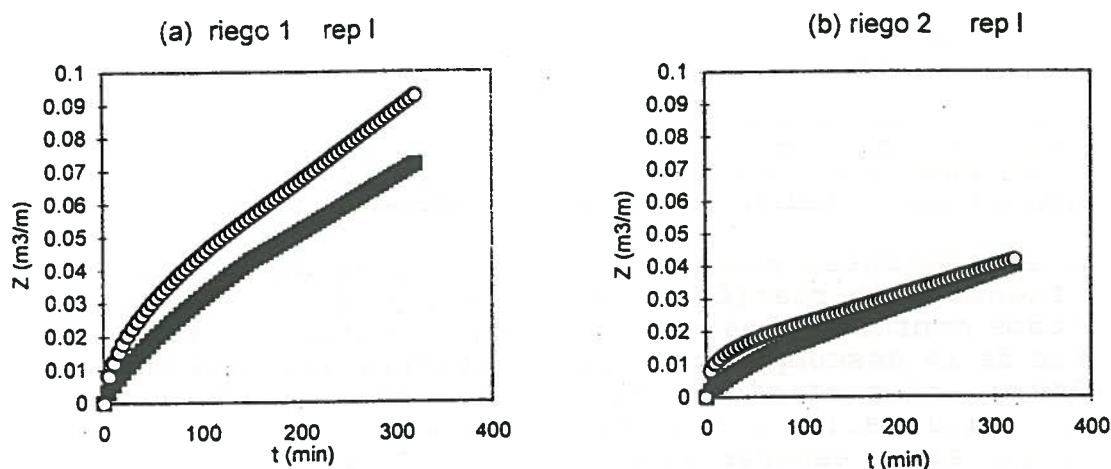


Figura 1. Infiltración acumulada (Z) estimada con la función de infiltración media de los infiltrómetros (línea oscura) y con la obtenida de la fase de avance del riego (línea clara).

En condiciones de segundo y tercer riego, los valores de k en la función Z_{aw} siguen siendo mayores, pero la infiltración básica medida en el riego es menor que la medida con infiltrómetros. En estas condiciones, inicialmente Z_{inf} es menor que Z_{aw} , pero a partir de determinado tiempo se hace mayor (fig. 1b). Considerando el total de los cuatro riegos (tabla 1), la lámina de agua infiltrada estimada con las funciones Z_{inf} es muy próxima a la obtenida por diferencia de caudales de entrada y salida del surco (261mm, rep I; 277mm, rep II).

En la figura 2 se observa la lámina de agua infiltrada a lo largo del surco estimada con las funciones Z_{inf} , para infiltración y perímetro mojado variables y constantes, la medida con sonda de neutrones y la estimada a partir de Z_{aw} . La mayor diferencia entre considerar los parámetros de infiltración constantes o variables a lo largo del surco se aprecia en el coeficiente de uniformidad (Tabla 1). Este, que ha sido calculado como $CU=(1-CV)*100$ (Wilcox y Swailes, 1947) resulta sobreestimado de forma importante cuando se considera infiltración constante, y en el primer riego también lo es cuando se considera PM constante. En el primer riego el perímetro mojado es muy variable debido a las altas tasas de infiltración, que provocan elevadas

diferencias de caudal entre cabeza y cola del surco, constituyendo junto con la infiltración la principal fuente de variación del agua infiltrada.

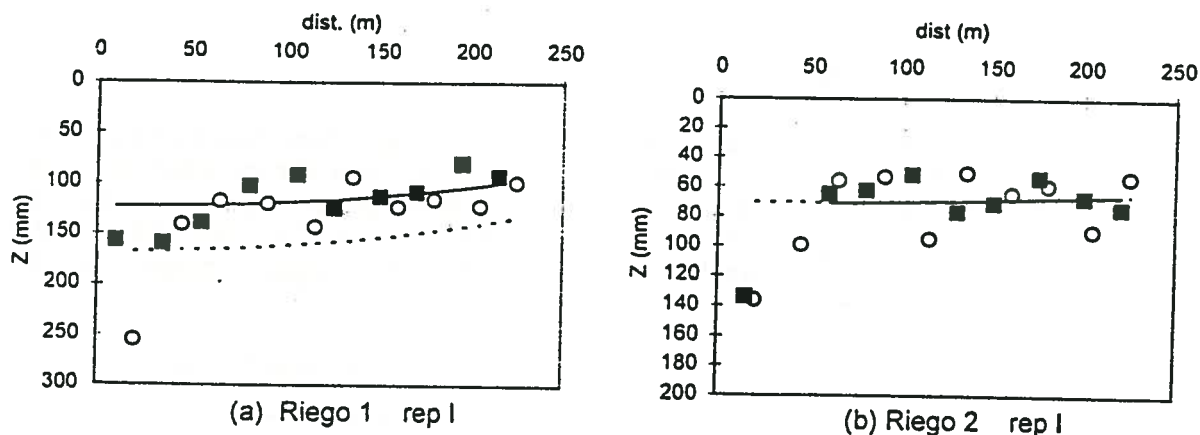


Figura 2. Lámina de agua infiltrada a lo largo del surco estimada con funciones Z_{inf} con infiltración y perímetro mojado variables (cuadrados) y constantes (línea continua), con la función Z_{aw} (línea discontinua) y medida con sonda de neutrones (círculos)

En los siguientes riegos, la variabilidad de la infiltración es la fuente de variación más relevante y casi exclusiva. Estos resultados confirman los presentados por Oyonarte y Mateos (1995) a partir de la descomposición de la varianza del agua infiltrada. Por último, el coeficiente de uniformidad estimado a partir de Z_{inf} con infiltración constante es muy similar al estimado desde Z_{aw} , lo que es de esperar puesto que la única fuente de variación considerada es el tiempo de contacto.

La eficiencia resulta menos afectada por la consideración o no de funciones de infiltración medias o variables. En la tabla está calculada para una lámina objetivo igual a la media infiltrada. En estas condiciones se aprecia un ligero incremento de la eficiencia cuando se considera la infiltración constante. Este comportamiento de la eficiencia es también señalado por Bali y Wallender (1987).

La uniformidad del agua infiltrada medida con sonda de neutrones en 1994 es menor que la estimada con las funciones Z_{inf} , considerando infiltración y perímetro mojado variable. Esto pudo deberse a que los ensayos en los que se midió con sonda de neutrones y con los infiltrómetros fueron realizados en años sucesivos, aunque se intentó que las condiciones del suelo fuesen similares, y en condiciones de flujo de agua diferentes. Por otro lado, el área de medida de la sonda de neutrones es muy inferior a la de los infiltrómetros, lo que debe redundar en una mayor variabilidad. Estas diferencias también pueden examinarse en la figura 2. En ella se puede observar que el primer punto de medida con sonda de neutrones estaba situado en una zona de infiltración anormalmente alta, por lo que detecta en las dos ocasiones una lámina de agua infiltrada muy elevada en comparación con el resto del campo. Este punto de alta infiltración no fue detectado con los infiltrómetros en las condiciones de un primer riego (fig

2a), pero sí cuando se volvieron a instalar en condiciones de un segundo riego (fig 2b). Las diferencias en uniformidad son grandes en el primer riego y tercer riego y mínimas en el segundo (tabla 1), lo que indica que, o bien los errores cometidos en la estimación de la lámina infiltrada de agua con sonda de neutrones han sido grandes en algunos casos, o bien con los infiltrómetros se ha subestimado la variabilidad de la infiltración.

		REP I					REP II				
		ipv	iv	ic	so	ri	ipv	iv	ic	so	ri
Riego 1	Z	117	116	115	113	155	127	128	123	147	157
	CU	77.9	86.9	93.2	67.5	92.8	79.6	84.5	93.9	75.2	93.5
	Ea	60.6	63.2	64.5	64.3	66.5	63.3	64.6	66.0	66.2	66.5
Riego 2	Z	72	70	69	75	69	90	86	86	78	66
	CU	68.1	68.3	97.2	64.4	97.5	79.9	80.0	97.2	75.3	97.5
	Ea	45.6	44.4	48.5	43.6	48.5	49.4	49.4	49.6	46.6	46.9
Riego 3	Z	81	80	81	72	72	74	73	76	65	78
	CU	77.2	77.8	97.9	58.4	98.0	86.6	87.9	97.6	71.5	97.3
	Ea	55.0	55.0	59.9	50.4	54.2	54.7	54.2	54.2	46.2	58.5
Total	Z	270	266	265	281	296	290	286	285	290	302
	CU	80.0	82.2	95.8	65.4	95.1	85.1	87.2	95.8	75.4	95.5
	Ea	55.0	55.4	57.9	55.7	66.1	57.1	57.3	59.0	55.9	59.1

Tabla 1. Lámina media infiltrada (Z), coeficiente de uniformidad (CU) y eficiencia de aplicación (Ea) con infiltración y perímetro mojado variable (ipv), infiltración y perímetro mojado constante (iv) e infiltración y perímetro mojado constantes (ic) a partir de Z_{inf} . Lámina media infiltrada y coeficientes de variación a partir de medidas de sonda (so) y de Z_{aw} (ri)

No es clara la existencia de autocorrelación espacial entre los valores de la infiltración acumulada tras 250 min en los infiltrómetros, ni entre los valores de k y f_0 . Los semivariogramas son similares al de la figura 3 salvo algún caso en el que se observa una cierta tendencia, siempre con una gran dispersión. En general, la autocorrelación espacial encontrada en propiedades físicas del suelo relacionadas con la infiltración lo ha sido para distancias iguales o menores de 25 m. Bautista y Wallender (1985), con infiltrómetros de surcos bloqueados en un suelo arcillo limoso la encontraron en f_0 a distancias menores de 10 m y en Z a distancias menores de 8 m; Fontheh y Podmore (1994) encuentran autocorrelación para los valores de la conductividad hidráulica en saturación para distancias inferiores a 25 m. Hasta 50 m ha sido encontrada autocorrelación espacial por Vieira y cols (1981) en el caso de f_0 , mientras que también para f_0 Jaynes y Hunsaker (1989) no la encuentran para distancias superiores a 3 m. De un ensayo próximo (Palomo y cols. 1996), se recogieron medidas de f_0 tomadas con 8 infiltrómetros iguales a los usados en este trabajo, situados sobre un surco cada 5 m en condiciones de primer riego. Aunque se aprecia autocorrelación espacial hasta 16 m, la varianza de infiltrómetros situados dentro de un radio de 20 m fue mayor que la encontrada en

nuestros ensayos. En cualquier caso, la ausencia de autocorrelación encontrada con nuestros datos indica una distribución totalmente aleatoria para distancias superiores a nuestros 23 m.

En vista de lo anterior el siguiente paso fue determinar a qué tipo de distribución se ajustan nuestras funciones. Otros autores han encontrado ajustes de f_0 tanto a una distribución normal (Vieira y cols., 1981) como a una logarítmico-normal (Sisson y Wierenga, 1981). Sharma y cols. (1980) encontraron que tanto k como f_0 se ajustan mejor a la distribución logarítmico-normal. El test de Wilk-Shapiro indica que nuestros valores de k y f_0 se ajustan tanto a una distribución normal como a una logarítmico-normal para un nivel de significación del 5 por 100.

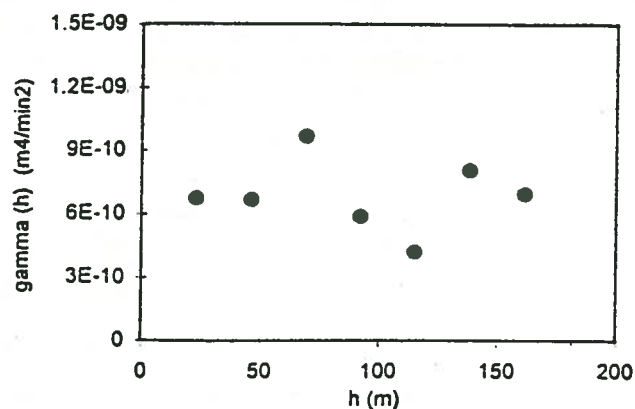


Figura 3. Semivariograma de f_0 . Riego 1, rep I

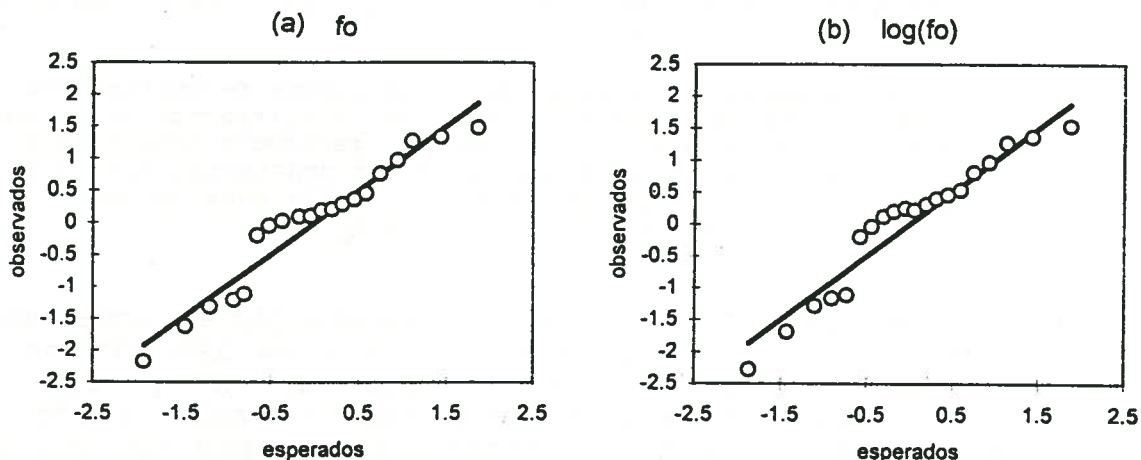


Figura 4. Valores normalizados de f_0 (a) y $\log(f_0)$ (b) observados y esperados si se ajustasen a una distribución normal. Riego 1

Además, los valores normalizados de k y f_0 se aproximan a los esperados asumiendo que se distribuyen según una normal de media 0 y varianza 1, ocurriendo lo mismo previa transformación logarítmica (fig. 4). En el resto de los riegos, tanto para k como para f_0 , se obtienen resultados similares al de la fig. 4.

Conclusiones

El coeficiente de uniformidad es sobreestimado cuando en la evaluación del riego se considera el tiempo de contacto como única fuente de variación del agua infiltrada durante el riego. La variabilidad de los parámetros de infiltración, y en el caso

de altas tasas de infiltración la del perímetro mojado, ha de ser considerada, especialmente cuando el interés de la evaluación sea conocer la uniformidad. Esta variabilidad tiene menor influencia en la eficiencia del riego, al menos en condiciones de suelo poco variable en textura.

No se ha encontrado autocorrelación espacial de la infiltración ni de los parámetros k y f_0 de la ecuación de Kostiakov-Lewis para distancias superiores a 23 m. En las condiciones estudiadas, la distribución de estos parámetros pueden ajustarse tanto a una distribución normal como a una logarítmico-normal.

Bibliografía

- Bali, K. y W.W. Wallender. 1987. Water application under varying soil and intake opportunity time. *Trans. ASAE* 30:442-448.
- Bautista, E. y W.W. Wallender. 1985. Spatial variability of infiltration in furrows. *Trans. ASAE* 28:1846-1851,1855.
- Childs, J.L., W.W. Wallender y J.W. Hopmans. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *J. Irrig. Drain. Engin.* 119:74-90.
- Clemmens, A.J. 1981. Evaluation of infiltration measurements for border irrigation. *Agric. Water Manage.* 3(4):251-267.
- Clemmens, A.J. 1988. Method for analyzing field scale surface irrigation Uniformity. *J. Irrig. Drain. Engin.* 114:74-88.
- Fonteh, M.F. y T. Podmore. 1994. Application of geostatistics to characterize spatial variability of infiltration in furrow irrigation. *Agric. Water Manage.* 25:153-165.
- Jaynes, D.B. y D.J. Hunsaker. 1989. Spatial and temporal variability of water content and infiltration on a flood irrigated field. *Trans. ASAE* 32(4):1229-1238.
- Oyonarte, N.A. y L. Mateos. 1995. Variabilidad del agua infiltrada en riego por surcos. XIII Jornadas Técnicas de Riegos. AERYD. Puerto de la Cruz, Tenerife. Junio 1995.
- Palomo, M.J., N.A. Oyonarte, L. Mateos y J. Roldán. 1996. Efecto del perímetro mojado sobre la infiltración en riego por surcos. XIV Congreso Nacional de Riegos. AERYD Aguadulce, Almería. Junio 1996
- Sharma, M.L., G.A. Gander y C.G. Hunt. 1980. Spatial variability of infiltration in a watershed. *J. Hidrol.* 45:101-122.
- Sisson, J.B. y P.J. Wierenga. 1981. Spatial variability of Steady-State Infiltration Rates as a stochastic process. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:699-704.
- Vieira, S.R., D.R. Nielsen y J.W. Biggar. 1981. Spatialvariability of Field-Measured Infiltration Rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:1040-1048.
- Walker, W.R. y G.V. Skogerboe. 1987. *Surface Irrigation. Theory and práctica.* Precinte-Hall, Inc. New Jersey. 386pp.
- Wilcox, J.C. y G.E. Swailes. 1947. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. *Sci. Agric.* 27:565.

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DEL MODELO WEPP PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE SUELO: RESULTADOS PARA UNA ZONA DE NAVARRA.

Gastesi, M. *, Casalí, J. * (P), López, J. J. *

* Universidad Pública de Navarra. Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural.

RESUMEN

En este artículo se estudia la aplicabilidad del modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) en condiciones locales mediante el uso del mismo en parcelas con dos suelos diferentes. Se consideran dos manejos: cultivo de trigo y barbecho. Se utilizan datos climáticos de los años 1992 y 1993 de la estación automatizada de Carcastillo-La Oliva (Navarra). Queda evidenciada la gran potencialidad del modelo. Sin dejar de considerar que la mayoría de los parámetros han sido estimados y el corto periodo de tiempo simulado, las pérdidas calculadas parecen realistas y muy inferiores a las estimadas para las mismas condiciones por el modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

ABSTRACT

In this paper the applicability of the WEPP model (Water Erosion Prediction Project) for local conditions is analyzed by the use of the model in cultivated fields with different soil types. Two uses of the soil are considered: winter wheat and fallow. Climatic data during the 1992-1993 period from the automatic meteorological station of Carcastillo-La Oliva (Navarra) are used for simulation. WEPP emerges as a powerful tool for land use management. Most of model parameters have been estimated, and a short period of time has been simulated; in spite of this limitations, soil losses seem realistic and much smaller than those calculated for RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).

1.- INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo puede en determinados casos llegar a ser un problema importante, de modo que conocer y estimar su magnitud y sus consecuencias resulta de gran interés. Estudios como los mapas de erosión actual y potencial en Navarra (Donézar et al., 1990) o el mapa de erosión hídrica en las áreas no cultivadas de Navarra (Del Valle de Lersundi y Donézar, 1995) son un esclarecedor punto de partida sobre la problemática local. Como una conclusión del citado mapa de erosión actual se extrae que alrededor del 40% de la superficie ocupada por tierras de cultivo en Navarra sufre problemas de erosión en algún grado. Este dato indica una necesidad de incrementar nuestros conocimientos sobre la realidad de la erosión en dichas áreas, los mecanismos que la gobiernan, así como de disponer de herramientas capaces de estimar los efectos que distintos manejos y otros condicionantes producen en las pérdidas de suelo.

En este contexto cobran interés los modelos matemáticos basados en procesos físicos, que describen los mecanismos que rigen el movimiento del agua y el arranque, transporte y deposición de los sedimentos. El modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Flanagan y Nearing, 1995) está llamado a ser una de las más poderosas herramientas predictivas, cuyo desarrollo y utilización a buen seguro se adentrarán en el próximo siglo. Con este nuevo

enfoque predictivo se pretenden subsanar muchas de las limitaciones de los anteriores modelos de carácter empírico (USLE/RUSLE) desarrollados también por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)(Renard et al., 1996). WEPP posibilita analizar conjuntamente la influencia de distintas prácticas agrícolas, como laboreo, alternativas de cultivos, medidas de conservación, riego, etc., sobre erosión, eficiencia en el uso del agua y productividad, lo que constituye una ayuda valiosísima para las tareas de planificación y gestión de recursos. No obstante, para poder utilizar con garantías estos modelos es necesaria una etapa de calibración y contraste de resultados, que en muchas ocasiones no puede llevarse a cabo debido a la inexistencia de datos.

El presente trabajo pretende ser una introducción al análisis de la aplicabilidad de WEPP en nuestras condiciones, contemplando las dificultades que emergen y los resultados que proporciona. En concreto, se van a exponer algunos de los resultados obtenidos de la aplicación de WEPP a dos parcelas con suelos diferentes en la zona de Carcastillo (Navarra). Los datos de pérdida de suelo obtenidos con WEPP se contrastarán con el modelo que hasta ahora ha sido más extensamente utilizado, que es RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al.) siendo conscientes de las diversas limitaciones que para nuestro entorno tiene la utilización de RUSLE.

2.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo WEPP del USDA representa una nueva tecnología predictiva basada en los principios fundamentales de generación estocástica de variables climáticas, infiltración, hidrología, física de suelos, fisiología vegetal, hidráulica y mecanismos de erosión. La aplicación para laderas (hillslope) del modelo aporta grandes ventajas sobre los otros procedimientos existentes. La más notable es la posibilidad de estimación de distribuciones espaciales y temporales de pérdidas de suelo. Además, dado que el modelo está basado en procesos físicos, puede ser utilizado en un amplio rango de condiciones. En la aplicación de ladera se consideran los siguientes procesos: erosión en regueros y entre regueros, transporte y deposición de sedimentos, infiltración, consolidación del suelo, efectos de residuos y cubierta vegetal en el arranque del suelo y en la infiltración, costra superficial, hidráulica de los surcos, escorrentía superficial, crecimiento vegetal, descomposición de residuos, percolación, evaporación, transpiración, fusión de la nieve, efectos de los suelos congelados sobre infiltración y erodibilidad, clima, efectos del laboreo sobre las propiedades del suelo y efectos de la rugosidad aleatoria del suelo. El modelo también considera las variaciones espaciales y temporales en topografía, rugosidad superficial, propiedades del suelo, cultivos y condiciones de usos del suelo en la ladera. En aplicaciones de cuenca, el modelo permite el agrupamiento de diferentes perfiles de ladera con canales y embalses. Agua y sedimentos provenientes de una o más laderas pueden circularse de este modo a través de pequeñas cuencas. Además el modelo simula procesos de arranque, transporte y deposición de sedimentos en los canales. (Flanagan et al., 1995)

WEPP requiere ficheros de entrada que incluyen información espacial, suelo, cultivo, y manejo de cultivo. Además requiere de un fichero climático, que puede ser creado por medio del generador climático CLIGEN (Nicks et al., 1995) o bien construirse con datos medidos. Las variables requeridas son, en base diaria: hietograma, temperaturas máximas y mínimas, velocidad y dirección del viento, radiación solar y humedad del aire. Estas variables climáticas son utilizadas por componentes del programa relacionados con crecimiento vegetal y descomposición de residuos, balance de agua, y estimación de volumen, duración y pico de la

escorrentía. En Flanagan y Livingston (1995) se encuentra información necesaria para la confección de estos ficheros.

La ecuación utilizada en WEPP para calcular la infiltración es la de Main-Larson (modificada de Green y Ampt). El exceso de lluvia es calculado como la diferencia entre la intensidad de lluvia y la tasa de infiltración durante el evento de lluvia. Los procedimientos de circulación del exceso de lluvia incluyen soluciones analíticas a la aproximación de la ecuación de onda cinemática. A partir de esta información WEPP procede a calcular las tasas de pérdida de suelo y descarga de sedimentos.

La erosión en ladera se modeliza en WEPP distinguiendo entre erosión en regueros y erosión entre regueros. El cálculo se basa en la resolución de la ecuación de continuidad del sedimento, formulada para condiciones de régimen permanente:

$$\frac{dG}{dx} = Df + Di$$

Donde x (m) representa la distancia aguas abajo, G (kg/s/m) es la carga de sedimento, Di (Kg/s/m²) es el aporte lateral de sedimentos de las áreas entre regueros, y Df (Kg/s/m²) es la tasa de erosión en regueros o, alternativamente, de deposición. Di se considera independiente de x , y Df es positivo cuando hay arranque, y negativo cuando se produce deposición. Todos los detalles referentes a la componente de erosión del modelo pueden encontrarse en Flanagan y Nearing (1995).

La vegetación y los residuos causan un determinante efecto sobre la erosión. Por ello es necesario contar con estimaciones de la cubierta vegetal y de los residuos que en cada momento están presentes. Estas estimaciones las lleva a cabo un componente basado en el modelo EPIC (Arnold et al., 1995). Todos los cálculos se llevan a cabo en base diaria. Las rutinas de descomposición de residuos se basan en el modelo de Stroo (Stott et al., 1995). El modelo calcula casi todas las características importantes del crecimiento vegetal, incluyendo multitud de prácticas de manejo.

Los cambios temporales de las propiedades del suelo que afectan a la erosión y a la escorrentía debidos a los efectos de los agentes atmosféricos y del laboreo (rugosidad aleatoria, altura de surcos, conductividad hidráulica, erodibilidades del suelo y densidad aparente) son tenidos en consideración.

Como puede comprobarse, WEPP resulta de una muy considerable extensión y complejidad. Mayores detalles descriptivos no son objeto de este trabajo, por lo que se remite a los interesados a la ya citada publicación de Flanagan y Nearing, 1995. Una reciente descripción más sucinta puede encontrarse en Renard et al., 1996.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Se procedió primeramente a la aplicación del modelo WEPP a dos parcelas con diferente suelo e igual forma y tamaño (100x50 m²), con una pendiente única y uniforme del 8,5%. Se realizó la simulación en ambas parcelas con dos manejos diferentes. Al estudiar tan sólo parcelas simples, en este trabajo nos limitamos a utilizar la aplicación de ladera del modelo. Finalmente, se compararon los datos de pérdida de suelo obtenidos con los que en circunstancias equivalentes proporcionaría el modelo RUSLE.

Las parcelas se sitúan en las proximidades de Carcastillo (sur de Navarra), zona de clima semiárido. La precipitación media anual es de 473, 2 mm, y la temperatura media anual es de 13,1 °C. El suelo de la parcela I es de textura franca y su profundidad es de 2 m, mientras que el suelo de la parcela II es franco-arcilloso, y su profundidad es de 1,7 m.

Como datos climáticos se utilizaron dos años completos de registros (1992 y 1993) cada diez minutos en la estación automatizada de Carcastillo-La Oliva. La precipitación total registrada en el año 1992 fue de 459 mm, y en el año 1993 de 424,7. El número de acontecimientos de lluvia en cada uno de estos años fue de 95 y 94 respectivamente, ligeramente mayor al de la media histórica, que es de 86. La mayor parte de los acontecimientos de lluvia presentan escasa precipitación total. Tan sólo en un día se superaron los 30 mm (53,3 mm, concretamente). Esta cantidad, para esa duración, corresponde a un periodo de retorno entre 2 y 5 años. Se registraron además 7 acontecimientos con cantidades recogidas de entre 20 y 30 mm, siendo el resto de menor cuantía. Este dato es de relevancia, pues las observaciones parecen indicar que las pérdidas de suelo importantes son debidas a fenómenos poco frecuentes de lluvias intensas. Sin embargo, bien es cierto que sería importante analizar la intensidad de las precipitaciones acontecidas. En definitiva, se trata de dos años con pluviometría algo inferior a la media, con mayor número de días de precipitación que la media, aunque las cantidades recogidas en estos días son su inmensa mayoría de pequeña entidad.

Los manejos considerados son: A, cultivo de trigo los dos años consecutivos; B barbecho con laboreo los dos años consecutivos. El estudio de la respuesta en pérdidas de suelo ante un barbecho continuado resulta de interés para evaluar las posibles consecuencias de la política de abandono de tierras que se está fomentando, aunque para contemplar con rigor este manejo serían necesarias ciertas modificaciones en el archivo correspondiente. En cuanto al trigo, se establece la fecha de siembra a principios de octubre, y la de recolección a finales de junio. La estimación de los parámetros requeridos para la simulación del cultivo se realizó a partir de bases de datos disponibles en el manual del usuario (Flanagan y Livingston, 1995).

En la tabla 1 se resumen las características de los cuatro casos simulados:

	Cultivo de trigo	Barbecho
Suelo I	Caso IA	Caso IB
Suelo II	Caso IIA	Caso IIB

Tabla 1.- Características de los diferentes casos simulados.

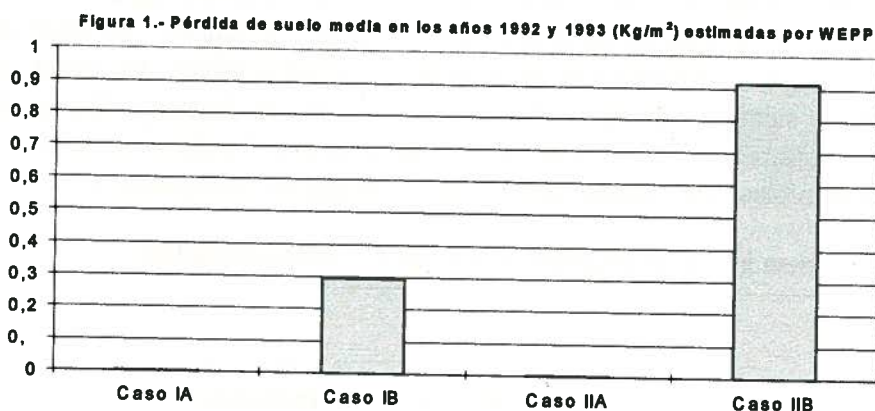
A partir de análisis del modelo se ha comprobado la gran sensibilidad del mismo a algunos de ellos, como por ejemplo la conductividad hidráulica y la erodibilidad (Nearing et al., 1990). Es por tanto en la estimación de estos parámetros en los que resulta necesario extremar el cuidado. A falta de datos medidos, la estimación de los diferentes parámetros de suelo más importantes se realiza a partir de otras propiedades físico-químicas. La metodología para la estimación de dichos parámetros está propuesta por los propios autores del modelo, y se basa en experimentaciones llevadas a cabo durante el desarrollo del propio WEPP o en otras experimentaciones de otros investigadores. Sin embargo, diversos intentos de relacionar dichos

parámetros con propiedades físico-químicas del suelo de determinación sencilla parecen haber conseguido poco éxito, como ocurre con la erodibilidad entre regueros k_i (Bajrachary et al., 1992, citado en Sharma, 1996) De todos modos, en los casos en los que no sea posible realizar experiencias propias, este tipo de estimaciones resultan imprescindibles. La tabla 2 indica los valores de los principales parámetros utilizados para cada parcela.

	Conductividad hidráulica efectiva inicial (mm/h)	Erodibilidad entre regueros (kg.s/m^4)	Erodibilidad en regueros (s/m)	Esfuerzo cortante crítico (Pa)
Parcela I	6,8	6498923	0.0113	2,88
Parcela II	2,9	4530758	0.00743	3,5

Tábla 2.- Valores de los principales parámetros utilizados para cada parcela.

Al cabo de los dos años de simulación, el número de eventos capaces de generar escorrentía es de 2 y 3 para los manejos A y B de la parcela I respectivamente. En la parcela II, estos valores son 3 y 5. La figura 1 indica la pérdida media de suelo (kg/m^2) en los dos años para ambas parcelas y con los dos manejos considerados.



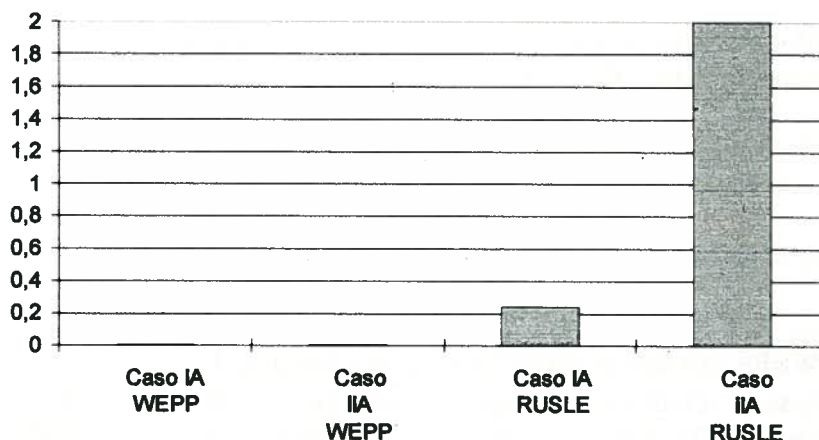
Se aprecia cómo la erosión es prácticamente nula en ambas parcelas mientras se mantienen cultivadas de trigo. Por el contrario, la erosión alcanza valores importantes cuando el suelo se mantiene en barbecho, siendo de mucha mayor magnitud la erosión acontecida en la parcela II. La erosión estimada en el caso IIB es de importancia, teniendo en cuenta además que los años simulados no parecen presentar acontecimientos de lluvia de especial virulencia. Las pérdidas están en consonancia con lo que la observación visual constante de técnicos de la zona atestigua: en los suelos de la parcela I no resulta evidente una pérdida importante, mientras que sí lo es en los suelos correspondientes a la parcela II, en los que, en condiciones de barbecho, se observan pérdidas de importancia. La conductividad hidráulica, tal y como se concluye en numerosos trabajos (Nearing et al., 1990), se revela también aquí (Gastesi, M. J., 1996) como un parámetro fundamental, en cuya estimación hay que ser particularmente cuidadoso. Vemos así que, aunque las erodibilidades estimadas son menores en los suelos de la parcela II, la conductividad efectiva es menor, lo propicia en esos suelos un mayor número de acontecimientos en los que se produce escorrentía, y finalmente una mayor pérdida de suelo

que en la parcela I (en condiciones de barbecho). En Alberts et al. (1995) y en Flanagan y Livingston (1995) puede encontrarse toda la información a cerca del significado, estimación y uso por el modelo de la conductividad hidráulica.

Para finalizar, se estima conveniente comparar los resultados de pérdidas en estos dos años aportados con el modelo WEPP con los del modelo cuyo uso ha sido más extendido en los últimos años, que es USLE, cuya última versión revisada y dispuesta para su uso informático se denomina RUSLE (Foster y Renard, 1995), no olvidando que este modelo estima una pérdida media anual. Es conocida la problemática que presenta la aplicación sin calibración en nuestras condiciones de modelos como éste, dado su carácter empírico y el alto grado de incertidumbre en la determinación de muchos de los valores necesarios para el cálculo.

Sin olvidar estas consideraciones, los resultados de la aplicación de RUSLE para un cultivo de trigo con similar manejo al supuesto en la simulación con WEPP se aprecian en la figura 2. Para la parcela I se estima una pérdida media anual de 0,24 kg/m², mientras que para la parcela II estas pérdidas se elevan a 2.0 kg/m². Estos datos muestran que RUSLE incrementa grandemente la magnitud de las pérdidas estimadas con respecto a WEPP. Esto podría explicarse por el hecho de que en los años simulados con WEPP no ha habido acontecimientos erosivos de gran trascendencia, o también por una tendencia de RUSLE a sobreestimar las pérdidas. En todo caso, tanto RUSLE y WEPP atribuyen mucho mayores pérdidas a los suelos de la parcela II.

Figura 2.- Comparación de estimaciones entre RUSLE y WEPP (años 92 y 93 para WEPP)(Kg/m²)



4.- CONCLUSIONES

WEPP se revela como una herramienta de gran potencialidad y complejidad. Aporta además grandes posibilidades en la planificación de la gestión y uso del suelo. Faltan datos medidos suficientes para una utilización con rigor del WEPP, pero con parámetros estimados según las recomendaciones de los autores del modelo se obtienen resultados acordes con lo que según el sentido común y la observación cabría esperar, aunque en este aspecto es imprescindible una gran prudencia. Existen factores clave como la conductividad y erodibilidades en cuya estimación hay que ser especialmente cuidadoso dada la sensibilidad que el modelo muestra a dichos parámetros. Queda en evidencia una vez más la imperiosa necesidad de disponer de datos reales medidos de los mismos.

Comparando los resultados con los que proporciona RUSLE, se observa que las pérdidas estimadas con WEPP son mucho menores, aunque no hay que olvidar que para la aplicación de WEPP se ha trabajado sólo con dos años de datos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Servicio de Estructuras Agrarias del Gobierno de Navarra su colaboración mediante la aportación de diversos datos requeridos, particularmente al Dr. Miguel Donézar y D. Joaquín Del Valle de Lersundi.

REFERENCIAS

Alberts, E. E., M. A. Nearing, M. A. Weltz, L. M. Risse, F. B. Pierson, X. C. Zhang, J. M. Laflen and J. R. Simanton, 1995. Soil Component. In Flanagan, D. C., M. A. Nearing (Eds.). USDA-Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL). NSERL Report No 10.

Arnold, J. G., M. A. Weltz, E. E. Alberts and D. C. Flanagan, 1995. Plant Growth component. In Flanagan, D. C., M. A. Nearing (Eds.). USDA-Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL). NSERL Report No 10.

Del Valle de Lersundi y M. Donézar, 1995. Erosión hídrica en las áreas no cultivadas de Navarra. Navarra Agraria, nº 90. pp. 37-43.

Donézar, M., M. Illarregui, J. Del Val, J. Del Valle de Lersundi, 1990. Erosión actual en Navarra. Gobierno de Navarra. Ministerio de Comercio y Turismo.

Donézar, M., M. Illarregui, J. Del Val, J. Del Valle de Lersundi, 1990. Erosión potencial en Navarra. Gobierno de Navarra. Ministerio de Comercio y Turismo.

Flanagan, D. C., S. Livingston (Eds.), 1995. WEPP User Summary. USDA-ARS. 131pp.

Flanagan, D. C., J. C. Ascough, A. D. Nicks, M. A. Nearing and J. M. Laflen, 1995. Overview of the WEPP erosion prediction model. In Flanagan, D. C., M. A. Nearing (Eds.). USDA-Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL). NSERL Report No 10.

Flanagan, D. C., M. A. Nearing (Eds.), 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project. Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL) NSERL Report No 10.

Foster, G.R. and G.K. Renard (Eds.), 1995. RUSLE. Revised Universal Soil Loss Equation. Version 1.04. Soil and Water Conservation Society. 143 pp.

Gastesi, M. J., 1996. Estimación de pérdidas de suelo en parcelas de cultivo mediante el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project). E. T. S. I. A. Universidad Pública de Navarra. Trabajo Final de Carrera. 267 pp.

Nearing, M. A., Deer- Ascough, L., Laflen, J. M. 1990. Sensivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. American Society of Agricultural Engineers. Vol 33 (3):839-849. June 1990.

Nicks, A. D., L. J. Lane and G. A. Gander. Weather generation. In Flanagan, D. C., M. A. Nearing (Eds.). USDA-Water Erosion Prediccion Project.Hillsolpe Profile and Watershed Model Documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL). NSERL Report No 10.

Renard, K. G., L. Lane, G. R. Foster, J. M. Laflen, 1996. Soil loss estimation. In Agassi, M. (Ed.). Soil Erosion , Conservation and Rehabilitation. Marcel Dekker, Inc. 402 pp.

Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, and D. C. Yoder. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA-ARS. En prensa.

Sharma, P.P, 1996. Interrill erosion . In Agassi, M. (Ed.). Soil Erosion, Conservtaion and Rehabilitation. Marcel Dekker, Inc. 402 pp.

Stott, D. E., E. E. Alberts and M. A. Wertz, 1995. Residue decomposition and Management. In Flanagan, D. C., M. A. Nearing (Eds.). USDA-Water Erosion Prediccion Project.Hillsolpe Profile and Watershed Model Documentation. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory (NSERL). NSERL Report No 10.

ESTUDIO DE LA CALIDAD DE UN AGUA RESIDUAL DEPURADA EN SU USO PARA RIEGO.

Ordóñez, R.¹ (P), Polo, M.J.², Giráldez, J.V.², González, P.¹

(1) Dpto. de Suelos y Riegos, D.G.I.E.A. Junta de Andalucía.

(2) Dpto. de Agronomía, E.T.S.I.A.M., Universidad de Córdoba.

Resumen.

Se ha estudiado la calidad para riego de las aguas residuales depuradas procedentes de la Estación Depuradora La Golondrina de Córdoba para su posible reutilización agrícola.

Los primeros análisis realizados al efluente muestran resultados esperanzadores, no sólo por su composición sino porque las variaciones temporales detectadas en ciertos parámetros limitantes en un agua de riego, parecen deberse casi exclusivamente a las lluvias registradas más que al origen del agua en sí.

Summary.

The quality of the effluent from the sewage treatment plant La Golondrina in Cordoba as irrigation water has been studied. The first results seem to be favourable for the study, not only in terms of the effluent composition itself but also because temporal variations of parameters which poses a problem in irrigation waters appear to be caused by the pluviometry registered, and not by the treatment process.

1. Introducción.

La situación de escasez de agua sufrida por la agricultura en los últimos años y el problema social que de esto se deriva, justifica el interés en buscar medios de gestionar mejor los recursos hídricos existentes o reutilizar aguas que, en principio, no se usaban para este fin.

El vertido de efluentes urbanos al suelo, bien para su eliminación o su utilización directa para regadío, no presenta gran novedad; de hecho, esta era una práctica habitual en Alemania e Inglaterra durante los siglos XVI y XVII, sufriendo un importante retroceso a principios del siglo XX, debido al encarecimiento del precio del suelo y al mayor riesgo de estos métodos por el vertido de efluentes de origen industrial a las redes de saneamiento urbano (Mantecón y col., 1991).

La reutilización de cualquier tipo de agua residual depurada, requiere como paso previo un estudio de su composición. Esta puede sufrir variaciones significativas, incluso cuando el agua provenga casi exclusivamente de fuentes domésticas, como es el caso concreto en estudio, ya que los hábitos alimenticios, el uso de productos domésticos, el consumo de agua, la pluviometría, etc., pueden jugar un papel importante en la calidad de la misma (Downing, 1983).

Otro problema que hay que tener en cuenta a la hora del vertido de los efluentes depurados, es que la depuración biológica puede que no elimine totalmente muchas de las sustancias tóxicas presentes en las aguas residuales, sustancias como los metales pesados o, en general, sustancias no biodegradables, las cuales, debido a modificaciones del pH del suelo o

complejación con ácidos orgánicos del mismo (Delgado y col., 1994), se pueden incorporar al suelo de forma paulatina entrañando riesgos que es conveniente evaluar.

El objetivo de este trabajo ha sido estimar la composición y variación temporal del agua residual depurada procedente de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.) de Córdoba, como primer paso para contemplar su reutilización en la agricultura.

2. Materiales y métodos.

Durante aproximadamente seis meses se han estado tomando muestras de agua residual depurada en la E.D.A.R. La Golondrina de Córdoba. La muestra de agua, tomada con una periodicidad semanal, era la integrada de 24 horas, para compensar las variaciones horarias.

Para estimar su composición se han determinado los siguientes parámetros en laboratorio:

- Sólidos en suspensión, D.B.O.5 y D.Q.O.
- Conductividad eléctrica y pH.
- Aniones: Carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos.
- Cationes: Calcio, magnesio, potasio y sodio.
- Nitrógeno total: Nitratos, nitritos y amoniacal.
- Fósforo soluble.
- Elementos minoritarios y metales pesados: Fe,Cr,Mn,Ni,Cu,Zn,As,Cd,Pb y Sn.

La conductividad eléctrica y el pH se determinaron en un conductímetro y un pHmetro, respectivamente. La concentración de los distintos aniones se estimó mediante valoraciones volumétricas. Los cationes se determinaron por aspiración directa de la muestra en un espectrofotómetro de absorción atómica en el caso del calcio y el magnesio, y por emisión para el sodio y el potasio.

El nitrógeno en forma de nitratos y nitritos se analizó según el método de Griess-Ilosvay, modificado por Barnes y Tolkard y, posteriormente, por Bremmer (1965), mientras que el amoniacal se efectuó por el método de azul de indofenol (Kemper, 1974).

Los elementos traza y metales pesados se determinaron por espectrometría de plasma de acoplamiento inductivo (I.C.P.).

3. Resultados y discusión.

La composición media global del efluente objeto del análisis aparece reflejada en la tabla I.

	C.E.	N.NO ₃	N.NO ₂	N.NH ₄	N _T	Ca	Mg	Na	K	CO ₃ H ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	P _{sol}	pH	R.A.S.	
	dS/m	ppm				meq/L								ppm		
Máx.	1.07	0.63	0.29	52.8	52.95	3.52	1.29	5.29	0.84	4.54	6.75	2.7	4.54	8.25	4.51	
Mín.	0.46	0.01	0.01	5.19	5.88	1.57	0.49	1.5	0.25	0.37	0.66	1.05	0.37	7	1.27	
Med.	0.87	0.16	0.06	21.24	21.45	2.88	1.01	4.10	0.60	2.73	4.58	2.22	2.89	7.59	2.96	

Tabla I. Composición media del efluente en estudio.

Son varios los parámetros a considerar a la hora de estimar la calidad de un agua en su uso para riego. En lo que se refiere a la salinidad, los bajos valores de conductividad eléctrica a lo largo del período controlado (fig. 1) permiten indicar su utilización sin problemas para la mayoría de los cultivos; no obstante, se observa una tendencia al alza en primavera, que coincide con las menores precipitaciones registradas y una mayor concentración de las aguas.

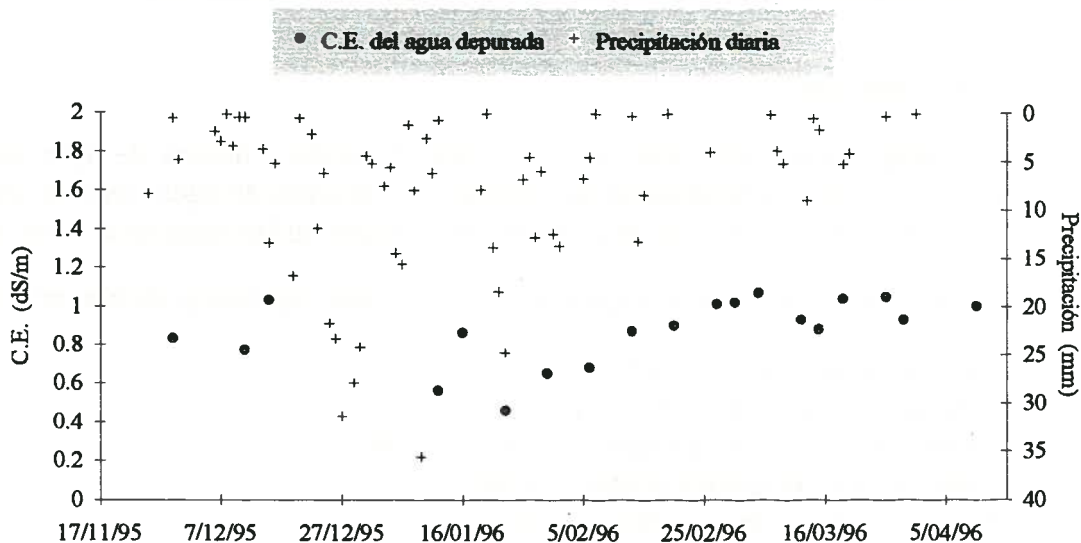


Fig. 1. Evolución temporal de la C.E. del efluente y las precipitaciones registradas.

De todos los aniones y cationes analizados, los más relacionados con el contenido total de sales son los cloruros y el sodio, presentando coeficientes de correlación de 0.93 y 0.92, respectivamente, con la conductividad eléctrica. Además del valor global de sales en un agua, la consideración individualizada de alguno de sus iones permite estimar la posibilidad de su uso para riego. De todos, quizás el sodio sea el más problemático. Este elemento aportado con el agua de riego, se puede acumular en el suelo en virtud de reacciones químicas que se producen en el mismo, dando lugar a que este se alcalinice excesivamente.

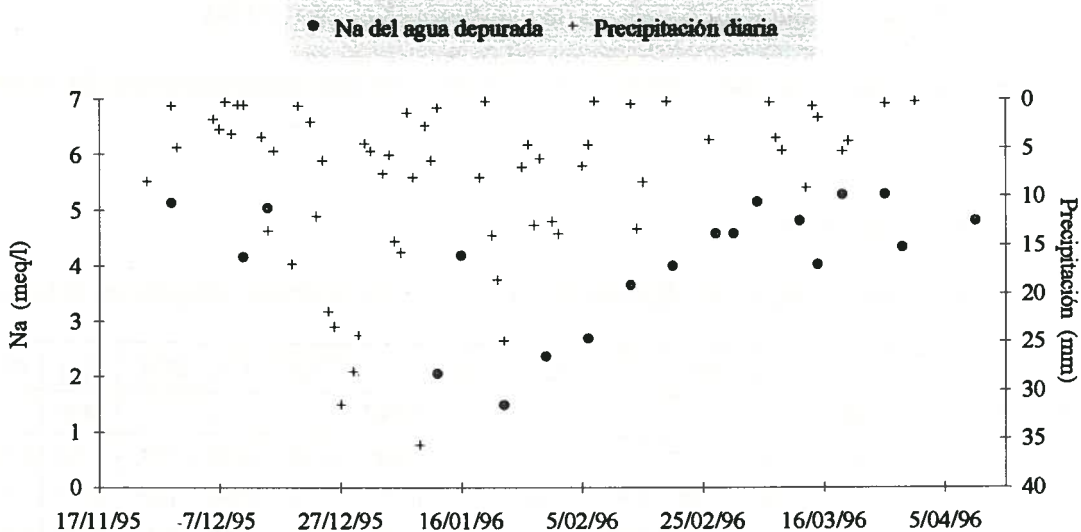


Fig. 2. Evolución de la concentración de sodio frente a la pluviometría registrada.

Los valores de este catión a lo largo del período ensayado oscilan de 1.50 a 5.16 meq/l, y su evolución temporal coincide con la registrada por la pluviometría (fig. 2). Los altos valores registrados en las últimas muestras analizadas realzan el interés de su control continuado; de hecho, niveles de este catión superiores a 3 meq/l (Ayers y Wescot, 1985) pueden dar lugar a toxicidad en cultivos sensibles, sobre todo si se emplea el riego por aspersión.

Aun cuando la R.A.S. de estas aguas no es muy elevada, la correlación observada con los valores registrados para el sodio (fig. 3), indican la necesidad de seguir observando su valor.

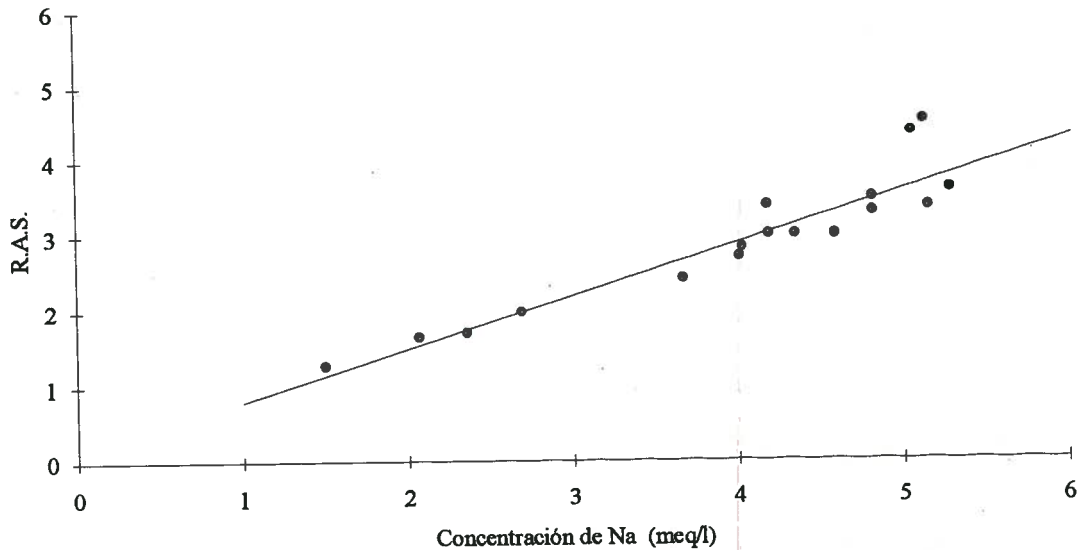


Fig. 3. Correlación observada entre el valor de la R.A.S. y la concentración de sodio.

En lo que se refiere a la fracción aniónica en un agua de riego es interesante controlar las concentraciones de cloruros y bicarbonatos. A lo largo del período estudiado, los cloruros no presentan variaciones significativas, sobre todo en las últimas muestras (fig. 4), manteniéndose siempre en niveles considerados como aceptables para determinados cultivos sensibles. No obstante, el progresivo aumento experimentado en los valores de bicarbonatos de estas aguas limita su uso en el caso de que se vaya a utilizar con aspersores (Ayers y Wescot, 1985).

Aun cuando no se han detectado diferencias en la composición según el día de la semana, como indican algunos trabajos (Rodier, 1978), sí se observan variaciones estacionales que se confirmarán cuando se complete el estudio.

De la fracción nitrogenada, destacar únicamente que la forma predominante es la amoniacal (lo cual resulta lógico ya que la depuración se realiza mediante un proceso biológico que potencia las condiciones reductoras), oscilando sus valores entre 5.19 y 52.8 ppm, y que se observa la tendencia al aumento, ya comentada para otros iones.

La estimación de elementos traza y metales pesados se realizó no sólo desde el punto de vista de la toxicidad que un exceso de estos pudiera causar al cultivo, sino atendiendo también a que su incorporación continuada al suelo con el riego podría determinar una acumulación de los mismos en éste y consecuentemente alterar la calidad de acuíferos subterráneos.

Los valores de estos elementos se reflejan en la tabla II. Como se puede apreciar, debido fundamentalmente al origen doméstico de este efluente, se encuentran por debajo del límite

señalado en el borrador del Proyecto de Real Decreto por el que se establecen las condiciones básicas para la reutilización directa de las aguas residuales depuradas (Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente), lo que da idea de la inocuidad de estas aguas en lo que al medio ambiente se refiere.

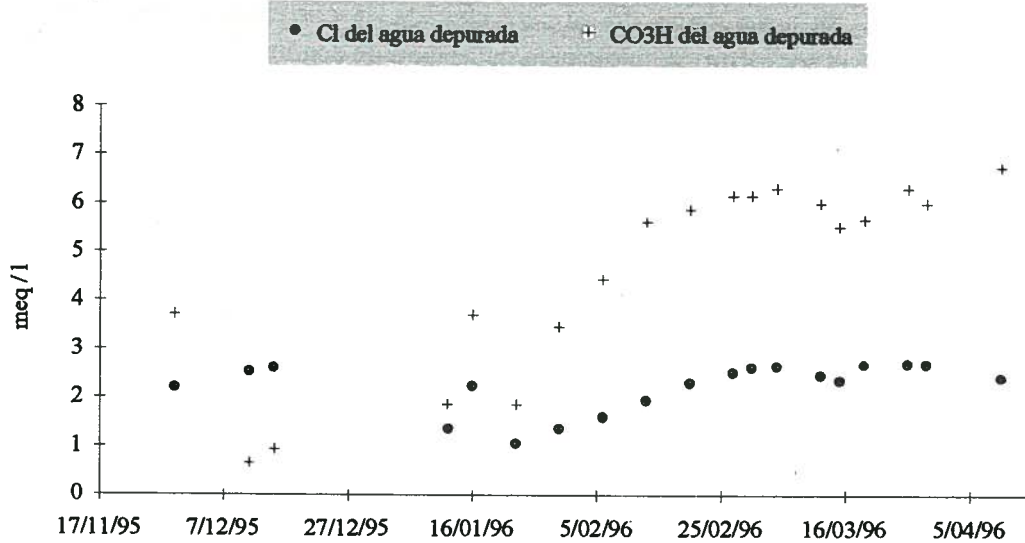


Fig. 4. Evolución temporal de las concentraciones de cloruros y bicarbonatos en el efluente.

	Fe	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Sn	As
	ppm									
Límite ¹	10	0.2	10	2	5	10	0.05	0.5	10	1
29-11-95	<0.07	<0.02	0.023	<0.04	0.06	0.10				
15-12-95	<0.07	<0.02	0.090	<0.04	0.05	0.11	<0.03	<0.11	<0.03	<0.17
12-1-96	<0.07	<0.02	0.015	<0.04	<0.02	0.04	<0.03	<0.11	<0.03	<0.17
16-1-96	<0.07	<0.02	0.013	<0.04	<0.02	0.06	<0.03	<0.11	<0.03	<0.17
23-1-96	<0.07	<0.02	0.005	<0.04	0.03	0.10	<0.03	<0.11	<0.03	<0.17
30-1-96	<0.07	<0.02	0.016	<0.04	<0.02	0.07	<0.03	<0.11	<0.03	<0.17
6-2-96	<0.07	<0.02	0.112	<0.04	<0.02	0.11	<0.03	<0.11	0.06	<0.17
13-2-96	<0.07	<0.02	0.003	<0.04	<0.02	0.05	<0.03	<0.11	<0.03	<0.17
20-2-96	<0.07	0.02	0.004	<0.04	<0.02	0.08	<0.03	<0.11	<0.03	<0.17
27-2-96	<0.07	<0.02	0.014	<0.04	<0.02	0.05	<0.03	<0.11	0.08	<0.17
1-3-96	<0.07	<0.02	0.010	<0.04	<0.02	0.04	<0.03	<0.11	0.04	<0.17
3-3-96	<0.07	<0.02	0.021	<0.04	<0.02	0.04	<0.03	<0.11	0.13	<0.17
12-3-96	<0.07	<0.02	0.008	<0.04	<0.02	0.04	<0.03	<0.11	<0.03	<0.17
15-3-96	<0.07	<0.02	0.086	<0.04	<0.02	0.04	<0.03	<0.11	0.05	<0.17
19-3-96	<0.07	<0.02	0.069	<0.04	<0.02	0.14	<0.03	<0.11	0.03	<0.17
Pantano	<0.07	<0.02	0.005	<0.04	<0.02	<0.03	<0.03	<0.11	0.04	<0.17
Río	<0.07	<0.02	<0.003	<0.04	<0.02	<0.03	<0.03	<0.11	0.07	<0.17
Pozo	<0.07	<0.02	0.012	<0.04	<0.02	0.07	<0.03	<0.11	0.05	<0.17

¹ Límite máximo permitido establecido en el borrador del proyecto de R.D. regulador de este uso.

Tabla II. Niveles de elementos traza y metales pesados en las muestras analizadas.

Dicho borrador limita asimismo la D.B.O.5, el pH y los sólidos en suspensión a valores de 30 a 45 mg/l, 6 a 9 y 30 a 45 mg/l, respectivamente, para el riego de hortalizas, cereales, forraje y pastos, siendo los valores medios detectados en nuestras aguas de 16 mg/l, 7.59 y 22 mg/l.

Para completar el estudio nos pareció interesante comparar la composición del efluente con las correspondientes al pantano del Guadalquivir, del cual se abastece la ciudad, al río Guadalquivir a su paso por Córdoba y a un pozo de la finca donde se han realizado los análisis, habiéndose utilizado los tres habitualmente para riego. Como se puede apreciar en las tablas II y III, no existen diferencias importantes en cuanto a la calidad para riego, entre las aguas residuales depuradas y las correspondientes al río y al pozo. A destacar los valores más altos de calcio en estas últimas y el mayor nivel de nitrógeno nítrico como corresponde a aguas aireadas. Los niveles del pantano son sensiblemente menores, ya que la recarga de este se produce fundamentalmente con agua de lluvia.

	Pantano	Río	Pozo	Efluente
	dS/m			
C.E.	0.18	1.53	1.41	0.87
pH	7.32	8.40	7.80	7.59
	meq/l			
Ca ⁺⁺	0.74	6.09	7.34	2.88
Mg ⁺⁺	0.59	4.12	3.76	1.01
Na ⁺	0.35	4.90	2.66	4.10
K ⁺	0.09	0.18	0.31	0.60
	meq/l			
CO ₃ ⁼	-	-	-	-
CO ₃ H ⁻	1.03	4.39	5.16	4.58
Cl ⁻	0.59	4.02	2.41	2.22
SO ₄ ⁼	0.16	6.88	6.55	1.89
	ppm			
N.NO ₃ ⁻	3.60	15.67	28.78	0.16
N.NO ₂ ⁻	0.02	0.30	0.01	0.06
N.NH ₄ ⁺	0.02	0.13	0.18	21.24
N (total)	3.64	16.10	28.97	21.46
P (soluble)	0.12	0.27	0.08	4.54
R.A.S.	0.43	2.16	1.14	2.96

Tabla III. Composición media del agua del pantano del Guadalquivir, del río Guadalquivir a su paso por Córdoba, del pozo de la finca donde se realizó el estudio y del agua residual depurada.

4. Conclusiones.

Los primeros resultados obtenidos de la composición media de las aguas residuales depuradas procedentes de la E.D.A.R. La Golondrina de Córdoba, permite recomendar su utilización para riego sin demasiadas restricciones.

El aumento en las últimas muestras analizadas de determinados elementos, no deseables a concentraciones elevadas en un agua de riego, indica la conveniencia de continuar con el análisis de las mismas, para completar el ciclo anual y realizar ensayos en macetas para estimar toxicidades específicas, así como valorar la realización de distintas mezclas en caso de que estos valores persistieran.

5. Bibliografía.

AYERS, R.S. y D.W. Wescot. 1985. Water Quality for Agriculture. FAO Irrig. Drain. Paper 29 Rev. 1. FAO, Roma.

BREMMER, J.J. 1965. Amer. Soc. Agron., Madison.

DE LAS HERAS, J.A. 1989. Mantenimiento y explotación de estaciones depuradoras. En: Curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales y Explotación de Estaciones Depuradoras. CEDEX-MOPU. Madrid.

DELGADO, A., S. Cárdenas y F. Díaz-Fierros. 1994. Metales pesados en aguas, sedimentos y suelos de las inmediaciones de una E.D.A.R. Tecnología del Agua, nº 123, pp. 25-32.

DOWNING, A.L. 1983. Used water treatment, today and tomorrow. En: CUROS, C.R. y HAWKES, H.A., Ecological aspects of used-water treatment, vol. 2. Academic Press. Londres.

KEMPER, A.J. 1974. Geoderma, 12:20.

MANTECON, R., M. Martín y R. Cantos. 1991. Depuración de aguas residuales de origen urbano mediante técnicas de infiltración rápida en el subsuelo. II Simposio sobre "El Agua en Andalucía", vol. II, pp. 391-403.

RODIER, J. 1978. L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Ed. Dunod. París.

6. Agradecimientos.

A la Empresa Municipal de Aguas Potables de Córdoba (EMACSA), por las facilidades dadas tanto en la obtención de la muestra como en el suministro de determinados datos de su composición.

A Isabel Ordóñez, Catalina Lara, Manuel Armenteros, Carmen del Moral y Araceli García, por su inestimable colaboración tanto en la recogida de muestras como en el análisis de las mismas.

EL PROCESO DE RESALINIZACION DEL SECTOR B-XII DE LA ZONA REGABLE DEL BAJO GUADALQUIVIR

González Fernández P.¹ Romero Bueno J.² y Bellido Pérez B.³

RESUMEN

Se han estudiado los suelos arcillosos de la zona regable del Bajo Guadalquivir para determinar la cuantía y evolución de los daños producidos por el riego con caudales y aguas inadecuados entre 1993 y 1995. Para ello se han examinado los cambios en la conductividad eléctrica de los extractos de saturación (CE_e). La concentración de electrolitos media en las parcelas con remolacha en 1995 es de 21.5 dS/m en los primeros 25 cm de suelo y de 14.5 dS/m en los siguientes 25 cm. Los suelos donde se cultivó algodón en 1995 presentan una salinidad mayor, con CE_e media en los 25 cm superiores de 50.9 dS/m, que desciende a 26.2 dS/m de 25 a 50 cm de profundidad.

ABSTRACT

The irrigated soils from the Low Guadalquivir river marsh were examined to determine the salinity evolution and the level of the damage produced by the use of scarce amounts of saline waters in the dry period 1993-1995. Changes in the electrical conductivity of saturated extract (CE_e) were determined. Profile-average CE_e in sugar beet soils increased from 14.5 dS/m in the 25-50 cm layer to 21.5 dS/m in the first 25 cm. Plots with cotton during 1995 had a CE_e of 26.2 dS/m at 25-50 cm depth and 50.9 dS/m in the superficial 25 cm.

INTRODUCCION

El riego permanente en zonas con climatología árida o semiárida, exige un equilibrio estable entre los flujos de sales aportadas con el riego y las sales lavadas fuera de la zona explorada por las raíces de las plantas o árboles cultivados.

El proceso aquí descrito es un paradigma del proceso de salinización de unos suelos agrícolas producido por un manejo y una calidad del agua deficientes.

ANTECEDENTES

El sector B-XII ocupa unos 14.000 hectáreas en la parte más meridional de la antigua marisma de la margen izquierda del Guadalquivir. En su estado natural los suelos salino-alcálico presentan una conductividad eléctrica en el extracto de saturación del orden de 25-30 dS/m en los primeros 50 cm. de suelo, y un SAR mayor de 25 (Grande, 1976).

Entre los años cincuenta a ochenta esta marisma situada entre las cotas 1,40 a 2,50 m ha sido sometida a un costoso proceso de recuperación y repartida entre 1200 agricultores.

El agua utilizada en los riegos procedía del río Guadalquivir derivada en Peñaflor, unos 150 km. aguas arriba.

1.- Dpto. suelos y aguas. Dir. Gral Inv. Agr. Junta And. 2.- Servicio Ext. Agr. Junta And. 3.-Comdad. Regantes S. B-XII

Los cultivos en la zona han ido evolucionando conforme la calidad de los suelos mejoraba, introduciéndose especies menos tolerantes a la salinidad. Antes del inicio de la última sequía, se había extendido el cultivo de plantas hortícolas (tomate, brócoli, pimientos, etc.) y la superficie de remolacha se había incrementado en detrimento del girasol y de los cereales.

Como consecuencia de la intensa sequía que comenzó en el año 1991, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, comunicó en Marzo de 1993 la total supresión de riegos en el sector B-XII con aguas procedentes del canal. Lo que obligó, para salvar la remolacha sembrada en al menos la mitad de sus parcelas, al riego con aguas del río captadas a la altura de los canales de desagüe. Los riegos tuvieron lugar los meses de Abril, Mayo y primera quincena de Junio.

En 1994 y 1995 ante la persistencia de la sequía y la no disponibilidad de agua procedente del canal, se procedió de nuevo al riego con aguas elevadas del río. La calidad de las aguas resultó cada vez más deficiente y se regaron no sólo la remolacha, sino también el algodón.

Los datos que en este trabajo se utilizan son fruto de la continuada labor emprendida por la Comunidad de Regantes del Sector B-XII y la Agencia Comarcal de Extensión Agraria de Lebrija, con la ayuda de la Dirección General de Investigación Agraria de la Junta de Andalucía, preocupados todos por la evolución y estado actual de los suelos, tras los sucesivos riegos con aguas salinas.

MATERIAL Y METODOS

En la marisma de la margen izquierda del Guadalquivir, los suelos de textura muy arcillosa, tienen un origen reciente y muestran un escaso desarrollo. En su perfil son patentes numerosos micelios de yeso vermiforme y claras señales de hidromorfismo. En el cuadro 1 se dan las principales características de un perfil representativo, abierto en la parcela 2001-A.

CUADRO 1. Características del perfil del suelo en la parcela 2001-A, entregada a los agricultores para su explotación en el Sector B-XII (SECS-CSIC, 1978).

Profundidad (cm)	PH		M.O %	CO ₃ ⁼ %	Na Inter %	CE _e dS/m	Textura (USDA)		
	H ₂ O	ClK					Arcilla %	Limo %	Arena %
0-25	8,4	7,1	1,4	10,4	15	5	71	28	1
25-50	8,6	7,3	0,9	8,0	30	18	76	22	2
50-100	8,7	7,5	0,6	20,7	35	28	66	33	1
100-150	8,6	7,5	0,6	28,8	35	39	61	39	0
150-200	8,6	7,5	0,8	25,9	54	47	58	42	0

En 1991, la mayoría de las parcelas cultivadas presentaban en los horizontes más superficiales unas conductividades eléctricas en los extractos de saturación entre 3

y 8 dS/m, con unos porcentajes de sodio intercambiables que iban del 12 al 20% (Comunidad Regantes B-XII, 1993).

En 1993 se propuso que las aguas residuales del río Guadalquivir usadas en riegos de emergencia no alcanzasen los 2,5 g/l, cerrando las compuertas cuando la salinidad fuese mayor. No obstante, entre los días del 23 de Mayo al 16 de Junio la salinidad solo fue inferior durante 4 días. Siendo el contenido medio salino de 2,71 g/l.

La calidad del agua del río durante la campaña de 1994 fue aún peor. De acuerdo con los informes de la Comunidad de Regantes, el contenido salino osciló entre los 4 y 6 g/l en los riegos de la remolacha. Los pocos agricultores que regaron algodón utilizaron aguas de unos 11 g/l.

La salinidad media del agua para riego aumentó en 1995. El agua utilizada para regar la remolacha (1 de Marzo hasta 10 de Junio), contenía entre 5,09 y 12,11 g/l. de sales, siendo su media de 9,20 g/l.. Los riegos del algodón se prolongaron hasta finales de Agosto con aguas de una salinidad media de 14,69 g/l.. En valores absolutos el agua de peor calidad usada corresponde al 18 de Agosto con un máximo de 17,8 g/l. y la de mejor calidad el 1 de Mayo con 4,9 g/l.

Las precipitaciones recogidas en el sector B-XII durante el periodo que abarca el estudio fueron muy bajas (Cuadro 2), insuficientes para mantener un cultivo en secano en estos suelos. Es de destacar los abundantes lluvias de Abril y Mayo de 1993 que ayudaron al desarrollo de la remolacha regada por primera vez con aguas salinas.

CUADRO 2. Resumen de las precipitaciones en mm, recogidas en la Cooperativa de Las Marismas (Lebrija) . Se comparan con la media de 32 años (1969) del Observatorio de Sanlúcar de Barrameda.

Campaña	Oct+Nov	Dic+Ene	Febr+Marz	Abr+May	Jun+Jul	Ago+Sept	Suma
1991-92	161,1	21,2	56,8	113,3	54,2	16,6	449,3
1992-93	58,2	54,9	68,1	119,5	0,6	0,0	309,3
1993-94	135,0	35,0	42,1	77,2	0	13,6	302,9
1994-95	40,7	26,8	69,0	17,0	25,0	0	178,5
Media SL	146	113	128	59	16	17	479

A lo largo de todo el estudio se han efectuado ocho prospecciones que han afectado a un total de 47 parcelas.

En 1993 se muestrearon 31 parcelas tres veces y en Abril de 1994, 40 parcelas. Cada muestreo fue doble, separando la mitad de la parcela cultivada con remolacha y regada, de la otra mitad de secano y sembrada con girasol.

En otoño de 1994 se muestrearon 6 parcelas más donde se había cultivado y regado algodón.

Durante la campaña 1994-1995 se volvió a muestrear las 40 parcelas del año anterior dos veces. En este caso el muestreo fue uniforme y se extendió por toda la superficie al considerarse uniformemente contaminadas por los riegos de 1993 y 1994.

Finalmente en Octubre de 1995 se estudiaron otras 11 parcelas con algodón de regadío.

Los análisis químicos se realizaron sobre muestras compuestas de al menos seis submuestras, tomadas entre 0 y 25 centímetros de profundidad y entre 25 y 50 cm. (Con la excepción del muestreo de Diciembre de 1993, que se muestreó conjuntamente los 50 primeras centímetros de suelo).

Para evaluar el proceso de resalinización solo se utiliza en este trabajo el contenido salino del extracto de saturación estimado por su conductividad eléctrica.(CE_e). (Rhoades, 1982).

Para caracterizar los cambios producidos por el riego en el perfil salino de los suelos, se ha recurrido al promedio de la CE_e de todas las parcelas muestreadas dada la conocida variabilidad espacial característica de los suelos salinos y la movilidad de sus sales.

RESULTADOS Y DISCUSION

La CE_e media de los cuatro primeros muestreos sirve para estimar los efectos del riego con aguas del río en los campos con remolacha durante la campaña de 1993-94. Estos datos se comparan con la situación de los suelos en la mitad de cada parcela no regada cultivada con girasol de secano. La falta de homogeneidad de los suelos queda de manifiesto por el elevado coeficiente de variabilidad de los datos de partida (36%), así como por el hecho de encontrar, en algunas parcelas de girasol, mayores CE_e que en los regados. Las medias del Cuadro 3 indican ya una clara y significativa diferencia entre los suelos regados (6,60 dS/m) y los no regados (5,81 dS/m).

CUADRO 3. Conductividad media, en dS/m de los extractos de saturación de los suelos del Sector B-XII muestreados desde 1993 a 1995 (0-50 cm.).

AÑO	1992-93		1993-94		1994-95	
	G-93	R-93	R-94	A-94	A-95	R-95
CULTIVO	SECANO	REMOL .	REMOL .	ALGODON	ALGODON	REMOL .
Promed .	5,81	6,60	7,15	10,09	38,56	17,85
n	4,0	40,0	40,0	6,0	9,0	31,0
c.v.%	36,0	34,0	28,0	30,0	20,0	19,0

Las parcelas donde se cultivó remolacha en la siguiente campaña, 1993-94, muestran una mayor salinidad: 7,15 dS/m, a pesar de abarcar el muestreo toda la parcela.

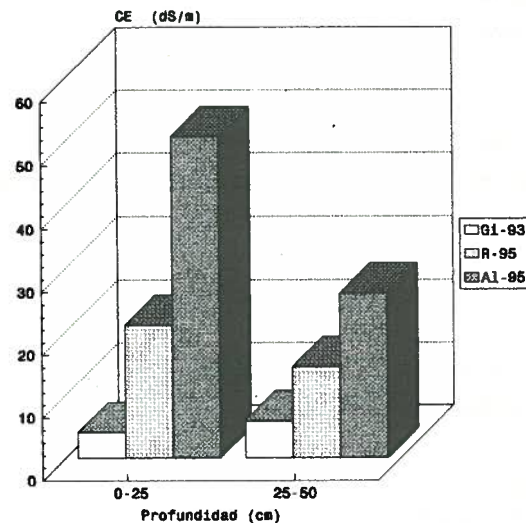
En este año fueron pocos los agricultores que sembraron algodón. El análisis de las parcelas donde se llevó a cabo este cultivo muestra como el proceso de salinización fue más intenso, por utilizar mayores volúmenes y aguas sensiblemente peores que en la remolacha. La CE_e media fue de 10,09 dS/m.

La abundancia de sales en el agua utilizada para regar la remolacha en el año 1994-95 provocó una intensa salinización de las parcelas; alcanzándose una CE_e promedio de 17,85 dS/m. en los primeros 50 cm. de suelo.

De nuevo el cultivo del algodón se mostró como el más nocivo para el suelo. Las sales en el perfil del suelo llegan a tener una CE_e media de 38,56 dS/m.

El exceso de sales en la solución del suelo no afecta por igual a todos los cultivos ni origina daños de igual intensidad en todos los estadios de desarrollo. Por lo general, los cultivos son más sensibles durante la germinación y primeras fases de desarrollo vegetativo. Por ello es importante conocer el contenido salino en los primeros centímetros de suelo. En los suelos estudiados y como consecuencia de los riegos la salinidad ha aumentado más en los primeros 25 cm. de suelo que en los siguientes 25 cm. Tanto en los campos de remolacha., como en los de algodón (Fig. 1) invirtiendo la situación de partida, que reflejaba un incremento de la salinidad con la profundidad. La acumulación de sales en la superficie puede estar motivada por un riego con insuficientes caudales.

FIGURA 1. Comparación de la salinidad media en los perfiles de suelos con girasol de secano en 1993 y con remolacha y algodón en 1995



Las elevadas conductividades de los primeros 25 cm de suelo: 21,15 dS/m tras remolacha y 50,95 dS/m después del algodón muestran una situación mas grave de la detectada al estudiar los perfiles de 0 a 50 cm. En algunas parcelas de algodón la CE_e superaba la conductividad del agua de mar.

La CE_e superficial más frecuente oscila entre el 20 y 24 dS/m; mientras que en los 25-50 cm., el intervalo de CE_e presente en mayor número de suelos es el comprendido entre 12 y 16 dS/m.

La evolución e inversión de los horizontes con mayor salinidad en los suelos de los que se dispone de datos previos a su entrega a los agricultores, confirman la regla general. En el perfil de la parcela 2001-A - que se iba a traspasar en 1978 - la salinidad inicial era mayor que en 1993. Por el contrario, el perfil de la parcela 4058-B considerada en esa fecha, aún no recuperada y poblada de plantas halófitas, tenía un contenido salino mucho mayor que en 1993; pero desgraciadamente inferior en los primeros 25 cm. al encontrado en 1995 (Cuadro 4).

CUADRO 4. Evolución de las conductividades del extracto de saturación en las parcelas 2001 y 4058-B.

CULTIVO	PARCELA 2001-A		PARCELA 4058-B	
	0-25 cm.	25-50 cm.	0-25 cm.	25-50 cm.
Inicial 1977-78	4,85	18,28	15,20	27,15
Girasol 1993	2,51	3,23	3,81	3,11
Remolacha 1993	4,37	3,75	3,04	3,04
Remolacha 1994	5,47	7,73	11,37	9,66
Remolacha 1995	18,04	14,08	22,3	10,53

La salinidad presente en los suelos regados en 1995 con aguas del río es extremadamente alta; muy por encima de los valores considerados "críticos" para la remolacha y el algodón (7.0 y 7.7 dS/m respectivamente), lo que ha repercutido en las cosechas de la zona, que se han visto mermadas o incluso se han perdido en su totalidad.

Mediante los datos obtenidos en una encuesta entre los agricultores remolacheros se ha establecido la siguiente relación entre las producciones declaradas R (Tm/ha) y la CE_e (dS/m) de sus parcelas:

$$CE_e = -0,23 R + 20,2 \quad r^2 = 0,43$$

Se pueden observar que a elevadas conductividades los rendimientos son tan bajos que el cultivo deja de ser rentable.

El efecto del riego con estas aguas altamente salinas, en los suelos arcillosos del sector B-XII, son otro aspecto de gran importancia para el futuro de la agricultura en las parcelas regadas (RAS de 33 en suelos de algodón). Es necesario determinar el nivel al

que se ha deteriorado la estructura del suelo, fenómeno que se refleja en primer lugar en la reducción de la conductividad hidráulica (So y Aylmore, 1993).

CONCLUSIONES

La situación aquí descrita constituye un ejemplo de la destrucción de un recurso natural y de una fuente generadora de riqueza. La recuperación de los suelos contaminados presumiblemente será un proceso lento y costoso, que necesitará asesoramiento y recursos exteriores. Esta tarea ha de emprenderse inmediatamente si no se quiere que la zona regable del sector B-XII, en los albores de siglo XXI, constituya un proyecto de riego de efimera duración. Para ello es primordial asegurar el riego con los caudales suficientes para lavar las sales de la zona radicular y prevenir la salinización del suelo.

BIBLIOGRAFIA

Comunidad de regantes del Sector B-XII. 1994. Informe sobre las parcelas del Sector B-XII regadas con aguas del río a través de los desagües naturales. Año 1993-4. 6 pp.

Grande Covian R. 1976. Experiencias en España con el drenaje subterráneo. Estudios sobre riego y avenamiento. El drenaje de suelos salinos. F.A.O., Roma.

Rhoades, J. D. 1982. Soluble salts. p 167-179. En A. L. Page et al. (De.). Methods of Soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9 ASA and SSSA, Madison.

Soc. Esp. Ciencia del Suelo y CSIC. 1978. Guía de las excursiones científicas. VII Reunión Nacional de Suelos. Sevilla. 159 pp.

So, H. B. y L. A. G. Aylmore. 1993. How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behavior. Aust. J. Soil Res. 31:761-777.

Simulación numérica de la erosión del suelo en el riego por surcos

Fernández, R. (P) (1); Mateos, L. (1); Giráldez, J.V. (2,3)

1. Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Córdoba.

2. Dpto. de Suelos y Riegos, CIDA, Córdoba.

3. Dpto. de Agronomía, ETSIAM, Univ. Córdoba.

Resumen

Se ha desarrollado un modelo numérico basado en la aproximación de la onda cinemática para simular la erosión dinámica del suelo en un sistema de riego por surcos. La simulación requiere la calibración previa de los parámetros de suelo *erodibilidad* y *esfuerzo de corte crítico*; el primero de ellos, K_r , es dependiente del tiempo de riego, mientras que τ_c mantiene un valor casi constante. Se emplea la expresión de carga total de sedimentos de Yang, lo que plantea el problema de la separación entre carga de fondo y suspendida. El modelo es capaz de simular determinadas situaciones, en especial las tendencias observadas en campo. Se han observado sin embargo algunos problemas cuando se satura la capacidad de transporte de sedimentos.

Abstract

A numerical kinematic wave model has been developed to simulate the dynamic erosion in a furrow irrigation system. Soil parameters, erodibility and critical tractive force, must be previously calibrated; K_r showed to be time dependent while τ_c maintained a constant value. Yang's total load formula, used in the model, raise the problem of separate bed load from suspended load. The model is able to simulate some particular conditions, while its behaviour is not good in the cases where flow transport capacity is filled.

1. Introducción

El proceso de erosión hídrica del suelo sometido a riego por superficie es sumamente complejo debido a la variedad y dinamismo de los fenómenos que en él intervienen: arranque, transporte y depósito de partículas. Por ello, la resolución analítica de las ecuaciones del movimiento del agua y sedimentos se vuelve excesivamente compleja. La introducción de simplificaciones facilita la resolución, aunque en general, lo adecuado resulte solucionar dichas ecuaciones de forma numérica.

El tratamiento cinemático del riego y sus efectos erosivos, implica aplicar solamente la ecuación de continuidad del flujo de agua y sedimentos y no considerar la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. Para definir el flujo se emplea cualquiera de las expresiones que relacionan los parámetros hidráulicos y geométricos del riego (*e.g.* Manning), con lo que el gasto quedará definido en función del calado y de la sección transversal húmeda. De esta forma se puede analizar el avance de una onda de flujo de agua y sedimentos generada como consecuencia del fenómeno de almacenamiento-gasto en cada punto del sistema.

El objetivo de este trabajo es la resolución numérica de la ecuación de continuidad del sedimento de forma simultánea a la de circulación del flujo de agua, simular el movimiento del suelo erosionado

desde que es arrancado del lecho del surco hasta que es depositado o exportado de la parcela de riego y comparar los resultados obtenidos con datos de campo. Además se discute la necesidad de establecer la separación entre carga de fondo y suspendida y de distinguir entre partículas de distinto tamaño.

2. Desarrollo del modelo teórico.

2.1. Características geométricas e hidráulicas del surco.

Asumimos que sobre el sistema de surcos solo se produce erosión hídrica debida al riego, como consecuencia de la circulación de un caudal Q en cada punto a lo largo del surco. La geometría de la sección transversal de un surco y las relaciones hidráulicas que de ella se derivan (Fig. 1) están definidas a partir de la relación entre la anchura y la profundidad del surco, que puede ser ajustada a una función potencial con una buena representación de la realidad (Trout, 1991). Según esto

$$w = by^h \quad (1)$$

siendo b y h coeficientes empíricos resultado del ajuste.

Utilizando la ecuación del flujo uniforme de Manning, y la aproximación propuesta por Elliot y col. (1982)

$$(AR^{2/3})^2 = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (2)$$

el caudal circulante se expresa (Walker y Humpherys, 1983):

$$Q = a_1 A^{a_2} \quad (3)$$

w	Anchura del surco
A	Sección húmeda
y	Profundidad del flujo
p	Perímetro mojado
S	Pendiente longitudinal
Q	Caudal
R	Radio hidráulico
n	Coficiente de aspereza de Manning

Fig 1. Definición de los parámetros de un surco tipo.

2.2. Ecuaciones del flujo de agua.

Si consideramos que durante el riego no existen aportes laterales al surco, la ecuación de continuidad del flujo de agua viene dada por la expresión

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (4)$$

siendo τ el tiempo de oportunidad (min), x la distancia a lo largo del surco (m), t el tiempo (min) y Z la infiltración acumulada ($m^3 min^{-1}$). Si empleamos la expresión de Kostiaikov-Lewis para el cálculo de la infiltración del agua en el suelo,

$$Z = k\tau^a + f_0 \quad (5)$$

donde k ($m^3 m^{-1} min^{-a}$), a y f_0 ($m^3 m^{-1} min^{-1}$) son los parámetros de infiltración del suelo.

La ecuación de continuidad para el flujo de agua se expresa en diferencias finitas como

$$\frac{\Delta Q}{\Delta x} + \frac{\Delta A}{\Delta t} + \frac{(\bar{Z})^{t+\Delta t} - (\bar{Z})^t}{\Delta \tau} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{Q_{i+1}^{t+\Delta t} - Q_i^{t+\Delta t}}{\Delta x} + \frac{A_{i+1}^{t+\Delta t} - A_i^{t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{(Z_{i+1}^{t+\Delta t} + Z_i^{t+\Delta t}) - (Z_{i+1}^t + Z_i^t)}{2\Delta \tau} = 0 \quad (7)$$

pudiendo así calcularse el caudal incógnita ($Q_{i+1}^{t+\Delta t}$) en cada sección a lo largo del surco durante el riego. Para ello se utiliza el esquema no lineal para resolver de forma iterativa las incógnitas dependientes del tiempo, y el procedimiento lineal para estimar los valores iniciales, ambos propuestos por *Li y col. (1975)*. La Fig. 2 representa la malla espacio-tiempo utilizada para las distintas secciones consideradas a lo largo del surco (distanciadas entre si Δx) en un tiempo $t + \Delta t$.

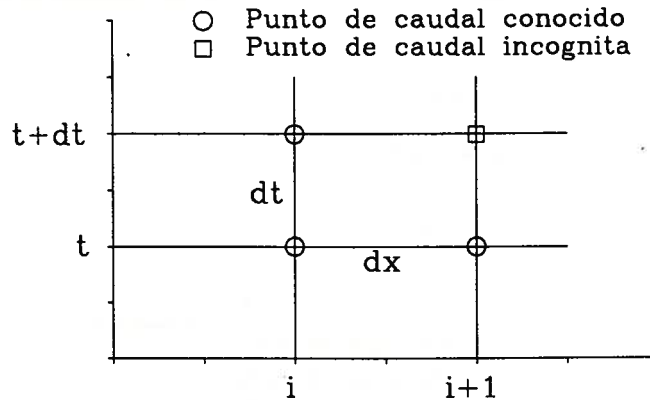


Fig 2. Malla espacio-tiempo en diferencias finitas.

2.3. Ecuaciones del flujo de sedimento.

El movimiento del sedimento a lo largo del surco está determinado por la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial[QC]}{\partial x} + \frac{\partial[AC]}{\partial t} = \frac{D_f p}{\rho_w} \quad (8)$$

en la que C es la concentración de sedimento en el flujo de agua ($Kg_s Kg_a^{-1}$), D_f el índice de erosión o depósito producido en el surco por dicho flujo ($Kg s^{-1} m^{-2}$), p el perímetro mojado (m) y ρ_w la densidad del agua ($Kg m^{-3}$).

Esta expresión permite calcular la concentración de sedimentos en cada punto y en cada instante de forma analítica en función del caudal que habremos determinado previamente tras realizar la simulación de la circulación del agua.

Llamando E a $D_f p/\rho_w$ la ecuación de continuidad (8) queda en diferencias finitas como

$$\frac{\Delta[QC]}{\Delta x} + \frac{\Delta[AC]}{\Delta t} = \frac{E_i^t + E_{i+1}^t + E_i^{t+\Delta t} + E_{i+1}^{t+\Delta t}}{4} \quad (9)$$

El índice de erosión en el surco, D_f , se expresa (Foster, 1982):

$$D_f = D_r \left(1 - \frac{\rho_w Q C}{p T_c} \right) \quad (10)$$

siendo D_r la máxima capacidad de arranque del flujo de agua ($Kg s^{-1} m^{-2}$) y T_c la capacidad de transporte de ese flujo ($Kg s^{-1}$). El término $(\rho_w Q C)/(p T_c)$ indica que el índice de arranque máximo se ve disminuido en función de la fracción de la capacidad de transporte que en ese momento esté siendo ocupada por la carga de sedimentos (Nearing y col., 1990). La ecuación utilizada para calcular la capacidad de transporte de sedimento que posee el flujo de agua es la de Yang (e.g. Yang, 1973), que relaciona la concentración total de sedimento con la potencia unitaria crítica de la corriente, la velocidad de caída de las partículas, la mediana de la distribución y la velocidad de corte del flujo. En suma,

$$T_c = f(P_c, w, d_{50}, U) \quad (11)$$

Ya que esta expresión determina la capacidad de transporte total de sedimento tanto como carga de fondo como suspendida, para estimar esta última suponemos que representa el 1 % del total (Simons y Şentürk, 1992, Cap. 9.2.2.).

La máxima capacidad de arranque de sedimentos en surcos, D_r , está definida como función potencial del exceso de esfuerzo de corte (Foster, 1982):

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c)^\beta \quad (12)$$

donde τ es el esfuerzo de corte que ejerce el flujo de agua sobre el lecho del surco (Pa), τ_c el esfuerzo de corte crítico para movilizar las partículas del suelo (Pa), K_r se denomina *erodibilidad* y representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado ($s m^{-1}$) y β es un exponente que, según el mismo autor, tiene un valor típico de 1, linealizándose por tanto (12). K_r y τ_c son parámetros intrínsecos del suelo y se consideran constantes para unas condiciones dadas.

La calibración de estos dos parámetros ha sido acometida por varios métodos. Entre ellos cabe destacar el seguido por Nearing y col. (1989) que minimiza una función objetivo expresada como la diferencia mínimo cuadrática entre los valores medidos y los simulados con el modelo empleando distintos valores de los parámetros de suelo. Más simple es el propuesto por Laflen y col. (1987) que utiliza una regresión lineal para determinar la pendiente de la relación entre la capacidad de arranque y el esfuerzo de corte efectivo, lo que será K_r , y la ordenada en el origen, que será $\tau_c K_r$.

Si bien se acepta la invariabilidad de estos parámetros para un mismo suelo, la realidad es que existen numerosos factores que afectan su valor como la estacionalidad (Elliot y col., 1988) (y por ello la temperatura, humedad, densidad aparente, materia orgánica, etc.) o la prácticas de manejo a que ha sido sometido (King y col., 1995). La experiencia en la práctica del riego por surcos y los datos de concentración y texturas del lecho aportadas por Fernández-Gómez y col. (1995) y Fernández-Gómez y col. (1996) respectivamente, indican la influencia del tiempo de riego en K_r y τ_c . Siguiendo la metodología de Laflen y col., (1987) se determinó la pendiente y la constante de la regresión para 6 tiempos de riego, 5, 15, 30, 60, 120 y 240 min, para los datos del segundo y tercer riego, tal y como se expone en la Fig. 3.

Con los valores de K_r hemos obtenido un ajuste de tipo logarítmico

$$K_r = 0.00184 - 0.000264 \ln t \quad ; \quad r^2 = 0.967 \quad (13)$$

mientras que podemos considerar que el esfuerzo de corte crítico mantiene un valor medio de $\bar{\tau}_c = 0.815$ y desviación típica de 0.12.

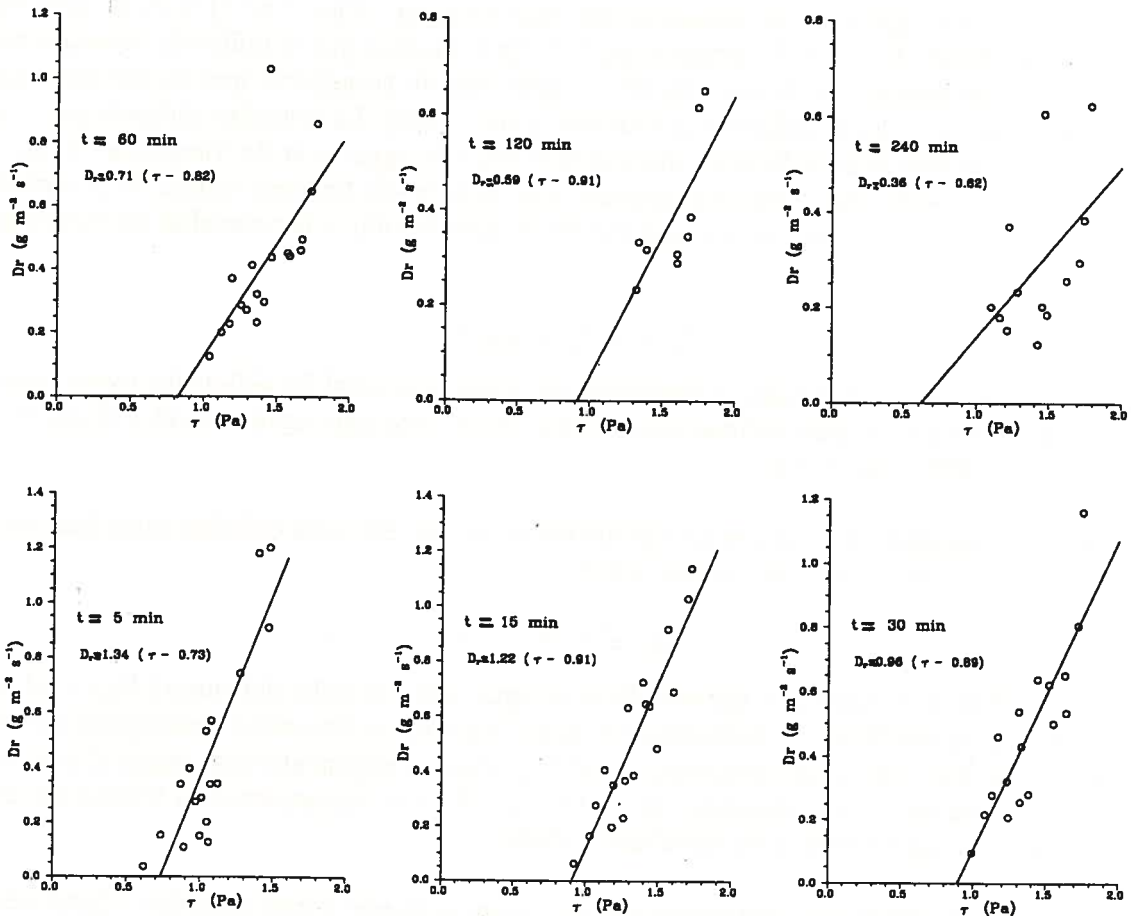


Fig 3. Capacidad de arranque vs. esfuerzo de corte efectivo para $t = 5, 15, 30, 60, 120$ y $240\ min$.

3. Simulación de las curvas de concentración de sedimentos.

Para efectuar la simulación se requiere en primer lugar la calibración de los parámetros del suelo K_r y τ_c cuyos valores son los indicados anteriormente. No se ha considerado selectividad en ningunos de los procesos del fenómeno erosivo, arranque, transporte y depósito, sino que se ha tomado un tamaño de partícula representativo del suelo en que nos encontramos.

Los datos de campo empleados en la calibración y en la posterior comparación con la simulación del modelo son las concentraciones de sedimento en agua obtenidas durante los riegos segundo y tercero de los ensayos de riego por surcos realizados en el verano de 1994 en la Finca Alameda del Obispo, Córdoba, y cuyas características aparecen recogidas en *Fernández-Gómez y col. (1995)*. Las curvas de concentración de sedimento simuladas con el modelo, junto con los datos obtenidos en campo se exponen en las Figs. 4 y 5. El motivo por el que no se ha simulado el primer riego, ni se han tenido en cuenta los datos de campo de ese riego para la calibración de los parámetros K_r y τ_c , es que las

condiciones de suelo recién labrado, asurcado, seco y sin haber sido sometido a riego previo, son sustancialmente distintas a las que encontramos en riegos posteriores. La calibración y simulación de un primer riego será posible una vez que se disponga de más datos experimentales.

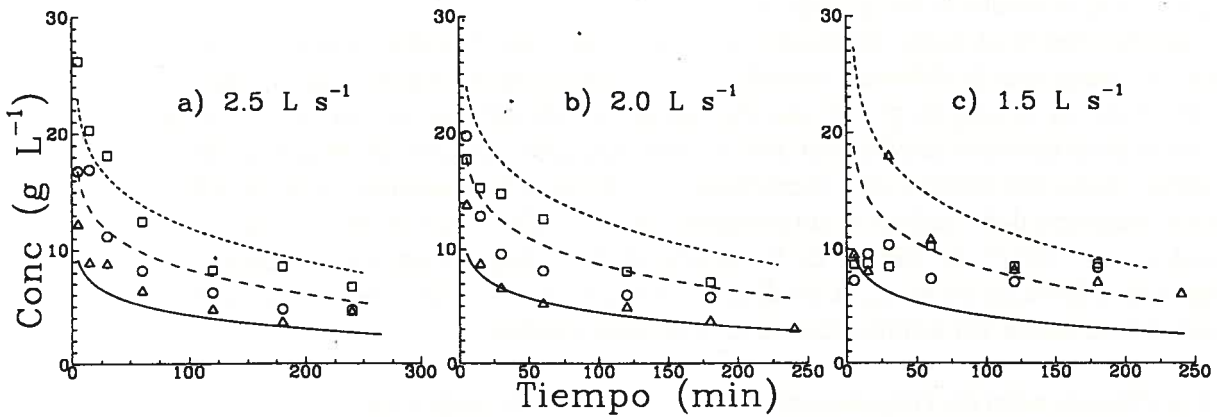


Fig 4. Curvas de concentración de sedimento simuladas para el segundo riego a) 2.5 L s^{-1} ; b) 2 L s^{-1} ; c) 1.5 L s^{-1} . Los símbolos representan valores medidos a 60 m. (triángulos), 120 m. (círculos) y 180 m. (cuadrados), y los respectivos valores simulados los representan los trazados continuo, discontinuo y punteado.

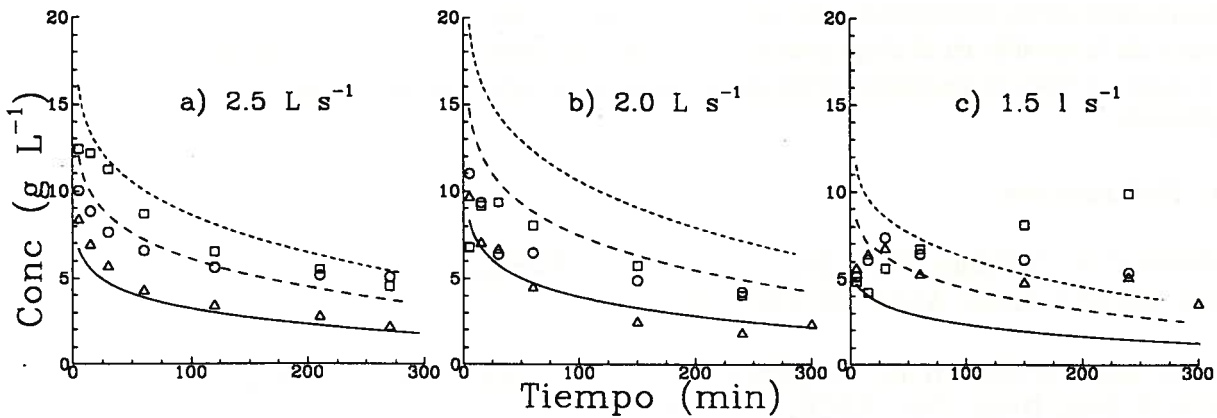


Fig 5. Curvas de concentración de sedimento simuladas para el tercer riego a) 2.5 L s^{-1} ; b) 2 L s^{-1} ; c) 1.5 L s^{-1} . El significado de los símbolos y trazos es como el de la Fig. 4.

4. Discusión y conclusiones.

El modelo simula con buen grado de aproximación las concentraciones observadas en campo para los tratamientos de caudal 2.5 y 2 L s^{-1} en el segundo riego y para el de 2.5 L s^{-1} en el tercer riego. Particularmente, reproduce de forma satisfactoria el descenso en los valores de la concentración desde el inicio, hasta que se alcanza un nivel más o menos constante al final del riego. Esta circunstancia es propia de estos riegos, en los que el caudal es suficientemente erosivo y se genera una limitación del arranque por agotamiento del material del lecho del surco, sin alcanzar por tanto la saturación de la capacidad de transporte.

En el resto de las simulaciones, las concentraciones difieren bastante de las observadas, pero no tanto en valor como en las tendencias que se producen. Las curvas simuladas son análogas a las de los casos anteriores, y también se produce un descenso, mientras que la tendencia de los datos observados es a mantener un valor poco variable con el tiempo, presumiblemente debido a una saturación de la capacidad de transporte.

Este comportamiento del modelo se debe al empleo de un único tamaño de partícula en las fases del proceso erosivo en lugar de utilizar la selectividad. La realidad es que el lecho del surco es una mezcla de partículas de diferente tamaño que se comportan de manera distinta ante esfuerzos de corte que provocan su arranque, por lo que algunas serán incluidas en la corriente en suspensión mientras que otras permanecerán moviéndose por el fondo del surco, lo que, dependiendo de las características del flujo, puede dar lugar a una degradación e incluso acorazamiento de la superficie del lecho. Un modelo realístico debe incluir el intercambio de partículas entre el lecho y la carga en movimiento (Borah y col. (1982)). El cálculo de la capacidad de transporte para cada tamaño de partícula y su integración a lo largo de la curva de distribución podrá, sin duda, mejorar la predicción en los casos en que el transporte del sedimento limita el proceso erosivo.

Al ser la expresión de Yang una ecuación de capacidad de carga total y no estrictamente suspendida, puede no ser la más adecuada si tenemos en cuenta que los valores de concentración de sedimento en el agua de riego se obtienen esencialmente de carga suspendida. El empleo de la potencia unitaria de la corriente en el cálculo de la capacidad de transporte es satisfactorio para partículas de tamaño arena fina y superior (Alonso y col. (1981)), pero no está probado para material más fino, por lo que su aplicación a nuestro caso puede ser discutible.

Asumiendo estas consideraciones, parece claro que, como primera aproximación a la simulación dinámica de la erosión en el riego por surcos, el modelo reproduce de forma satisfactoria situaciones particulares, si bien es necesario profundizar en algunos aspectos para tener un margen más amplio de aplicación.

5. Referencias.

- Alonso, C.V., Neibling, W.H., Foster, G.R.; 1981. *Estimating sediment transport capacity in watershed modeling*. Trans. ASAE, 24, 1211-1220.
- Elliot, R.L., Walker, W.R., Skogerboe, G.V.; 1982. *Zero-inertia modeling of furrow irrigation advance*. J. Irrig. Drain. Div., ASCE, 108, 179-195.
- Elliot, W.J, Kohl, K.D., Laffen, J.M.; 1988. *Methods of collecting WEPP soil erodibility parameters*. ASAE paper 88-138. ASAE, St. Joseph.
- Fernández-Gómez, R., Mateos, L., Giráldez, J.V.; 1995. *Procesos de erosión del suelo en el riego por surcos*. XIII Jornadas Técnicas sobre Riegos, Pto. de la Cruz, Tenerife, España.
- Fernández-Gómez, R., Giráldez, J.V., Mateos, L.; 1996. *Modificaciones texturales en el riego por surcos debidas a la erosión*. XIV Congreso Nacional de Riegos, Almería, España. (En prensa).
- Foster, G.R.; 1982. *Modeling the erosion process*. En *Hydrologic modeling of small watersheds*. Ed. C.T. Haan, H.P. Johnson y D.L. Brakensiek. ASAE Monograph 5. ASAE, St. Joseph.

King, K.W., Flanagan, D.C., Norton, L.D., Lafflen, J.M.; 1995. *Rill erodibility parameters influenced by long-term management practices*. Trans. ASAE, 38, 159-164.

Lafflen, J.M., Thomas, A.W., Welch, R.; 1987. *Cropland experiments for the WEPP project*. ASAE paper 87-2544. ASAE, St. Joseph.

Li, R.M., Simons, D.B., Stevens, M.A.; 1975. *Nonlinear kinematic wave approximation for water routing*. Water Resour. Res., 11, 245-252.

Lu, J.Y., Foster, G.R., Smith, E.E.; 1987. *Numerical simulation of dynamic erosion in a ridge-furrow system*. Trans. ASAE, 32, 1923-1931.

Nearing, M.A., Page, D.I., Simanton, J.R., Lane, L.J.; 1989. *Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model*. Trans. ASAE, 32, 919-924.

Nearing, M.A., Lane, L.J., Alberts, E.E., Lafflen, J.M.; 1990. *Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs*. Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 1702-1711.

Simons, D.B., Şentürk, F.; 1992. *Sediment transport technology*. 2^a Ed., Water Resources Publications, Littleton.

Trout, T.J.; 1991. *Furrow geometric parameters*. J. Irrig. Drain. Eng., 117, 613-634.

Walker, W.R., Humpherys, A.S.; 1983. *Kinematic-wave furrow irrigation model*. J. Irrig. Drain. Eng., 109, 377-392.

Yang, C.T.; 1973. *Incipient motion and sediment transport*. J. Hydraul. Div., 99, 1679-1704.

Movimiento del agua en el perfil de un suelo de Doñana

de Haro J. M.¹ (P), Giráldez J. V.², Ordoñez R.¹, del Moral F.²

(1) Centro de Investigación y Desarrollo Agrario de Córdoba. Dto. de Suelos y Riegos, (2) Universidad de Córdoba.. Dto. de Agronomía.

Resumen

A pesar de la aparente homogeneidad de los suelos arenosos del Parque Natural del entorno de Doñana se ha observado una notable variación en los procesos de transporte de agua en los mismos. La influencia de la materia orgánica y la presencia de sustancias hidrofóbicas causan un comportamiento anómalo de la infiltración.

Summary

Sandy soils of the entorno de Doñana Natural Park in southern Spain exhibit a outstanding inhomogeneity due to the presence of organic matter related hydrophobic substances. Water infiltration rates are quite variable depending on the season and leaching pattern of the soils.

Introducción

El parque de Doñana fue creado en 1969 cuenta actualmente con una extensión de 50.720 hectáreas de parque propiamente dicho y 26.720 de hectáreas de preparque.

Dentro del preparque, se ha detectado la presencia de suelos arenosos repelentes, especialmente llamativos en la zona del Abalarío dominada por la presencia de algunos eucaliptos y sobre todo pinos.

Se ha descrito en muchos países la presencia de suelos presentan características de hidrofobia cuando se secan impidiendo o retrasando la infiltración del agua en la matriz del suelo[1]. Sin embargo la repelencia severa no es muy frecuente lo que hace que se asuman la mayoría de los suelos como no repelentes.

La afinidad o repelencia de un suelo hacia el agua se produce como consecuencia del equilibrio entre dos tipos de fuerzas por un lado la de cohesión entre las moléculas del agua y por otro las de adhesión entre el agua y el suelo.

En este caso parece haber una amplia variabilidad espacial de la repelencia que puede influir en la distribución del agua y solutos que transportan en profundidad.

El objetivo de este trabajo es presentar algunas observaciones que pueden tener influencia en los procesos de infiltración que se presentan en la zona de estudio.

Materiales y métodos

Los experimentos se llevaron a cabo en un suelo arenoso xeropsamment típico situado en el preparque de Doñana en la zona del Abalario, formado por una capa superficial de 0 a 1 cm de profundidad de color más claro y que presenta cierta cohesión entre los granos de arena seguido de un horizonte homogéneo de color más oscuro..

En el cuadro 1 se presenta la variación en profundidad de la materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y pH, así como la proporción de los distintos elementos que influyen en la clase textural, que en todas las profundidades es arenosa.

Se aprecia una clara disminución del contenido de materia orgánica a medida que la profundidad aumenta.

Posteriormente se analizó el suelo en intervalos mas pequeños de profundidad para ver si la tendencia disminuía basándose en la observación de que la capa superior de 0 a 1cm parecía lavada y quizás el menor contenido en materia orgánica pueda explicar el caracter de no repelente. Los resultados se muestran en el tabla II

Prof.	H ₂ O	Cl ⁻	% mat org.	CO ₃ ²⁻	C.I.C meq.gr ⁻¹	Arena	Limo	Arcilla
0-13	5.34	4.37	1.01	-	0.82 E-2	95.6	1.6	2.8
13-25	5.73	4.34	0.82	-	0.42 E-2	95.0	4.2	0.8
25-31	6.05	4.68	0.35	-	0.34 E-2	96.2	1.3	2.5
31-46	6.23	4.84	0.30	-	0.48 E-2	96.3	2.9	0.8
46-58	6.62	5.13	0.23	-	0.38 E-2	89.8	7.8	2.4
58-81	6.95	5.32	0.24	-	0.20 E-2	91.7	3.5	4.8
81-95	6.86	5.53	0.18	-	0.14 E-2	92.3	7.1	0.6

Tabla 1 Características de la arena del Abalario en profundidad. La clase textural en todos los casos fue arenosa

Profundidad	% de materia orgánica
0-3	0.12
3-5	0.32
5-7	0.24
7-10	0.16

Tabla 2. Variación del contenido en materia organica en superficie

Para intentar establecer diferencias de comportamiento entre la capa repelente y la no repelente se ha obtenido la curva de retención en dos tipos de muestras. Seis repeticiones en las que se habían eliminado la repelencia con peróxido de hidrógeno y otras seis en las que se conservaba, (arena lavada y arena no lavada).

Cada repetición se montó siguiendo las recomendaciones de Klute, en cilindros de 5 cm de diámetro y 2 cm de altura, con una densidad aparente de 1.7 gr.cm⁻³. Se mojaron por abajo para evitar la presencia de aire atrapado. Para todos los puntos altos de presión se utilizo un piezómetro incorporado a la Placa de Richard.

Los puntos que se obtuvieron para los primeros tramos de la curva y hasta los 800 cm de tensión se muestran en la figura I y II junto con el ajuste al modelo propuesto por Van Genuchten con la restricción de $m=1-1/2$ (ecuación 1). Los coeficientes de determinación y los otros coeficientes obtenidos con el modelo se presentan en la tabla III

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} ; \quad S_e = \frac{1}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad [1]$$

n y m son constantes empíricas que afectan a la forma de la curva de retención y $\alpha = 1/h_b$, y S_e es el grado de saturación efectivo o contenido reducido de agua, h_b corresponde al valor de tensión de entrada de aire, θ_r y θ_s son la humedad residual y la humedad de saturación respectivamente.

	r^2	Humedad residual	Humedad de saturación	α	n
Arena no lavada	0.9939	0.04827	0.352	0.02235	7.92296
Arena lavada	0.9978	0.0279	0.336	0.13596	3.33541

Tabla 3 resultados del modelo de Van Genuchten aplicado a las muestras alteradas de suelo lavado y suelo inalterado

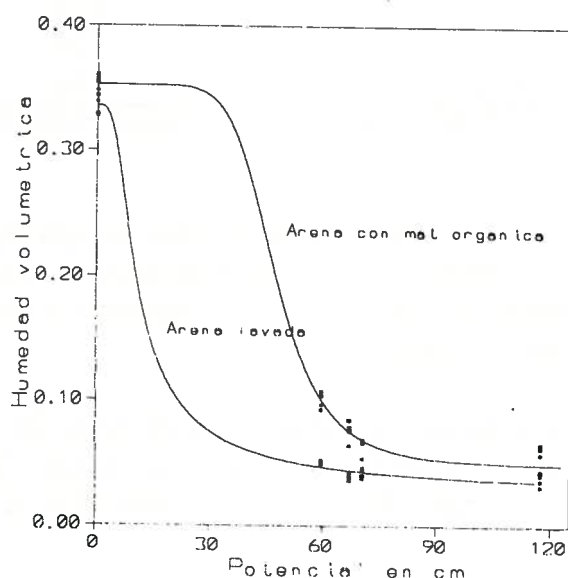


Figura 1 Curva de retención para las muestras lavadas y no lavadas a potenciales altos

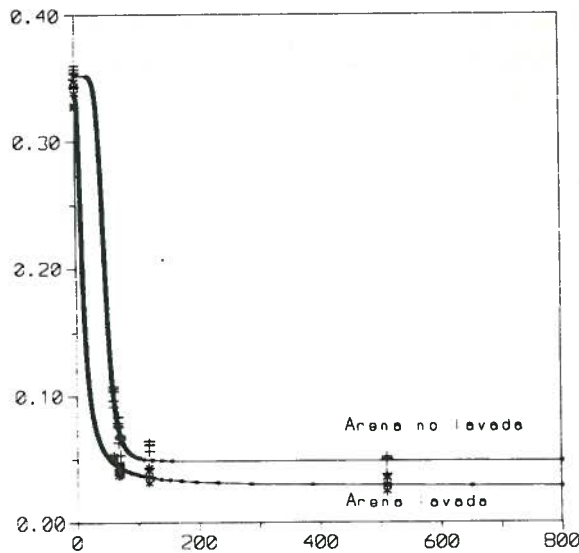


Figura 2 Curva característica para tensiones de hasta 800 cm

Además de la curva de retención se realizaron otros ensayos con el infiltrómetro de tensión para ver el comportamiento del suelo en condiciones de flujo subsaturado. Estos ensayos se realizaron tanto en presencia de la capa inicial no repelente como en su ausencia para ver como se modificaba el proceso de infiltración.

Los resultados que se obtuvieron fueron diferentes en todos los casos, por la gran variabilidad espacial [2] pero la velocidad de infiltración siempre fue mayor cuando se mantenía la capa superficial no repelente. Sin embargo esto no era debido a un movimiento mas rápido del agua en profundidad sino a una mayor difusión lateral [3].

Cuando la capa no repelente era eliminada el flujo lateral disminuía y también la velocidad de infiltración.

Cabe destacar que estos ensayos de infiltración se hicieron en condiciones diferentes de humedad inicial (datos no publicados), en algunos casos cuando el suelo no presentaba valores de repelencia apreciables con el método de MED (molaridad de la gota de etanol), y sin embargo se notaba el efecto de la repelencia del suelo en el proceso de infiltración. Estos resultados están de acuerdo con otros descritos en los que no parece desprenderse una relación tan clara entre el contenido de humedad y la repelencia [4]. Si bien la humedad disminuye la repelencia claramente, en condiciones de alta humedad nosotros hemos constatado que la repelencia tiene sus efectos en el movimiento del agua por lo menos en la primera fase cuando el horizonte inicial se satura.

Basándonos en estas observaciones se realizaron ensayos en los que se esperaba ver un aumento claro de la escorrentía cuando se aplicaran intensidades de lluvia altas. En un caso se utilizo una muestra alterada de suelo montada sobre una caja metálica de 21×32×12 de profundidad sellando los bordes con grasa, en un simulador de lluvia basculante. Para ver el comportamiento de los solutos del agua en este tipo de suelo en un momento del ensayo se aplicó una concentración alta de BrK que posteriormente fue detectado mediante la variación

de conductividad eléctrica. Los resultados de este ensayo se presentan en al figuras 3 y 4. En este ensayo toda la lluvia aplicada infiltro y no se obtuvo escorrentía. Este mismo tipo de ensayo se aplico en Doñana mediante un simulador de una sola boquilla en una parcela de 50x50 cm y tampoco se obtuvo escorrentía.

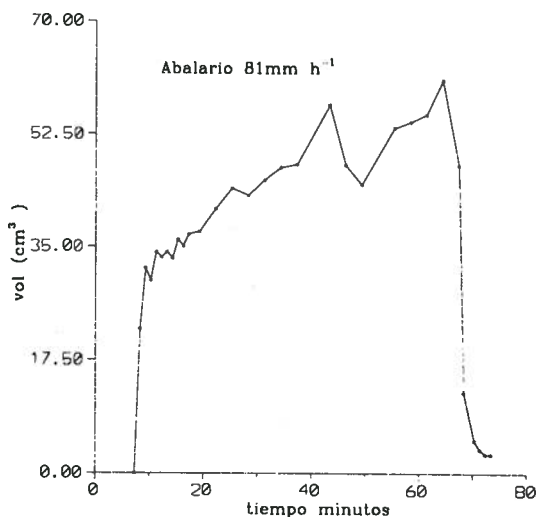


Figura 3 Tiempo de ensayo frente al volumen infiltrada

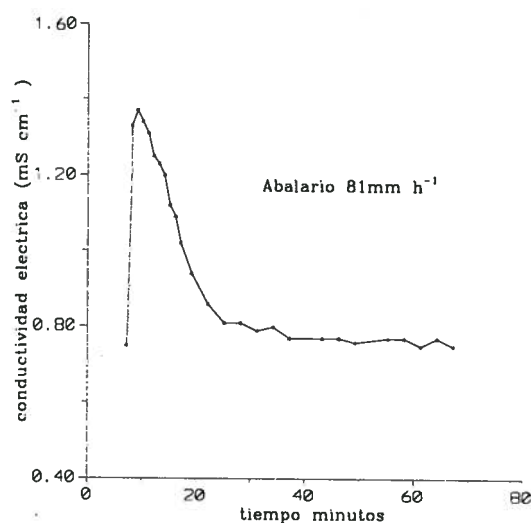


Figura 4 Variación de la conductividad eléctrica después de la aplicación de un pulso de Br K

Para calcular la conductividad hidráulica saturada se intento utilizar el permeámetro de Guelph pero la capacidad de infiltración de agua del suelo fue tan grande que no se pudieron obtener medidas fiables conductividad hidráulica saturada en campo.

En laboratorio y mediante el método de carga variable [5]se obtuvieron valores de conductividad hidráulica saturada de 0.015 cm⁻¹.

Tension 10 cm

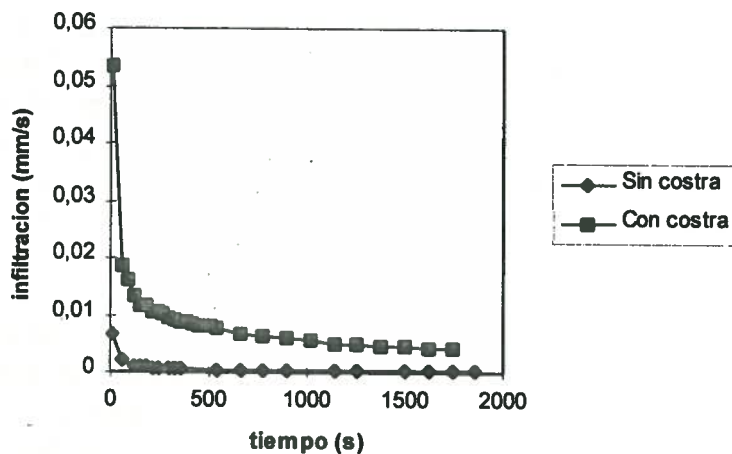


Figura 5 Velocidad de infiltración a tensión de 10 cm

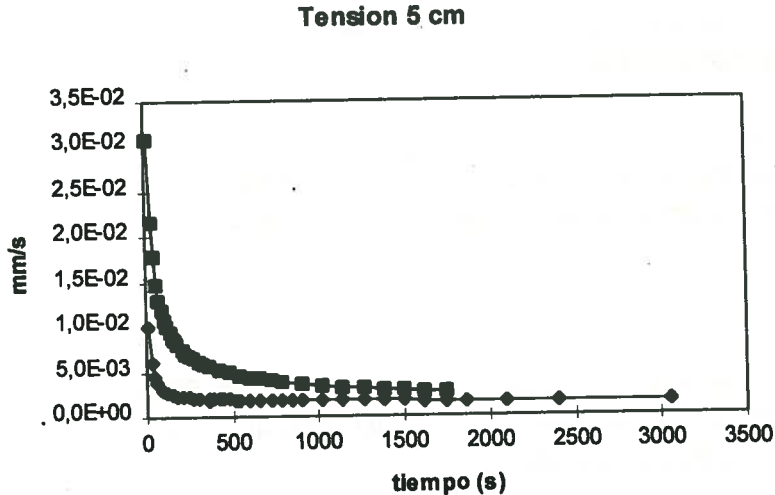


Figura 6 Velocidad de infiltración a tensión de 5 cm los símbolos presentan la misma correspondencia que la figura anterior

Resultados y discusión

En el análisis del suelo en profundidad (tabla 1) se observa en los primeros 13 cm el contenido en materia orgánica es superior a los estratos inferiores sin embargo cuando esta primera capa se analiza en intervalos más pequeños se observa que la tendencia cambia (tabla 2), siendo mayor el contenido de materia orgánica, no en la superficie sino desde los 3 a los 5 cm. Esta disminución puede ser debida a fenómenos de lavado hacia capas más profundas y al mismo tiempo está en consonancia con el aumento de repelencia que se produce en los primeros centímetros de suelo.

El primer centímetro de suelo no repelente lo sería como consecuencia del lavado de la materia orgánica responsable de conferir esta característica aunque conserve cierto material cementante que explicaría la consistencia que presenta.

Cuando se observan las características de la curva retención para los dos tipos que se han considerado representativos de una y otra zona se observa que los efectos de la materia orgánica si bien no producen un aumento alto en el punto de saturación sí produce un aumento en la forma de la curva en los primeros tramos, en la presión de entrada del aire. Esto implicaría que el suelo no lavado en condiciones de subsaturación podría conducir el agua más fácilmente que la arena lavada, ya que teniendo una porosidad semejante, el tamaño de los poros más grandes es menor que en la arena lavada.

Por tanto en campo cabría esperar que cuando la capa superficial se eliminase y el ensayo se realizase a tensiones mayores la velocidad de infiltración aumentaría puesto que el conjunto de poros que estarían actuando a esa tensión en la conducción del agua sería mayor. Sin embargo lo que ocurre es justo lo contrario (figuras 5 y 6) a medida que la tensión aumenta las diferencias entre la curva obtenida con costra y la obtenida sin costra aumentan. Esto puede ser debido a que la repelencia se hace mas severa cuando los poros que se consideran son más pequeños, es decir la repelencia no solo dependería de la materia orgánica sino del tamaño de poro donde esa materia orgánica se deposita. En los poros pequeños la repelencia se haría

mas evidente que en los poros grandes y al aumentar la tensión aplicada con el infiltrometro la repelencia se haria más evidente.

Sin embargo todavia no se han encontrado una explicación clara de porqué esta repelencia al menos en algunos ensayos de los realizados no tiene una acción mas clara en la generación de escorrentía al menos cuando las intensidades de lluvia son altas.

Conclusiones

La presencia de una capa de suelo con material lavado por encima de la arena repelente produce un aumento en la distribución lateral del agua que debe de tener importancia en los episodios de lluvia de escasa intensidad.

Es posible que el efecto de la repelencia sea mas intenso cuando el tamaño de poro que interviene en el transporte es más pequeño. Esto tendria implicaciones tanto en los fenómenos de redistribución del suelo como en fenomenos de transporte de solutos en profundidad.

De los resultados que se han obtenido hasta ahora se desprende que a intensidades de lluvia altas los fenómenos de repelencia del suelo no tendrían una importancia grande en la generación de un aumento de escorrentía.

Referencias

- [1] Wallis M.G., Scotter D.R., Horne D.J. 1991. An evaluation of the intrinsic sorptivity water repellency index on a range of New Zealand soils. *Aust. J. Soil Res.* 29:353-362
- [2] Bond R.D. 1964. The influence of the microflora on the physical properties of soils. II Fields studies on water repellent sands. *Aust. J. Soil Res.* 2:123-131.
- [3] Ritsema C.J., Dekker L.W. 1995. Distribution flow. A general process in the top layer of water repellent soils. *Water Resources Research.* 31:1187-1200.
- [4] Wallis M.G., Horne D.J., 1992. Soil water repellency. *Advances in Soil Science*, vol 20. pags 92-146.
- [5] Klute A. Ed. *Methods of soil analysis.* ASA. Monog. 9, Wisconsin.

Estudio comparado de la difusividad por métodos uni y dimensionales

Hidalgo, R.E.(P) (1); *Moral F.J.* (3); *Giráldez, J.V.* (2,3)

1. Dpto Ingeniería Rural, ETSIA, Univ. Almería.
2. Dpto. de Suelos y Riegos, CIDA, Córdoba.
3. Dpto. de Agronomía, ETSIAM, Univ. Córdoba.

Resumen

Para la determinación de la difusividad en dos tipos distintos de suelos, uno arenoso y otro arcilloso, se han empleado dos métodos, uno unidimensional (Bruce y Klute, 1956) y otro bidimensional (Turner y Parlange, 1975). El análisis comparado de los resultados obtenidos nos indicará la idoneidad en la aplicación de uno u otro para cada tipo de suelo.

Abstract

To determinate the diffusivity in two different kind of soils, one sandy and another clayey, we have used two methods, a unidimensional one (Bruce and Klute, 1956) and another bidimensional (Turner and Parlange, 1975). The comparison of the obtained analysis results will provide us the idoneity n the application of the correct method for each kind of soil.

1. Introducción

La difusividad, es una característica física del suelo que relaciona la conductividad hidráulica K , la componente matricial del potencial ψ_m y el contenido de humedad volumétrica θ . $D = Kd\psi/d\theta$. Es una función alternativa a la conductividad hidráulica para definir el comportamiento del agua en el suelo. Se supone que la difusividad depende únicamente de la humedad θ .

Para caracterizar la difusividad se ha usado tradicionalmente el método de Bruce y Klute, adoptado de autores anteriores, quienes aprovechaban, que en flujos horizontales, unidimensionales, no intervenía la componente gravitatoria simplificando notablemente la ecuación de Richards a:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

siendo t el tiempo y x la coordenada vertical. Habitualmente esta ecuación se resuelve sujeta a las condiciones inicial y de contorno,

$$\begin{aligned} \theta(x, t) &= \theta_i, & x > 0 & \quad t = 0 \\ \theta(x, t) &= \theta_s, & x = 0 & \quad t > 0 \end{aligned}$$

siendo θ_i , humedad inicial y θ_s , la humedad en estado de saturación.

Esta ecuación fue resuelta por primera vez, considerando que la difusividad era variable, por Klute (1952). Bruce y Klute (1956) aplicaron la ecuación anterior al avance horizontal de la humedad en un tubo horizontal, conteniendo suelo homogéneo, para obtener la relación entre la difusividad y el contenido de humedad. El agua penetrará en el suelo tan rápidamente como éste pueda absorberla, ya

que el potencial de aplicación en el extremo libre es nulo. La constante gravitatoria y la coordenada vertical no influyen en el problema porque el tubo es de un diámetro relativamente pequeño.

La ecuación (1), es diferencial en derivadas parciales, no lineal, por lo que no se puede resolver por métodos sencillos. Bruce y Klute utilizaron la transformada de Boltzmann, para transformarla a una ecuación diferencial ordinaria. Utilizando esta transformación, $\lambda = xt^{-\frac{1}{2}}$, se modifica la ecuación (1), se llega a:

$$D(\theta_x) = -\frac{1}{2(d\theta/d\lambda)_{\theta_x}} \int_{\theta_i}^{\theta_x} \lambda d\theta \quad (2)$$

Siendo θ_i la humedad inicial del suelo y θ_x la humedad a una distancia x . Como las nuevas condiciones de la ecuación son:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_i, & \lambda &\rightarrow \infty \\ \theta &= \theta_s, & \lambda &= 0 \end{aligned}$$

que implican una gran longitud, medio semiinfinito más correctamente, se debe finalizar la prueba antes que el frente de humedecimiento alcance el final del tubo.

Turner y Parlange (1975) extendieron este método al plano considerando un flujo radial, con la coordenada r . En este caso se considerará la transformación: $\eta = rt^{-\frac{1}{2}}$. Con ésta se obtiene una expresión similar a la (2) con las mismas condiciones:

$$D(\theta_x) = -\frac{\eta^{-1}}{2(d\theta/d\psi)_{\theta_x}} \int_{\theta_i}^{\theta_x} \eta^2(a) da \quad (3)$$

La principal diferencia entre las dos ecuaciones es que (3) aparece el término η^{-1} . Imponer una condición límite sobre una superficie que se mueve ($r_1 = \lambda t^{\frac{1}{2}}$, siendo r_1 el radio de la superficie más o menos circular alcanzada por el agua) es difícil. Sin embargo, si $\lambda = 0$ entonces $r_1 = 0$, con lo que las soluciones se aplican para una condición de flujo constante.

Ambos métodos se han usado en diferentes condiciones, especialmente la versión unidimensional. Sin embargo no se han comparado sus resultados. Debido a que en medios arenosos la forma bidimensional pudiera ser más rápida en cuanto a su aplicación, y por la importancia que implica el conocimiento del movimiento del agua en medios porosos granulares, el objetivo de este trabajo es comparar el comportamiento de los dos métodos.

2. Metodología

Se utilizaron dos tipos de suelos para este ensayo. Uno arenoso (El Abalarío) y otro arcilloso (Tomejil). El suelo arenoso se lavó con agua oxigenada, para que perdiera la repelencia al agua previamente observada. Las muestras de suelo se secaron al aire y se tamizaron por una malla de 2 mm. Se realizaron dos ensayos distintos por muestra de suelo para medir la difusividad.

2.1 Ensayo bidimensional.

Para esta técnica se utilizó una caja desmontable con dos tapas de 60 x 60 cm. de superficie, con una profundidad de 2 cm. La tapa superior tenía un orificio circular en el centro de aproximadamente

1.5 cm de diámetro. Las caras superior e inferior de la caja eran transparentes, para poder registrar el frente de humedecimiento lateral. El agua se suministró a través de un gotero, de los utilizados en medicina.

Se llenó progresivamente la caja con cada uno de los suelos, compactándola simultáneamente. Por el centro de la cara superior de la caja se aplicaron, en dos ensayos por suelo, dos caudales de agua de 2.5 y 5 mL/min respectivamente. Sobre ambas caras de la caja se fue marcando el avance de la superficie mojada, en intervalos de tiempo variables en función del tipo de suelo y del caudal empleado. Una vez finalizado el aporte de agua se tomaron 40 muestras, para medir la humedad gravimétrica según ocho direcciones radiales, desde el centro de la caja. La densidad aparente se estimó a partir del peso y volumen de suelo compactado en la caja.

2.2 Ensayo unidimensional.

Se emplearon anillos cilíndricos de latón de 4 cm de radio, y con dos alturas 1 y 2 cm. Unidos estos anillos formaron una columna de suelo. En los extremos del tubo, se colocaron dos telas de malla muy fina, con el objeto de que permitieran pasar el agua pero no el suelo. Al extremo que iba a entrar en contacto directo con el agua se le acopló una tela metálica de hierro galvanizado de 1 mm² de sección, para darle una mayor protección. El agua se aportó al sistema mediante un dispositivo de Mariotte, con presión nula (figura 1).

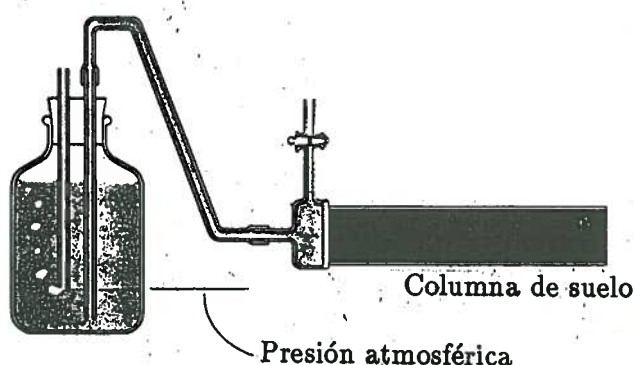


Figura 1. Dispositivo para la realización del ensayo unidimensional.

Una vez unidos los anillos se fué llenando la columna con cada tipo de suelo, al tiempo que se sometió a una ligera vibración, que favoreciendo la compactación progresiva del suelo. La estimación de la densidad aparente para cada ensayo se realizó mediante diferencia de pesada de la columna vacía y llena, conociendo el volumen del tubo.

En función del tipo de suelo, la duración del ensayo fue variable, desde algunos minutos para el suelo arenoso hasta de horas en el caso de la arcilla. Una vez acabado el ensayo se seccionó el tubo en los anillos correspondientes, determinándose a continuación la humedad.

3. Resultados y discusión

3.1 Ensayo bidimensional.

Los contenidos de humedad quedaron por debajo de 0.01 gg⁻¹ en el suelo arenoso y 0.08 gg⁻¹ en el suelo arcilloso. Las densidades aparentes medias de las muestras secas, de arena y arcilla, fueron 1.58 g/cm³ y 1.21 g/cm³ respectivamente. En la figura 2, se muestran las posiciones del frente de

humedecimiento para distintos intervalos de tiempo, en función tanto del tipo de suelo como del caudal aplicado. En esta misma figura se aprecia un desplazamiento a modo de circunferencias concéntricas para el suelo arcilloso y más irregulares para el suelo arenoso. Esto se debe a la dificultad en conseguir una compactación homogénea en la arena. Debido a la gravedad, no coinciden los frentes de humedecimiento en las caras superior e inferior, tomándose el valor medio de ambos. Turner y Parlange observaron un comportamiento similar en un suelo franco arenoso.

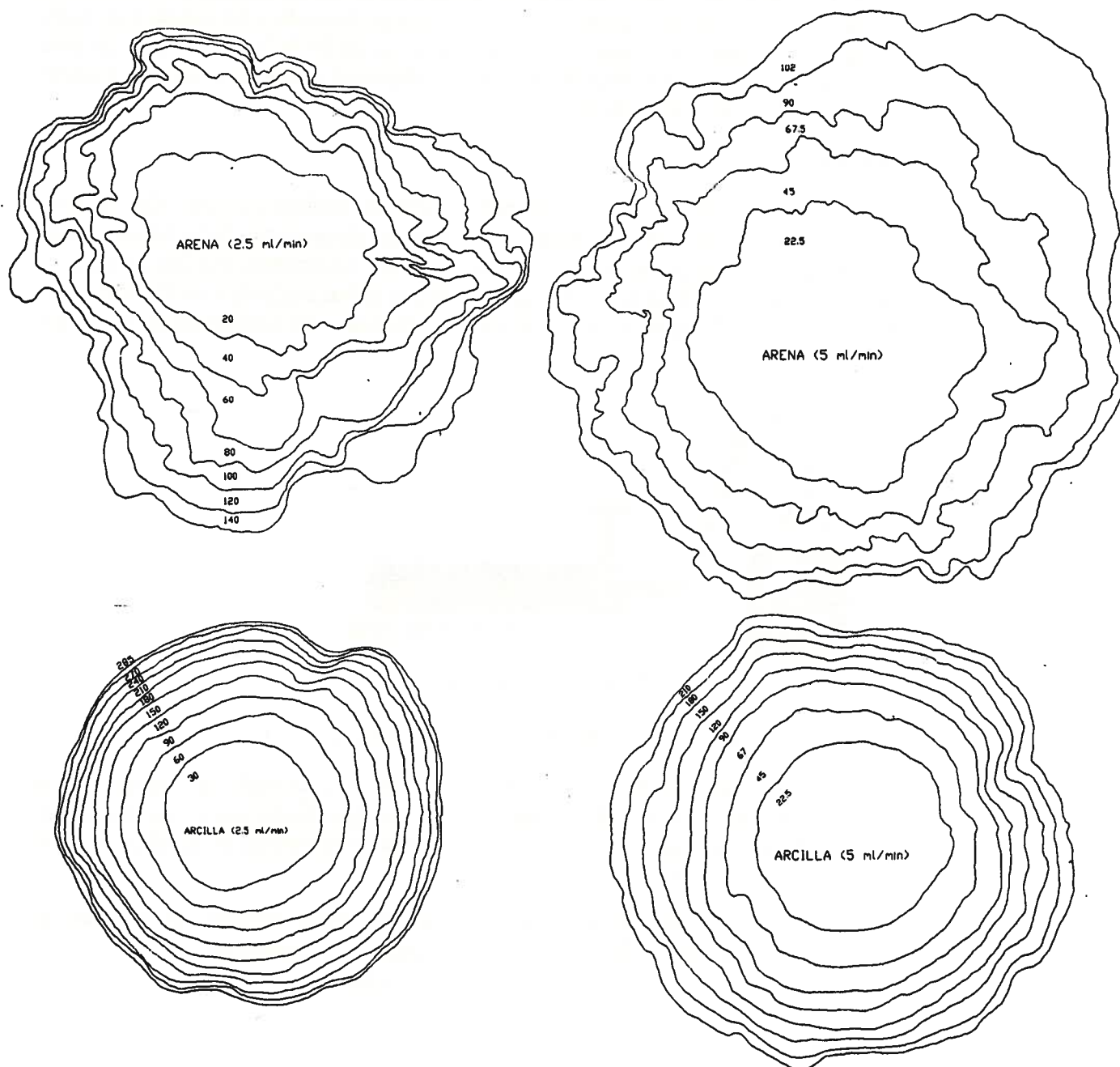


Figura 2. Posiciones del frente de humedecimiento, para los tiempos indicados, en función del suelo y caudal aplicado.

En la figura 3 se representan las superficies de humedecimiento en función del tiempo, para cada uno de los suelos y caudales. Para un tiempo cualquiera, la superficie humedecida es mayor a medida que

aumenta el caudal; para suelos arenosos en los primeros minutos no se aprecian diferencias importantes para ambos caudales. Sin embargo, en el caso del suelo arcilloso, el frente de humedecimiento varía desde el inicio del ensayo.

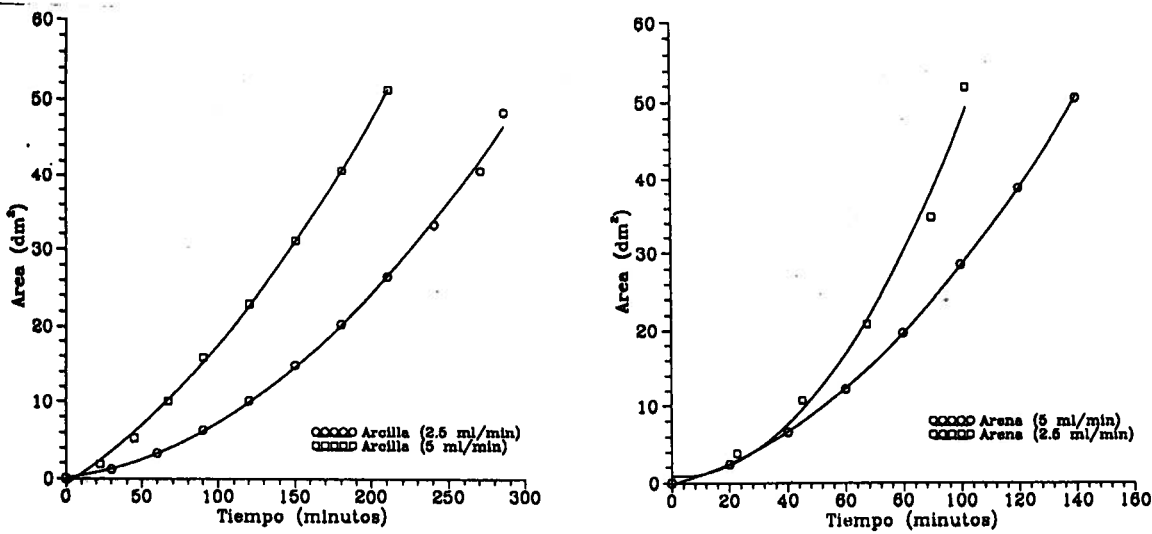


Figura 3. Relación entre el tiempo y el área humedecida.

En la figura 4 se ajustan a cada tipo de suelo sendas curvas polinómicas de tercer grado, para cada una de las nubes de puntos obtenidas al representar el contenido de humedad al final de cada ensayo menos la inicial, frente a la transformada de Boltzmann normalizada. Existe una relación entre caudales y la transformada de Boltzmann normalizada del tipo:

$$\left(\frac{\eta_{01}}{\eta_1}\right)^{2Q_1} \approx \left(\frac{\eta_{02}}{\eta_2}\right)^{2Q_2} \tag{4}$$

siendo η_{0i} la posición media del frente en el tiempo de cada ensayo y Q_i el caudal aplicado.

Como consecuencia de esto, cuando se aplica $(Q_i/2)$ en el eje de abscisas se considerará (η/η_0) .

En el cuadro 1 se exponen los coeficientes obtenidos para cada suelo.

Cuadro 1: coeficientes del polinomio de ajuste				
Suelo	a	b	c	d
El Abalarío	0.25	-0.26	0.97	-0.58
Tomejil	0.15	-0.18	0.14	-0.12

Al resolver la ecuación [3], integrando el área de las curvas obtenidas en la figura 4, se estiman los valores de la difusividad (figura 6).

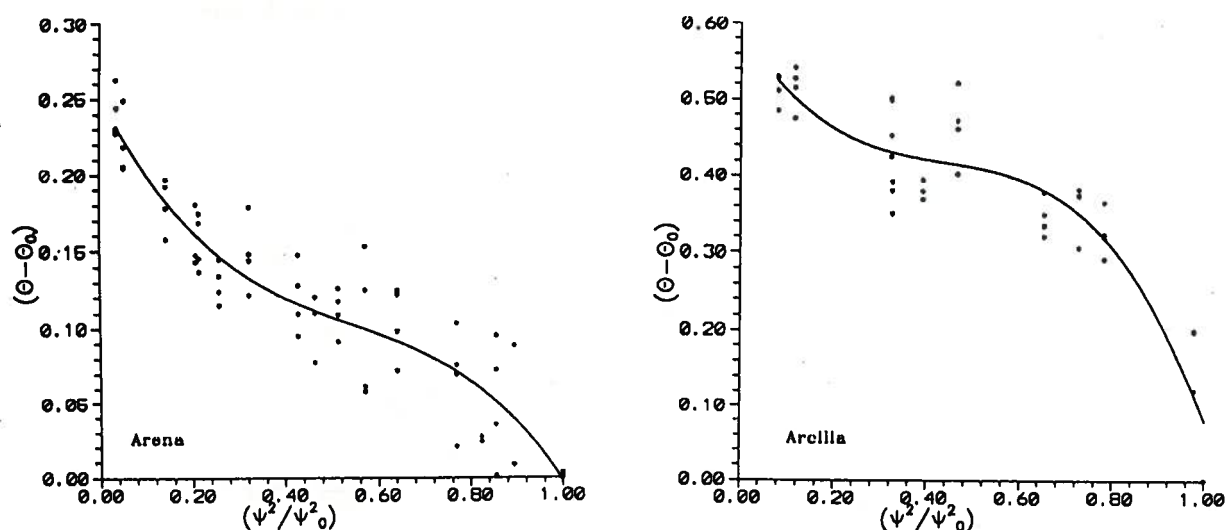


Figura 4. Ensayo bidimensional: ajuste de curvas polinómicas a las nubes de puntos.

3.2 Ensayo unidimensional.

En la figura 5 se relaciona el contenido de humedad, θ , y la transformada de Boltzman, λ , para cada tipo de suelo. Se ajustaron curvas polinómicas de cuarto grado para cada una de las nubes de puntos.

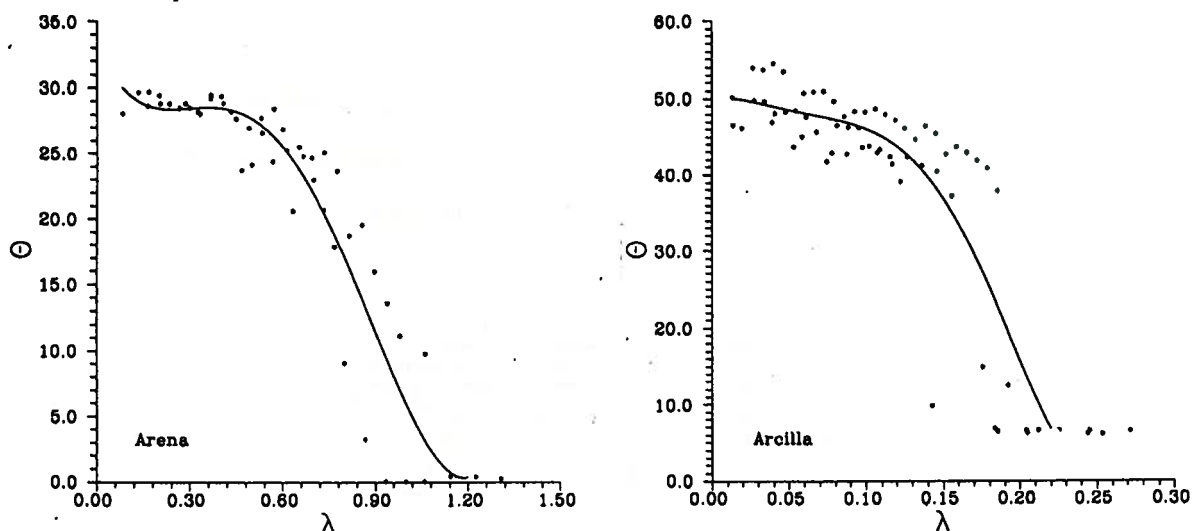


Figura 5. Ensayo unidimensional: ajuste de curvas polinómicas a las nubes de puntos.

El cuadro 2 refleja los coeficientes del polinomio de ajuste obtenido.

Cuadro 2					
Suelo	a	b	c	d	e
El Abalarío	33.35	-56.78	221.91	-332.34	139.80
Tomejil	50.41	-102.32	2550.7	-24791.1	52647.8

Resolviendo la ecuación [2], e integrando el área de las curvas de la figura 5. se estiman los valores de la difusividad.

4. Conclusiones

Las curvas de difusividad obtenidas (figura 6), representan razonablemente bien el comportamiento del suelo en ambos ejemplos.

A la vista de los resultados, podemos concluir que en función de la textura del suelo:

1. El método unidimensional estaría más indicado para suelos arenosos. Posiblemente por los problemas de la compactación previa al ensayo, es complicado emplear el método bidimensional en estos suelos. Ello queda contrastado por las irregularidades observadas en su frente de humedecimiento (figura 2). Por otra parte, al no caer bruscamente la humedad, se pueden seccionar perfectamente los distintos anillos del método unidimensional.
2. Contrariamente, el método bidimensional parece más apropiado que el unidimensional en los suelos arcillosos, observándose una menor irregularidad del frente de humedecimiento. No obstante, por problemas de variabilidad, es conveniente hacer un mayor número de repeticiones.

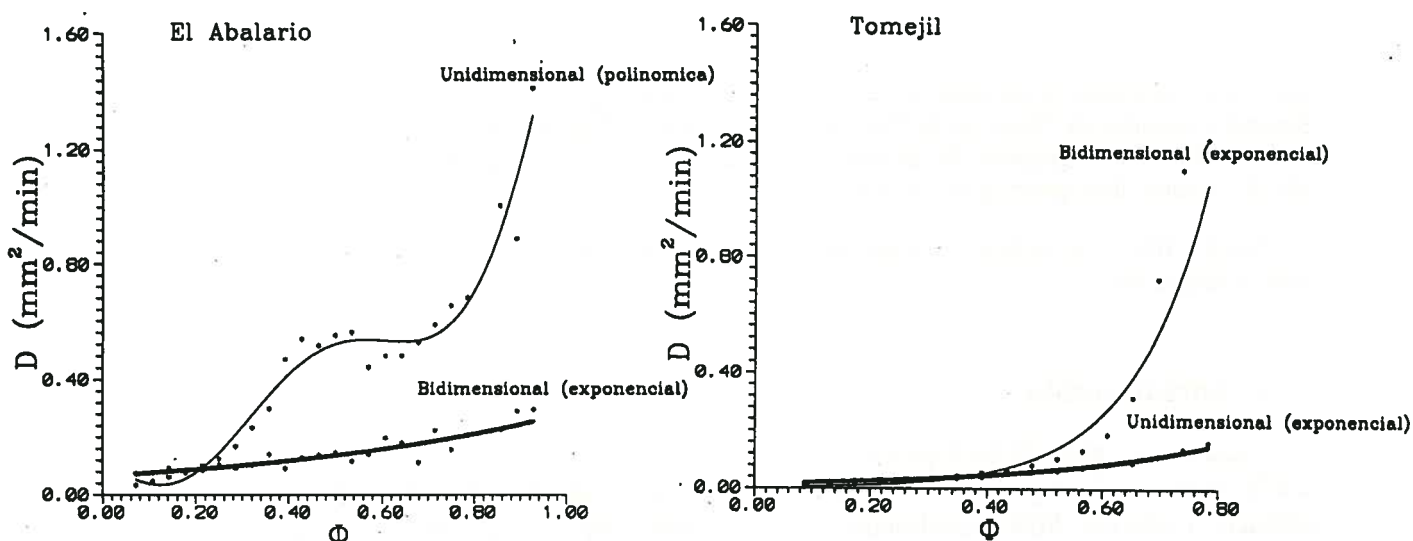


Figura 6. Relaciones entre la difusividad y la humedad (expresada como grado de saturación). Entre paréntesis se indica el tipo de función a la que mejor se ajusta.

5. Referencias

BRUCE, R.R. y KLUTE, A. (1956). "The measurement of soil moisture diffusivity". Soil Sci. Soc. Am. Proc., 20:458-462.

KLUTE, A. (1952). "A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials". Soil Sci., 73:105-116.

TURNER, N.C. y PARLANGE, J-Y. (1975). "Two-dimensional similarity solution: Theory and application to the determination of soil water diffusivity". Soil Sci. Soc. Am. Proc., 39:387-390

Movimiento del agua en suelos arenosos: el problema de la repelencia

Moral, F.J. (P) (1); Giráldez, J.V. (1,2) y Laguna, A. (1)

1. Dpto. de Agronomía, ETSIAM, Univ. Córdoba.

2. Dpto. de Suelos y Riegos, CIDA, Córdoba.

Resumen

La repelencia del suelo con respecto al agua es un fenómeno poco conocido pero que reviste importancia en algunas zonas, como en las dunas costeras del Atlántico sur, en el Parque Natural del Entorno de Doñana. El fenómeno, de origen orgánico, atribuido a sustancias segregadas por la vegetación natural, se manifiesta de forma estacional con un máximo en la temporada seca hasta desaparecer en la temporada de lluvias.

En este trabajo se presentan los resultados de una campaña de observaciones, discutiéndose las implicaciones que la repelencia representa en el manejo de los suelos.

Abstract

Soil water repellency is a little known phenomenon but important in some areas like coastal dunes of Southern Atlantic, in "Entorno de Doñana" Natural Park. This phenomenon, with an organic origin and due to substances segregated by natural vegetation, is observed evenly distributed with a maximum in the dry season, disappearing in the wet season.

Results from a sampling campaign are shown in this work, discussing implications of repellency in soils management.

1. Introducción

Cuando una gota de un líquido se pone en contacto con una superficie de otro líquido o un sólido, se dice que el primero moja al otro cuando es capaz de esparcirse sobre la superficie de contacto o interfaz. Más formalmente cabe decir que el líquido moja al otro material si su propio trabajo de cohesión es inferior al trabajo de adhesión entre él y el substrato (e.g. Hunter, 1987, §5.10). De forma práctica la mojabilidad se estima por el ángulo de contacto, θ , entre el líquido y el otro material, indicado en la figura 1.

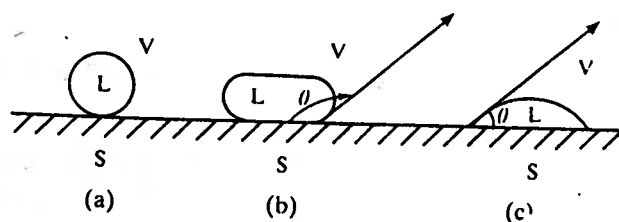


Fig 1. Formas de gotas en contacto con una superficie: a) líquido no mojannte o repelente; b) líquido parcialmente repelente ($\pi/2 < \theta < \pi$); c) líquido parcialmente mojannte ($0 < \theta < \pi/2$)

El ángulo de contacto se expresa por la ecuación de Young-Dupré: $\cos \theta = (\sigma_{SV} - \sigma_{SL}) / \sigma_{LV}$; σ representa las tensiones superficiales respectivas de las interfaces entre sólido, S, líquido, L, y vapor, V. Si el ángulo es superior a $\pi/2$ se dice que el líquido es repelente, tendiendo las gotas a rodar por la superficie. En un medio poroso es preciso considerar la acción capilar, puesto que, como observa *Adamson (1967, §X-3)*, el flujo del agua a través de aquel dependerá también del gradiente de potencial, puesto que repelencia no es impermeabilización.

La repelencia al agua es un fenómeno que ocurre en algunos suelos. Sus efectos van desde calvas en céspedes de jardines o campos de deportes hasta una aceleración de la erosión cuando como consecuencia de un fuego se forma una capa hidrofóbica en superficie o en algún horizonte somero, dando lugar a un aumento de la escorrentía (*Coelho et al., 1990*).

Hay suelos repelentes al agua en muchas zonas de la superficie terrestre y bajo todo tipo de climas. En Holanda más del 75% de los horizontes superiores de los suelos cultivables o utilizables para pasto son repelentes, y más del 95% se sitúan en el intervalo más extremo (desde fuerte a extremadamente repelente). Es particularmente frecuente en las dunas litorales del oeste europeo.

La repelencia al agua es causada por una gran cantidad de materiales orgánicos hidrofóbicos (*Bisdorn et al., 1993*). En los suelos arenosos de Australia se han encontrado hifas de hongos (*Bond y Harris, 1964*), ácidos húmicos (*Roberts y Carbon, 1972*) y material descompuesto de plantas (*McGhie, 1987*), bajo diferentes cubiertas vegetales, incluyendo bosques, praderas o suelos con cultivos leñosos o herbáceos.

La velocidad de infiltración en los suelos repelentes al agua es mucho menor que en los suelos humedecibles (*Van Dam et al., 1990; Ritsema et al., 1993*). Los patrones de humedecimiento en estos suelos son muy irregulares e incompletos (*Jungerius y Dekker, 1990; Ritsema et al., 1993*). Debido a que la repelencia es mayor en los suelos secos, esta puede ser la razón por la cual la escorrentía generada por el primer chubasco es mayor que la producida después (con chubascos iguales). La repelencia al agua tiende a incrementar la escorrentía y la erosión y disminuir la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. El agua y los solutos se mueven en los suelos repelentes al agua a través de caminos de flujo preferencial, conocidos como dedos o lenguas. Esto acelera el transporte de agua y solutos hacia la zona saturada, con el riesgo de contaminación de las reservas de agua del suelo.

El propósito de este trabajo es describir la repelencia observada en los suelos del Parque Natural del Entorno de Doñana.

2. Materiales y métodos

2.1. Características del área de investigación. Suelo y clima

El suelo analizado procede del Parque Natural del Entorno de Doñana, en la zona de El Abalarío. Se ha estudiado la variabilidad espacial en el contenido de humedad del suelo y su repelencia al agua en distintas parcelas, cubiertas en muchos casos parcialmente de agujas de pino. El suelo, arenoso, es clasificado como xeropsamment típico. En él se distingue una capa superficial muy fina, entre 0 y 1 cm aproximadamente (formando una especie de costra superficial), que puede ser considerada como no repelente, y un horizonte arenoso más o menos homogéneo en profundidad. El contenido medio en materia orgánica en la zona más superficial es del 1%, disminuyendo en profundidad hasta alcanzar un 0.3% a los 30 cm. El contenido de arcilla es inferior al 4.3% y el de arena está en torno al 92%.

La precipitación media anual de la zona es de 647 mm, estando distribuida estacionalmente. La evapotranspiración potencial es de 896 mm. La temperatura media mensual oscila entre

10.4°C en el mes de enero y 25.5°C en el de agosto (*Almanza, 1984*).

2.2. Muestreos del suelo

Entre Octubre de 1995 y Febrero de 1996 se realizaron las tomas de muestras en varias ocasiones, los días 12 de Octubre, 24 de Noviembre, 19 de Diciembre y 7 de Febrero. En este periodo, se obtuvieron muestras de suelo seco al principio, porque en Octubre todavía no se había iniciado la estación de lluvias, pasando a condiciones más húmedas en los meses posteriores.

Se excavaron calicatas de 1.5 m de anchura y unos 50 cm de profundidad. En ellas se cogieron muestras a 3 profundidades distintas: 1-8, 15-23 y 30-37 cm, utilizándose cilindros de acero de 450 cm³. A cada profundidad se tomaron 6 muestras distribuidas regularmente a lo ancho de la calicata. Las muestras se pesaron y después se secaron en el laboratorio, durante al menos 2 días, a 60°C; a continuación se volvió a pesarlas para determinar el contenido de humedad y la densidad aparente en algunos casos. Finalmente se realizaron las pruebas para estimar, en los casos en que fué necesario, la severidad de la repelencia.

2.3. Medida de la repelencia al agua

La repelencia al agua se caracteriza según el ángulo de contacto. Para determinarlo, al menos indirectamente, se utilizan los valores del grado de repelencia al agua y persistencia de la misma.

2.3.1. Grado de repelencia al agua

El ángulo de contacto sólido-líquido es función de la tensión superficial del líquido, como se ha indicado. Esta tensión se puede medir preparando una serie de soluciones acuosas de etanol. El procedimiento a seguir consiste en aplicar una gota de cada solución a la muestra, cronometrando el tiempo que tarda en infiltrarse, de forma que cuando mayor es la tensión superficial del líquido aplicado, mayor es el ángulo de contacto y más lentamente se infiltra. Se consigue disminuir la tensión superficial del líquido aumentando el contenido de etanol en la solución (*King, 1981; Ma'shum et al., 1988*). En la actualidad, se usa la molaridad de la gotilla de etanol (MED en siglas inglesas). Equivalentemente se puede expresar el grado de repelencia al agua como el menor porcentaje de alcohol de la solución que penetra en el suelo en un intervalo menor o igual que 5 s (*Dekker y Ritsema, 1994*). Para la realización de la prueba del porcentaje de alcohol se prepararon soluciones con cantidades variables desde 1 hasta el 35% en base volumétrica. Se efectuó la prueba sobre muestras secadas en estufa, manteniendo una temperatura de unos 20°C y 50% de humedad relativa. La realización de las pruebas se retrasó al menos 2 días desde que las muestras se sacaron de la estufa, para lograr un equilibrio con las condiciones ambientales. La temperatura del agua aplicada y la humedad relativa del aire influyen en la tensión superficial del líquido, con lo cual, estas deben ser más o menos constantes. Se recomiendan valores de 18°C a 23°C en la temperatura y un 50% de humedad relativa.

2.3.2. Persistencia de la repelencia al agua

La persistencia de la repelencia al agua se estima con el método del tiempo de penetración de la gota de agua, WDPT en siglas inglesas (e.g., *Krammes y DeBano, 1965; Letey et al., 1975; Dekker y Jungerius, 1990*). Para ello se vierten 3 gotas de agua destilada en la superficie de la muestra de suelo, previamente secada; se mide el tiempo que transcurre hasta que se infiltra la segunda gota. Si la gota permanece sobre la muestra se supone que el ángulo de contacto sólido-líquido es mayor de 90° y, si no ejerce un gradiente de potencial, nunca penetrará. Si disminuye la tensión superficial del líquido, disminuye el ángulo, que si desciende de 90° permitirá que la gota se infiltre. Según este ensayo, se agrupan los suelos en dos categorías: repelentes, con ángulo de contacto mayor de 90°, y no repelentes, con ángulo menor. Se considera que un suelo es repelente si el tiempo de penetración de la gota de agua excede los 5 s (*Dekker y Jungerius, 1990*). Este

tiempo se tomó por conveniencia, sin significado físico (*Richardson, 1984*). Habitualmente se establecen las clases, en función del tiempo, según se muestra en la tabla 1.

	No repelente	Repelente			
WDPT (s)	≤5	5-60	60-600	600-3600	≥3600
Clase	no rep.	ligero	fuerte	severo	extremo

Al igual que la prueba anterior, se efectuaron los ensayos sobre muestras secadas en estufa, manteniendo una temperatura de unos 20°C y 50% de humedad relativa. También se retrasaron al menos 2 días desde que las muestras se sacaron de la estufa, para lograr un equilibrio con las condiciones ambientales.

3. Resultados

3.1. Repelencia potencial al agua

Se midió la persistencia de la repelencia potencial al agua del suelo sobre todas las muestras, una vez que estas fueron secadas en la estufa. En la figura 2.c se observa la variabilidad espacial de esta propiedad en todas las calicatas. En la del 19 de Diciembre se encuentra una amplia uniformidad, con un perfil mayoritariamente humedecible, mostrando sólo una pequeña zona ligeramente repelente. En las demás la variabilidad es más acusada; en todas ellas se tienen bandas verticales de suelo humedecible junto a otras bandas con suelo desde ligera hasta severamente repelente. Las zonas con mayor persistencia se encontraron a una profundidad entre 1 cm (justo debajo de la costra superficial no repelente) y unos 15 cm; *Dekker y Ritsema (1994)* indicaron que la profundidad con mayor WDPT, en su zona de trabajo, se encuentra entre 25-30 cm.

El grado de repelencia potencial al agua se determinó con la prueba del porcentaje de etanol. En la figura 2.b se muestra la distribución en profundidad para todas las calicatas. En general, se observa como hay un decrecimiento en profundidad del grado de repelencia. En todos los casos existe una variabilidad para una profundidad determinada. Los máximos valores del porcentaje de alcohol, cuando se analizan las calicatas con una mayor distribución del grado de repelencia (las del 24-11-95 y 7-2-96), se tienen para una profundidad entre 1 y 10 cm aproximadamente, o sea, cerca de la superficie (tal y como encontraron *Dekker y Ritsema, 1994*).

Comparando las figuras 2.b y 2.c se encuentra una relación entre el grado y la persistencia de la repelencia potencial al agua. Como es de esperar, se tiende a aumentar la severidad, indicada por el porcentaje de alcohol, con el incremento de la persistencia, indicado por el WDPT.

La repelencia potencial al agua de un suelo se asume como un parámetro independiente del tiempo, el cual varía de un lugar a otro debido a cambios locales del tipo de vegetación y de la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo. La repelencia potencial en suelos arenosos se observa hasta unos 40-45 cm de profundidad, siendo nula en los horizontes más profundos (*Dekker y Ritsema, 1994; Ritsema y Dekker, 1994*).

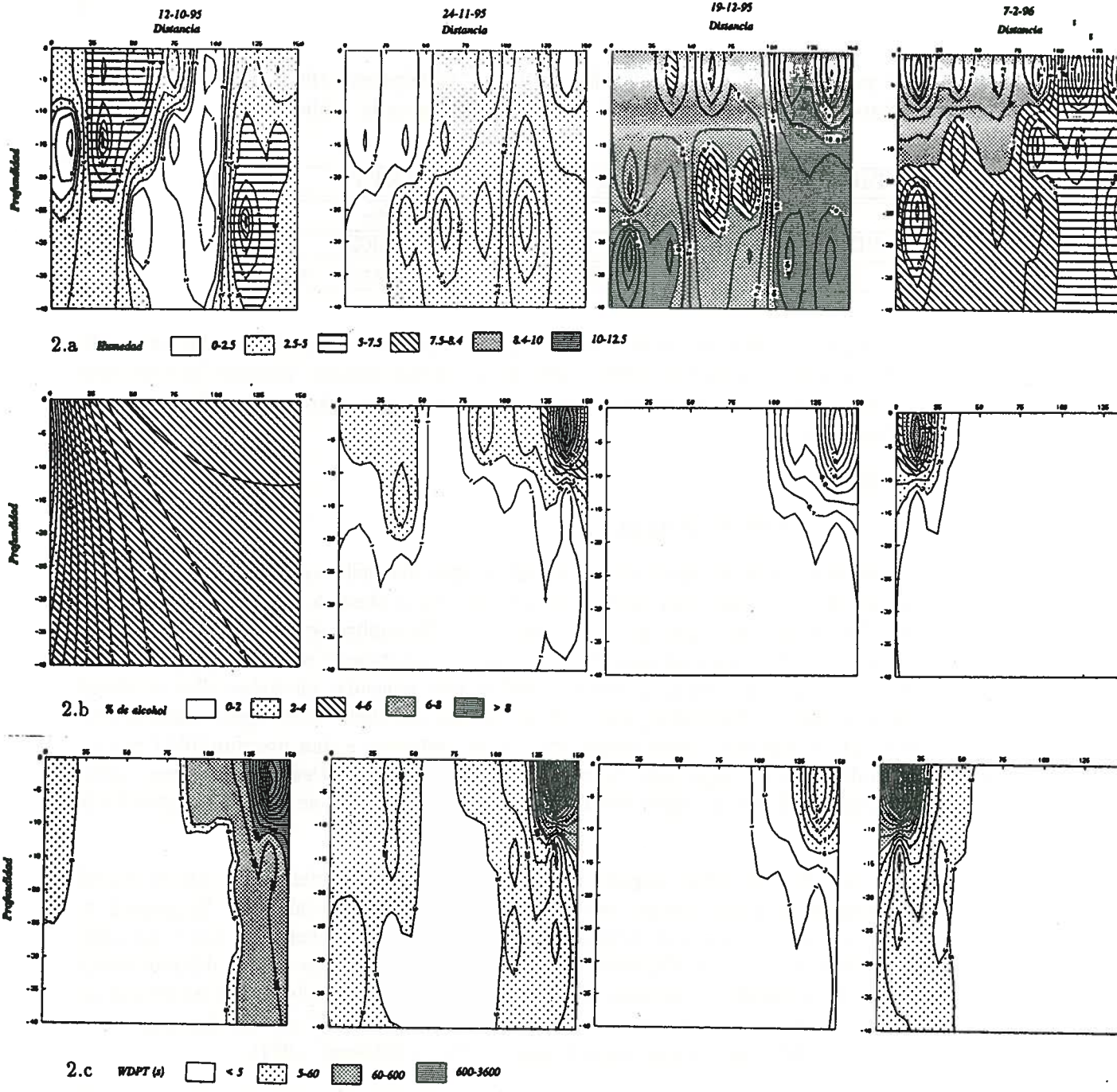


Fig 2. Distribución espacial, en todas las calicatas, del contenido de humedad volumétrica, % de alcohol y WDPT.

3.2. Distribución del agua en el suelo

En la tabla 2 se tiene la distribución del contenido de humedad volumétrica en relación con la profundidad, para todas las calicatas. En general existe una amplia variabilidad espacial en todas ellas. En los horizontes superiores se observan las mayores variaciones en el contenido de humedad (salvo el 12-10-95). El mínimo contenido de humedad volumétrica es de un 0.3%, en la capa de 15-23 cm del 12-10-95; el máximo es de un 12.8% en la capa de 1-8 cm el día 19-12-95. La desviación típica y el coeficiente de variación obtenidos son muy semejantes a los obtenidos por Ritsema y Dekker (1994) para un número mayor de muestras.

Tabla 2. Contenido de humedad volumétrica en todas las calicatas.					
12-10-95					
Profundidad (cm)	Min.	Max.	Media	Desv. típica	Coef. Variac.
1-8	0.64	8.46	4.82	2.62	54.35
15-23	0.30	8.20	3.36	3.12	92.85
30-37	0.36	8.19	3.21	2.90	90.34
24-11-95					
1-8	1.26	3.29	2.18	0.63	28.89
15-23	1.15	3.76	2.44	0.90	36.88
30-37	2.33	4.75	3.39	0.81	23.89
19-12-95					
1-8	8.14	12.81	10.19	1.57	15.40
15-23	8.23	10.26	8.80	1.23	13.97
30-37	8.55	10.96	10.09	1.13	11.19
7-2-96					
1-8	5.14	11.09	9.03	1.85	20.48
15-23	6.72	8.75	7.78	0.81	10.41
30-37	6.28	8.20	7.43	0.72	9.60

La figura 2.a muestra la distribución de la humedad volumétrica en cada una de las calicatas. Las diferencias de esta distribución entre calicatas están causadas por la variación en la historia de la infiltración- evaporación entre excavaciones, además de tenerse en cuenta las variaciones espaciales de la severidad de la repelencia al agua, ya que, la textura, cubierta del suelo, etc., no cambian mucho en la zona.

Se puede esperar que la distribución espacial de la humedad en el suelo dentro de una calicata esté determinada por la distribución espacial de la repelencia potencial al agua, al menos de forma parcial. En la figura 2.a se observa como la posición espacial de los dedos se determina en la capa superior, donde estos comienzan, y avanzan en sentido descendente. Por ello se asume una relación entre la localización de estos dedos y el grado de repelencia potencial al agua. Esto no ha sido comprobado, hasta ahora, debido a que las calicatas estudiadas se excavaron cuando el contenido de humedad volumétrica en el suelo era en muchos casos mayores del 5% (19-12-95 y 7-2-96), superando el contenido de humedad crítico del suelo (contenido de humedad para el cual el suelo pasa de ser repelente a no repelente), o a la poca variación del porcentaje de alcohol (12-10-95). Sólo en el caso de la calicata del 24-11-95, con unos menores contenidos de humedad en el perfil, se puede distinguir una cierta relación entre el contenido de humedad y la repelencia potencial al agua del suelo.

Cabe destacar la importancia del microrrelieve en la formación de los dedos. En las depresiones acumula el agua, permitiendo que se infiltre más fácilmente en estos puntos. En estas zonas, origen de dedos, se produce un lavado intenso de las sustancias que causan repelencia al agua, diferenciándose con las áreas adyacentes en cuanto a severidad de la repelencia y contenido de humedad. A su vez, el efecto de la histéresis tiende a ampliar este fenómeno.

4. Discusión

La repelencia al agua es un problema importante en muchos suelos, mostrando sus efectos más importantes en suelos relativamente secos. El agua y los solutos se infiltran por unas zonas de paso preferentes, dedos o lenguas, acortándose el tiempo de viaje e incrementando el riesgo de contaminación del agua subterránea. Las medidas de la repelencia, con las pruebas del WDPT y porcentaje de alcohol, son rápidas y precisas, con lo cual se obtiene información sobre la ocurrencia, profundidad, distribución, grado y persistencia del fenómeno, así como comparaciones entre

suelos. Los horizontes superficiales son los que muestran una mayor persistencia y grado de repelencia al agua. Al ser la repelencia una propiedad física dependiente del tiempo, las medidas estáticas de esta son poco adecuadas. Serán de mayor utilidad la comparación con situaciones anteriores y posteriores.

Ritsema et al. (1993) sugirieron que los dedos son alimentados por un flujo de distribución horizontal en la capa superficial, llamada capa de distribución, que en el caso de la zona estudiada tiene menos de 1 cm. Esto provoca una amplia variabilidad espacial en el contenido de humedad en superficie. Pero, de las calicatas realizadas, se puede deducir como incluso en horizontes más profundos se observan importantes variaciones. Probablemente, la distribución en profundidad del agua y solutos comienza en los primeros mm del suelo; el agua se dirige hacia las depresiones y/o lugares con menor repelencia.

Es importante conocer el fenómeno desde la perspectiva de una posible modelización. Cuando tiene lugar el flujo por dedos, un cierto volumen de suelo no participa en el transporte de agua y solutos, por lo que debe usarse un concepto del agua móvil/inmóvil. Un ejemplo de ello es el trabajo de *Van Dam et al. (1990)*. En él se considera una fracción inmóvil constante por profundidad, con el fin de ajustar los contenidos de agua y de concentraciones del soluto en el suelo con valores medidos. Las discrepancias surgen al asumir que las fracciones de suelo inmóviles son constantes en el tiempo.

5. Conclusiones

Los resultados experimentales encontrados hasta ahora, muestran que la repelencia al agua en el suelo estudiado es importante, sobre todo cerca de la superficie. La primera consecuencia clara de este fenómeno es que ello da lugar a una gran irregularidad en el desplazamiento del frente de humedecimiento, produciéndose un flujo en forma de dedos. Esto crea unas amplias franjas del perfil del suelo con un contenido de humedad muy inferior a las áreas adyacentes.

Hay una serie de aspectos que aún se están estudiando con el fin de aclarar la dinámica de este flujo en dedos. Por ello se precisa continuar la experimentación en campo, tomando más muestras de calicatas semejantes a las anteriores y en condiciones ambientales distintas en todas las estaciones del año. En un futuro se deberá analizar el contenido crítico de humedad en distintas muestras, realizar medidas de la repelencia actual (con la humedad que posea en el momento) y aclarar la dinámica temporal de los dedos. La comprensión de todo ello puede proveernos de una perspectiva esencial para, por medio de una modelización del fenómeno, predecir el transporte de solutos y agua al menos de forma aproximada.

6. Referencias

1. Adamson, A. W. 1967. *Physical chemistry of surfaces*, 2ª ed, Wiley-Interscience, Nueva York.
2. Almanza, C. 1984. *Fichas hídricas normalizadas y otros parámetros hidrometeorológicos*, tomo II, INM, Madrid.
3. Bisdom, E. B. A., L. W. Dekker y J. F. T. Schoute. 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure, *Geoderma*, 56, 105-118.
4. Bond R. D. y J. R. Harris. 1964. The influence of the microflora on physical properties of soils, I, Effects associated with filamentous algae and fungi, *Aust. J. Soil Res.*, 2, 111-122.
5. Coelho, C. de O.A., R. A. Shakesby, R. P. D. Walsh, A. J. D. Ferreira y J. P. Terry. 1990. Forest land use changes in Northern Portugal: Effects of soil erosion rates and soil water dynamics, en *Proc. Sem. Interaction between agricultural systems and soil conservation in the Mediterranean belt*, Essc. Oeiras 4-8, Sep.
6. Dekker, L. W. y C. J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil, 1,

- Potential and actual water repellency, *Water Resour. Res.*, 30, 2507-2517.
7. Hunter, R.J. 1986. *Foundations of colloid science, vol. 1*, Oxford Univ. Press, Oxford.
 8. Jungerius, P. D. y L. W. Dekker. 1990. Water erosion in the dunes, in *Dunes of the European Coasts*, Catena Suppl., vol. 18, pp. 185-193, Catena, Lawrence, Kans.
 9. King, P. M. 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellency of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement, *Aust. J. Soil Res.*, 19, 275-285.
 10. Krammes, J. S. y L. F. DeBano. 1965. Soil wettability: A neglected factor in watershed management, *Water Resour. Res.*, 1, 283-286.
 11. Letey, J., J. F. Osborn y N. Valoras. 1975. Soil water repellency and the use of nonionics surfactants, *Contrib. 154*, 85 pp., Calif. Water Resour. Center, Davis.
 12. Ma'shum, M., M. E. Tate, G. P. Jones y J. M. Oades. 1988. Extraction and characterization of water-repellent materials from Australian soils, *J. Soil Sci.*, 39, 99-109.
 13. McGuie, D. A. 1987. Non-wetting soils in western Australia, *N. Z. Turf Manage. J.*, 2, 13-16.
 14. Richardson, J. L. 1984. Field observation and measurement of water repellency for soil surveyors, *Soil Surv. Horiz.*, 25, 32-36.
 15. Ritsema, C. J. y L. W. Dekker. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil, 2, Dynamics of fingered flow, *Water Resour. Res.*, 30, 2519-2531.
 16. Ritsema, C. J., L. W. Dekker, J. M. H. Hendrickx y W. Hamminga. 1993. Preferential flow mechanism in a water repellent sandy soil, *Water Resour. Res.*, 29, 2183-2193.
 17. Roberts, F. J. y B. A. Carbon. 1972. Water repellency in sandy soils of South-Western Australia, II, Some chemical characteristics of the hydrophobic skins, *Aust. J. Soil Res.*, 10, 35-42.
 18. Van Dam, J. C., J. M. H. Hendrickx, H. C. van Ommen, M. H. Bammink, M. T. van Genuchten y L. W. Dekker. 1990. Water and solute movement in a coarse-textured water repellent field soil, *J. Hydrol.*, 120, 359-379.

Modificaciones texturales en el riego por surcos debidas a la erosión

Fernández-Gómez, R. (P) (1); Giráldez, J.V. (2,3); Mateos, L. (1)

1. Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Córdoba.

2. Dpto. de Suelos y Riegos, CIDA, Córdoba.

3. Dpto. de Agronomía, ETSIAM, Univ. Córdoba.

Resumen

El desplazamiento selectivo de las partículas más finas del suelo en el proceso de erosión durante el riego por surcos, y su posterior depósito aguas abajo, produce una modificación en la distribución del tamaño de partículas, cuyas consecuencias sobre las propiedades físicas serán apreciables a medio plazo.

Se describen los ensayos de erosión realizados en un sistema de riego por surcos, con parcelas de 200 m de longitud, caudales de 1.8, 1.2 y 0.8 Ls^{-1} bajo unas pendientes del 0.8 % y 0.3 %, en un suelo aluvial de textura franca. La composición textural, que se analiza desde una perspectiva clásica y otra deducida de la teoría fractal, con el fin de disponer de una representación simplificada, muestra la tendencia observada.

Abstract

Selective sorting of fine particles by erosion processes in furrow irrigation modifies textural distribution of the soil. Soils are coarser at the furrowhead and finer at the end of the field. Consequently soil physical properties change. In this report, results of an erosion trial are presented. Particle size distribution is analyzed under different perspectives to get a significant parameter. A fractal theory and the derived entropy dimension have been selected.

1. Introducción

La erosión del suelo es una de las causas que más contribuye a su deterioro especialmente en zonas poco industrializadas en las que la contaminación es menor. Se suele asociar la erosión a terrenos en pendiente en los que el aumento de la energía cinética del flujo de escorrentía aumenta su capacidad erosiva, de arranque y transporte de partículas. Sin embargo, se producen importantes pérdidas de suelo por erosión incluso en sistemas agronómicos como el riego por superficie en los que la pendiente es escasa (*e.g. Lu y col., 1987*).

Entre los procesos de la erosión se debe incluir el arranque, transporte y depósito selectivo del material. Ante iguales condiciones de flujo, las partículas finas son transportadas con mayor facilidad, lo que redundará en una modificación de la distribución de tamaños tanto en las zonas donde prevalezca el arranque como en las que predomine el depósito del material. El tamaño del sedimento transportado depende de la hidráulica del flujo, del tipo de suelo y del tiempo desde que comienza el evento. Algunos sedimentólogos como *Middleton (1976)* y *Sagoe y Visher (1977)* han aplicado conceptos de la Hidráulica para explicar la variación de la distribución del tamaño de granos observados en la naturaleza, reconociendo la relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas y la del fluido como un criterio para explicar las diferentes distribuciones. *Sengupta (1977)* demostró cómo al variar la velocidad de la corriente varía la granulometría de la fracción de partículas suspendidas no solo en la moda sino en la forma de la distribución. A mayor velocidad aumenta el valor modal, haciéndose ésta más simétrica.

La variación temporal en la distribución de tamaños se debe, entre otras causas, al desarrollo de una capa límite acorazada, bien por eliminación de las partículas más finas o por depósito de las más gruesas (e.g. *Proffitt y Rose, 1991*). La variación espacial genera una graduación u ordenamiento progresivo del material, análogo al que *Deigaard y Fredsøe (1978)* describen en corrientes fluviales.

La modificación de la distribución del tamaño de partículas altera las propiedades del suelo que queda en el lecho de los surcos de riego. En los comienzos de la Edafología, la física del suelo se reducía prácticamente al análisis de la distribución textural. Además de establecer un método de determinación, se propusieron clasificaciones basadas en una diferente separación de las partículas en tres fracciones: arcilla, para las fracciones inferiores o iguales a $2 \mu m$, limo para las partículas cuyo tamaño está comprendido entre 2 y $50 \mu m$ en el mismo sistema del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA, o 2 y $20 \mu m$ en el Sistema Internacional, y el resto, hasta $2 mm$, arena (e.g. *Soil Survey Staff, 1975, Ap. I*). La clasificación textural da una idea de las propiedades físicas y químicas del suelo, pero, como reconoce entre otros *Rowell (1994, § 2.3)*, la forma de las partículas y las características superficiales influyen bastante más sobre esas propiedades. No obstante existen numerosas relaciones que permiten predecir algunas características físicas del suelo a partir de la distribución del tamaño de las partículas (e.g. *Rawls y col., 1983*).

2. Representación de la distribución del tamaño de partículas de un suelo

La meteorización de las rocas que da lugar al suelo consiste, entre otros procesos, en una fragmentación mecánica. Consecuentemente, al analizar la distribución del tamaño de las partículas, se aplicó la función de distribución logarítmico normal que, como diversos autores, entre los que cabe mencionar a *Turcotte (1992, Cap. 3)*, han señalado, está relacionada con los análisis del proceso de rotura.

Aunque el uso de la distribución lognormal es bastante frecuente en Edafología, *Shirazi y Boersma (1984)* le dieron carta de naturaleza al sugerir un análisis cuantitativo unificado de la clasificación textural de un suelo. Suponiendo que las partículas del suelo se distribuyen lognormalmente y asignando un diámetro medio a los tres grupos principales de partículas, $1 \mu m$ para la arcilla, $26 \mu m$ para el limo y $1.03 mm$ para la arena, en el esquema del USDA, calculaban para cada punto del diagrama textural triangular el diámetro medio y su desviación típica. Ello les permitió transformar el triángulo en otra figura de contorno curvado en un sistema cartesiano con los tamaños medios como abscisa y las desviaciones típicas como ordenadas. Posteriormente *Shirazi y col. (1988)* modificaron el método mejorando la aproximación grosera del diámetro tipo de las tres fracciones, por un método más complejo basado en la asignación de las diferentes masas acumuladas en la distribución lognormal a las cantidades de cada una de las fracciones para cada punto de contorno del diagrama textural triangular. Al propio tiempo delimitaban unos tamaños extremos para las fracciones de arcilla, recalculando los diámetros medios y sus desviaciones típicas como sumas de los respectivos momentos, de primer y segundo orden, para refinar su diagrama curvilíneo. Como apoyo de su esquema representaban unas isoclasas del potencial matricial del agua en el suelo correspondiente al 0.75 de la humedad de saturación para el que *Campbell* había encontrado una buena correlación con los parámetros texturales, diámetro medio y desviación típica. Sin embargo hay mucho artificio en su propuesta, además de una notable incorrección en su exposición. *Buchan (1989)* revisando la propuesta, destacó la importancia de las colas de la función de densidad de la distribución normal o lognormal, en el extremo superior y en el inferior. Atendiendo a la tolerancia de la parte de masa de partículas en ambas colas, este autor definió unas regiones en el triángulo de clasificación textural en las que es razonable obtener un ajuste

lognormal, si bien no es condición suficiente.

Una aproximación diferente es la iniciada por *Taguas (1995)* desde la perspectiva fractal. Un fractal es un objeto geométrico que se reproduce de forma semejante, bajo diferentes funciones, de tal modo que se puede definir como una forma confeccionada con partes semejantes a un todo (*Mandelbrot, citado por Feder, 1988, § 2.3*). Aplicando un sistema de funciones iteradas (*e.g. Guzman y col., 1993, Cap. 5*), *Taguas* generó un conjunto de partículas encuadradas en los límites que determina el método de análisis textural en el laboratorio, expresado como $\{\mathcal{R}^n; \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3; p_1, p_2, p_3\}$, siendo \mathcal{R}^n el espacio real, las funciones $\varphi_i = a_{i-1} + r_i(x) = a_{i-1} + (a_i - a_{i-1})x/a_3$, ($i = 1, 2, 3$), con a_i como los límites de tamaños, p_i las probabilidades asignadas *a priori* a cada función, φ_i , y $r_i = (a_i - a_{i-1})/a_3$ como las relaciones entre diámetros.

Con el algoritmo propuesto por este autor, a partir de un valor semilla, una partícula de tamaño igual al del límite superior, a_3 , se van generando sucesivas partículas aplicando las funciones φ_i que correspondan al valor de la probabilidad acumulada, cuando esta coincide con el valor obtenido por un generador de números aleatorios (*e.g. Taguas, 1995, Cap. 5*). Un conteo final permite establecer la masa de partículas asociada con cada tamaño.

Además de poder establecer los correspondientes momentos de la distribución, estos autores proponen una *dimensión de información* o *entropía* asociada a la partición del conjunto total, D_E ,

$$D_E = \frac{\sum_i p_i \log p_i}{\sum_i p_i \log r_i} \quad (1)$$

que, aplicado a la caracterización de las muestras de suelo del manual de clasificación de suelos (*Soil Survey Staff, 1975, Ap. IV*), permitió a *Taguas* separar en el triángulo textural los individuos con mayor, suelos arenosos, o menor, suelos arcillosos, valor del parámetro D_E .

Así pues la representación lognormal y la aplicación de sistemas de funciones iteradas ofrecen posibilidades para caracterizar la distribución de tamaño de partículas de un suelo. Ambos métodos serán aplicados al estudio de las modificaciones originadas por la erosión debida al riego en los surcos.

3. Material y métodos

Durante el verano de 1995 se efectuaron 3 riegos por surcos en dos parcelas situadas en la Finca Alameda del Obispo, Córdoba, de 200 m de longitud explanadas al 0.8 % y al 0.3 % respectivamente. Los surcos se realizaron a 0.75 m de distancia y se dispusieron 3 tratamientos de caudal en la parcela del 0.8 % y uno en la del 0.3 %. En cada uno de ellos se regaron 5 surcos, realizando control en los tres centrales, siendo los dos exteriores surcos de borde. Los caudales de entrada fueron los siguientes:

- 1.8 Ls^{-1} , 1.2 Ls^{-1} y 0.8 Ls^{-1} en la parcela del 0.8 %
- 1.8 Ls^{-1} en la parcela del 0.3 %

Después de cada uno de los tres riegos se tomaron muestras del suelo existente en el lecho de los tres surcos control de los distintos tratamientos, en cuatro localizaciones a lo largo de la parcela, a 50, 100, 150 y 200 m desde cabecera. Las muestras fueron tomadas del lecho de los surcos empleando para ello una espátula, de manera que en ningún caso se profundizara por debajo de la *capa activa* o capa de suelo susceptible de ser erosionada (*e.g. Fernández-Gómez y col., 1995*). En cada localización se tomaron 10 submuestras en los límites de un metro aguas arriba y aguas abajo del punto exacto con el

objeto de que la muestra final fuera lo más representativa posible. La determinación textural de cada una de las 144 muestras recogidas se realizó en laboratorio siguiendo el método del hidrómetro (e.g. *Gee y Bauder, 1986*), obteniendo con ello los porcentajes correspondientes a las fracciones arena, limo y arcilla.

Con objeto de tener caracterizado el suelo original de las parcelas y a efectos de poder realizar comparaciones con los datos obtenidos de los surcos tras los riegos, se procedió a la toma de muestras de éste en las mismas localizaciones, previamente a la campaña de riegos, con muestras tomadas hasta una profundidad aproximada de 15 cm. Posteriormente se determinó la textura siguiendo la misma metodología que en los casos anteriores.

4. Resultados y discusión.

4.1. Variación textural a lo largo de los surcos.

Los datos de textura por surco han sido reducidos a textura por cada tratamiento, efectuando la media aritmética de los porcentajes obtenidos en laboratorio para cada grupo de tres surcos control. De esta manera tendremos un dato de textura por cada tratamiento, localización y riego, (Figuras 1 a 4) además de los correspondientes al suelo original (Figura 5).

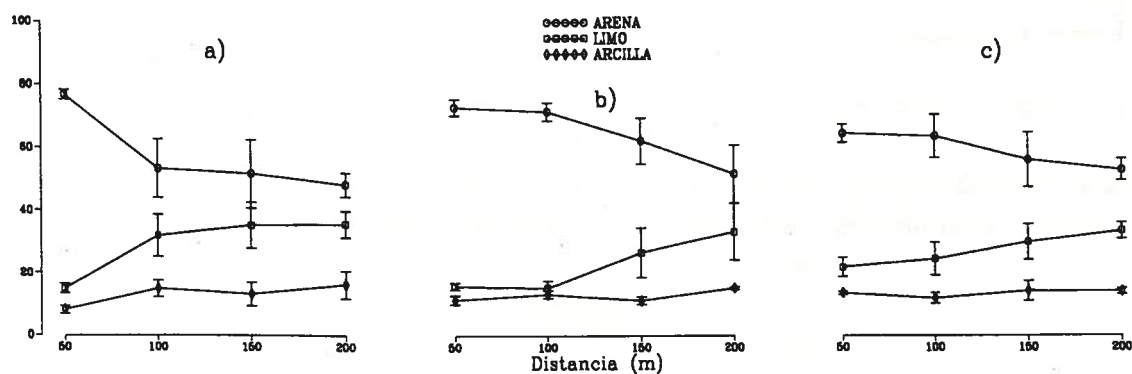


Figura 1. Texturas del lecho del surco para el tratamiento de caudal 1.8 Ls⁻¹ y pendiente del 0.8 % obtenidas tras: a) primer riego, b) segundo riego, c) tercer riego. (Barras de error: desviación típica)

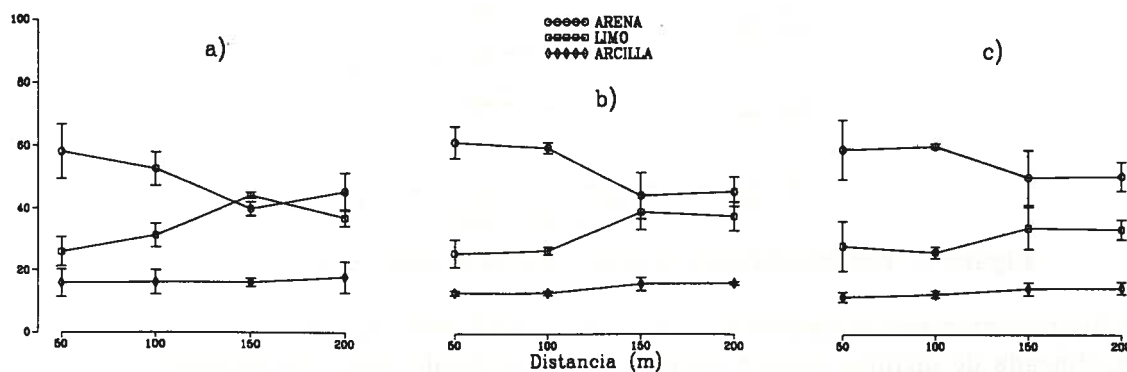


Figura 2. Texturas del lecho del surco para el tratamiento de caudal 1.2 Ls⁻¹ y pendiente del 0.8 % obtenidas tras: a) primer riego, b) segundo riego, c) tercer riego. (Barras de error: desviación típica)

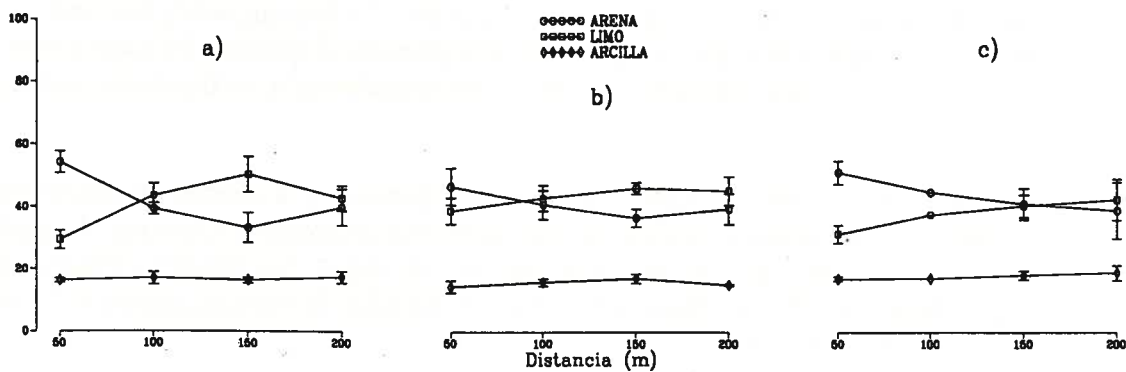


Figura 3. Texturas del lecho del surco para el tratamiento de caudal $0.8 Ls^{-1}$ y pendiente del 0.8 % obtenidas tras: a) primer riego, b)segundo riego, c)tercer riego. (Barras de error: desviación típica)

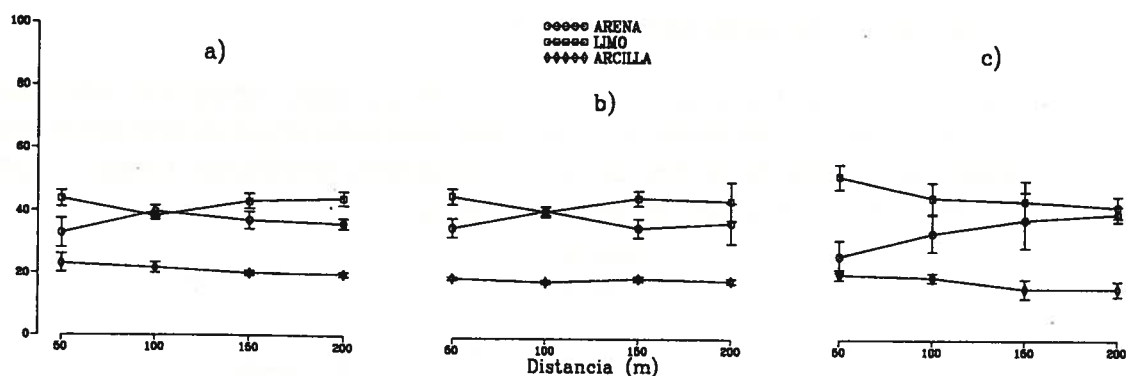


Figura 4. Texturas del lecho del surco para el tratamiento de caudal $1.2 Ls^{-1}$ y pendiente del 0.3 % obtenidas tras: a) primer riego, b)segundo riego, c)tercer riego. (Barras de error: desviación típica)

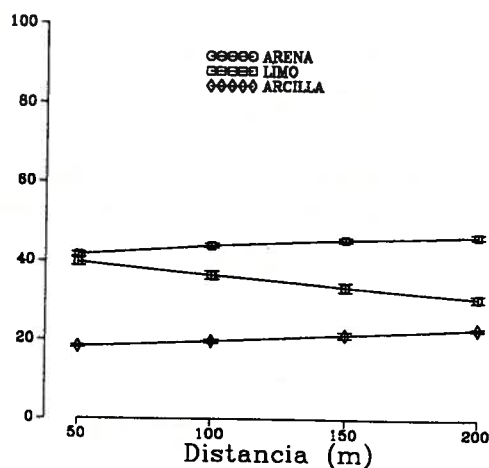


Figura 5. Texturas del suelo original. (Barras de error: desviación típica)

De las figuras anteriores se desprende que la textura del lecho de los surcos tras sucesivos riegos va a ser modificada de distinta manera según el caudal aplicado, como consecuencia de su diferente poder erosivo. En efecto, caudales mayores provocan una mayor diferencia entre la fracción fina y la fracción gruesa con respecto a los valores encontrados en el suelo. El porcentaje medio de arena de la capa activa tomadas después de los tres riegos bajó de 59.2 a 55.4 y a 44.2 en los tratamientos de 1.8, 1.2 y $0.8 Ls^{-1}$ respectivamente, mientras que en el suelo original el porcentaje era del 35.0.

La graduación producida a lo largo del surco en el material tras el primer riego se suaviza con los siguientes riegos. Así tras el tercer riego tanto el material fino como el grueso han sufrido un ordenamiento gradual a lo largo del surco. Gran importancia tiene en este proceso el efecto del acorazamiento de la superficie del lecho, como consecuencia de la exposición al flujo de partículas poco susceptibles a la erosión, que se produce normalmente desde cabeza hasta cola y con mayor rapidez con flujos más erosivos.

En cuanto al efecto de la pendiente en el movimiento tanto de la carga de fondo como de la suspendida, con el mismo caudal de entrada, 1.8 Ls^{-1} , las subparcelas con 0.8 % y 0.3 % presentan distintos patrones de graduación textural. En el segundo caso prácticamente no se ha producido movimiento de la carga de fondo y la diferencia entre los valores obtenidos y los del suelo, muy pequeña, no se debe a transporte del material fino aguas abajo (ya que no se observa un incremento con la distancia) sino a una exposición de estas partículas más pequeñas tras haberse movilizad la capa activa. Posteriormente las partículas más expuestas serían las recogidas en el muestreo.

La Figura 5 nos muestra cómo el suelo original presenta un ordenamiento o graduación de las fracciones arena, limo y arcilla con la distancia a lo largo del campo de ensayos. Incluso con pendientes tan reducidas como las que suelen encontrarse en estas parcelas, la práctica tradicional del riego puede generar una diferencia textural acusada entre cabecera y cola, como en efecto se está produciendo en la nuestra, en la que los contenidos de arena y limo difieren en torno a 10 puntos en solo 150 m de distancia.

4.1. Distribución del tamaño de partículas.

A cada uno de los datos de textura de las 144 muestras recogidas se les calculó la entropía o dimensión de información aplicando la expresión 1. La partición realizada al conjunto de tamaños 0-2 mm fué la correspondiente a los límites USDA, 0-2 μ para la arcilla, 2-50 μ para el limo y el resto para la arena. Los valores obtenidos, en función del contenido en arena, limo y arcilla que presenta cada muestra se exponen en la Figura 6.

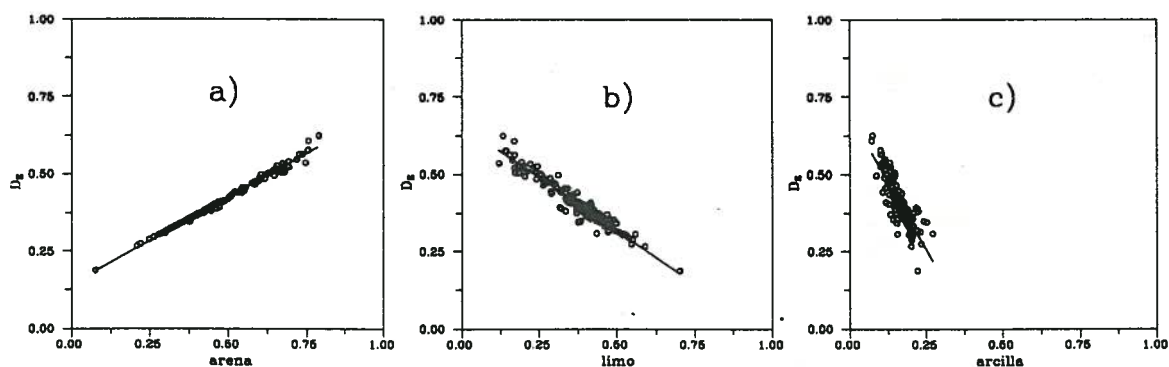


Figura 6. Entropía (D_E) en función del contenido de a) arena, b) limo, c) arcilla.

Como se puede observar, existen tendencias claras entre los porcentajes de las distintas fracciones y la entropía calculada. A medida que aumenta el contenido de arena la entropía o *grado de desorden* de la matriz del suelo aumenta. Por contra, un incremento en los contenidos de limo y arcilla hacen que el valor de D_E disminuya.

El elevado grado de correlación obtenido en los ajustes lineales, 0.99 para la arena, 0.93 para el limo y 0.77 para la arcilla, hace que D_E pueda ser utilizado como índice para definir la textura de un suelo. De forma intuitiva puede asemejarse este índice a un punto cualquiera en el triángulo de textura. El problema que presenta su utilización a efectos de identificación de la textura de un suelo es la no homogeneidad en el empleo de la partición, con lo que valores de D_E no pueden ser comparables si no están calculados con la misma partición. En cualquier caso, las tendencias obtenidas por *Taguas (1995)* se corresponden con las que presentamos en la Figura 6, aunque en su trabajo divide la fracción arena en cinco subfracciones y la fracción limo en otras dos.

Por último, y a efectos de establecer una primera aproximación de la distribución del tamaño de partícula a distintas funciones de ajuste, hemos seleccionado 4 muestras de textura, una por cada uno de los tratamientos de caudal, pero de manera aleatoria entre riegos y surcos de control. A los datos obtenidos en laboratorio hemos ajustado funciones de distribución lognormal, tanto de 2 como de 3 parámetros, una función de distribución tipo Weibull (*e.g. Turcotte, 1992, Cap. 3*) y la curva de distribución de tamaño de partícula obtenida empleando el algoritmo basado en teoría fractal propuesto por *Taguas (1995)*. Los resultados se exponen en la Figura 7. Como se aprecia, el mejor ajuste corresponde a la distribución lognormal, sin que la inclusión de un tercer parámetro mejore los resultados obtenidos con la de dos parámetros.

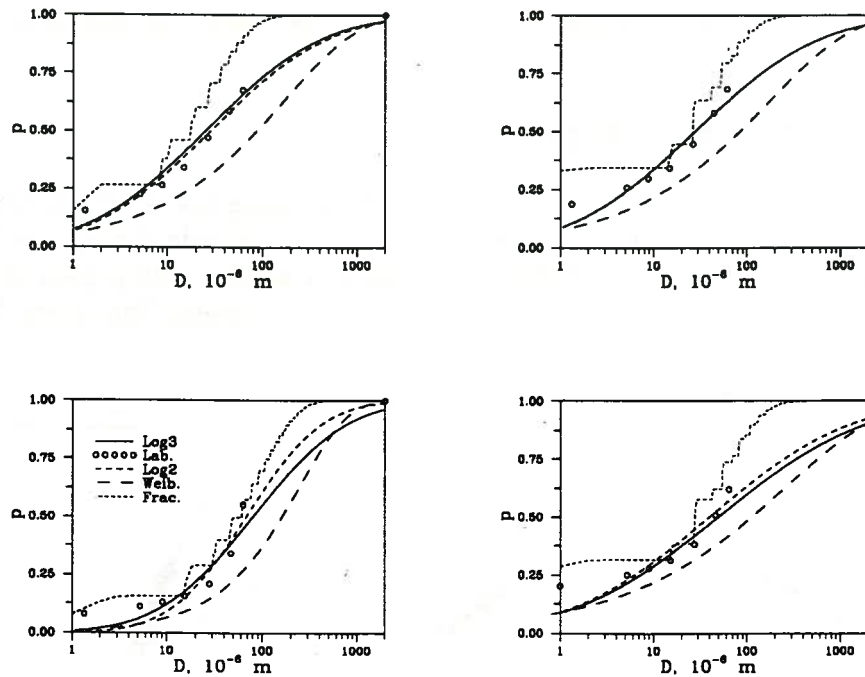


Figura 7. Ajustes de las funciones de distribución lognormal de 2 y 3 parámetros, Weibull y aproximación fractal a los datos de textura obtenidos en laboratorio.

7. Conclusiones.

El efecto continuado de riegos por superficie con altos índices erosivos genera un ordenamiento del tamaño de partícula a lo largo de la parcela que puede acarrear con el tiempo una diferencia textural acusada, con posibles efectos en la infiltración de agua, fijación de nutrientes, creación de estructura en el suelo, etc. El caudal aplicado, la pendiente y el número de riegos que se efectúe, son factores

determinantes en el desarrollo del gradiente textural que se irá generando con la práctica habitual de riego por superficie.

La *dimensión de información* o *entropía* puede constituir un buen indicador de la textura de un suelo, si bien no es homogéneo en la partición del intervalo de tamaños que se considere.

A pesar de los inconvenientes de la distribución lognormal para ajustar la distribución de tamaño de partícula, ya reseñados por Buchan (1989) entre otros, esta función es la que mejor se ajusta a los datos presentados.

6. Referencias.

Buchan, G.D., 1989. *Applicability of the simple lognormal model to particle size distribution in soils*. Soil Sci., 147: 155-161.

Deigaard, R. y J. Fredsøe, 1978. *Longitudinal grain sorting by current in alluvial streams*. Nordic Hydrology, 9, 7-16.

Feder, J., 1988. *Fractals*. Ed. Plenum, Nueva York.

Fernández-Gómez, R., L. Mateos y J.V. Giráldez, 1995. *Procesos de erosión del suelo en el riego por surcos*. XIII Jornadas Técnicas sobre Riegos. AERYD, Puerto de la Cruz, Tenerife, España.

Gee, G.W. y J.W. Bauder, 1986. *Particle size analysis*. En *Methods of Soil Analysis, Part I*. Ed. A. Klute, USA.

Guzmán, M., M.A. Martín, M. Morán y M. Reyes, 1993. *Estructuras fractales y sus aplicaciones*. Ed. Labor, Barcelona.

Lu, J.Y., G.R. Foster y R.E. Smith, 1987. *Numerical simulation of dynamic erosion in a ridge-furrow system*. Trans. ASAE, 30 (4), 969-976.

Middleton, G.V., 1976. *Hydraulic interpretation of sand size distributions*. J. Geol., 84: 405-426.

Proffitt, A.P.B. y C.W. Rose, 1991. *Soil erosion processes. II. Settling velocity characteristics of eroded sediment*. Aust. J. Soil Res., 29, 685-695.

Rawls, W.J., D.L. Brakensiek y B. Soni, 1983. *Agricultural management effects on soil water processes*. Trans. ASAE, 26: 1747-1757.

Rowell, D.L., 1994. *Soil Science: methods and applications*. Longman, Londres.

Sagoe, K.M. y G.S. Visser, 1977. *Population breaks in grain size distributions of sand. A theoretical model*. J. Sedim. Petrol., 47: 285-310.

Sengupta, S., 1977. *Size-sorting during suspension. Transportation, lognormality and other characteristics*. Sedimentology, 22: 257-273.

Shirazi, M.A. y L. Boersma, 1984. *A unifying quantitative analysis of soil texture*. Soil Sci. Soc. Am. J., 48: 142-147.

Shirazi, M.A., L. Boersma y J.W. Hart, 1988. *A unifying quantitative analysis of soil texture: an improvement of precision and extension of scale*. Soil Sci. Soc. Am. J., 52: 181-190.

Soil Survey Staff, 1975. *Soil Taxonomy*. USDA Agr. Hbk. 436, Washington.

Taguas, F.J., 1995. *Modelización fractal de la distribución del tamaño de las partículas en el suelo*. Tesis Doctoral, Dpto. de Matemática Aplicada a la Ingeniería Agronómica, Univ. Politécnica de Madrid.

Turcotte, D.L., 1992. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press.

PRESENTACIÓN EN CARTEL

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA EN ZONAS SOMETIDAS A HIDROMORFÍA TEMPORAL

por

González García, M.A.¹, Dafonte Dafonte J.¹, Paz González A.²

RESUMEN:

Se analizó la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada de los 40 cm. más superficiales en una parcela con una parte dedicada a cultivo y otra a monte.

Se percibió una mayor variabilidad en las medidas de la parte de monte que en la de cultivo. Así mismo los mayores valores se observaron en la zona intermedia, que incluye el borde.

También se realizó el cálculo del semivariograma experimental del logaritmo de la conductividad hidráulica por adaptarse mejor a una distribución normal que los valores directos. Posteriormente se ajustó un semivariograma teórico de tipo esférico comprobándose la existencia de una estructura espacial de la variable.

SUMMARY:

The spatial variability of saturated hydraulic conductivity values was studied in 0-40 cm depth, in a plot with two dedications: crop and forestry.

It was observed more variability on the measures obtained in forestry soil than crop soil. The higher values were observed in the edge area.

It was obtained experimental semivariogram of $\log K_{sat}$ that it is better fitted to normal distribution. This values was fitted to a theoretical semivariogram of spherical model and it was proved the existance of a spatial structure of the variable.

INTRODUCCIÓN

Una característica del paisaje agrario gallego es su fragmentación en pequeñas parcelas, lo que conlleva a que parte del espacio esté sometido al denominado efecto de borde, lo cual confiere unas propiedades diferenciadas (Chen et al., 1993).

Algunos procesos hidrológicos fundamentales como infiltración y escorrentía van a tener como factor fundamental la conductividad hidráulica saturada. Su conocimiento y correcta estimación será fundamental de cara a la cuantificación de escorrentía y erosión, e indispensable a la hora de diseñar sistemas de drenaje. Sin embargo los diferentes tratamientos del suelo van a influir grandemente en su magnitud, lo que unido a la existencia del efecto de borde, se traduce en una incertidumbre a la hora de estimar y cuantificar los procesos antes citados. Por ello el conocimiento de la variabilidad espacial de las propiedades hídricas de estos suelos, permite relacionar esas posibles variaciones hidrológicas con el manejo.

El estudio de esta variación espacial puede acometerse mediante el uso de técnicas geoestadísticas que nos permiten determinar si, a una escala dada, una variable presenta una estructura espacial o si se tratan de variaciones erráticas y totalmente aleatorias. En caso de que esta estructura espacial exista, se puede elaborar un modelo de dependencia espacial, y cartografiar por krigeado distintas unidades en el área estudiada.

En el presente trabajo se pretende realizar la aplicación de algunas técnicas

¹ E.P.S. de Lugo. Universidade de Santiago de Compostela

² Facultade de Ciencias. Universidade de A Coruña.

geoestadísticas al estudio de la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada en zonas límite agrícola-forestales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizaron 40 medidas de conductividad hidráulica saturada mediante el método de auger-hole (Kessler, 1975), en una zona límite agrícola forestal en la granja Gaioso Castro perteneciente a la excma. Diputación Provincial de Lugo, situada en el municipio de Castro de Ribeiros do Lea perteneciente a la comarca de Terra Cha (Lugo). La situación de los puntos de medida viene indicada en la figura 1.

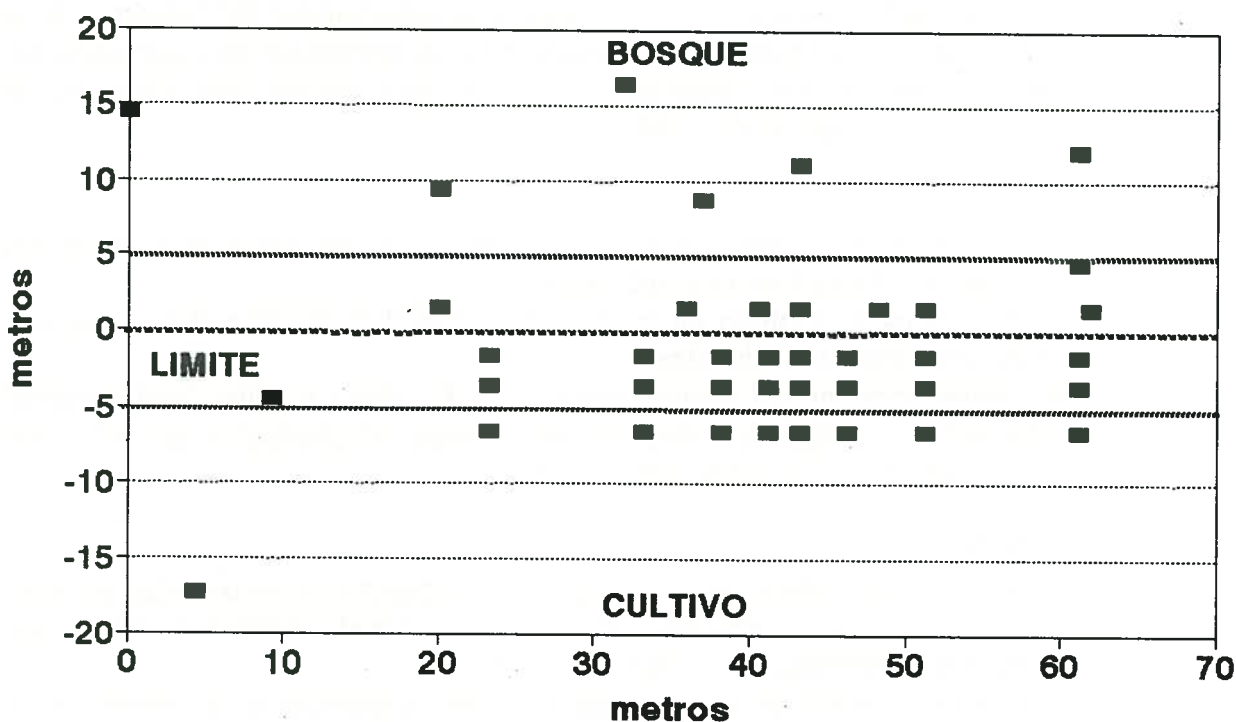


Figura 1. Situación de los puntos de medida

Las medidas fueron tomadas en el horizonte superficial, siendo la conductividad hidráulica obtenida la media de los 40 cm. mas superficiales. Cada prueba se repitió 3 veces y el valor final se obtuvo tomando la media de todas. Las medidas se realizaron en los dos últimos meses de 1995, aprovechando la subida de nivel freático que se produjo por causa de la intensas lluvias caídas las semanas anteriores. La vegetación presente en el bosque es de *Pinus radiata* y algunos ejemplares de *Betula celtiberica*. La especie arbustiva mas frecuente es el tojo (*Ulex sp.*).

Como bien significa su nombre, esta comarca se caracteriza por tener un relieve francamente llano y la presencia a muy poca profundidad de un manto arcilloso que la hace muy susceptible a sufrir hidromorfia temporal e inundaciones frecuentes (Castelao, 1992).

Para estudiar la dependencia espacial se utilizaron técnicas geoestadísticas. Así se elaboraron semivariogramas experimentales con ayuda del programa GEO-EAS (Englund y Sparks, 1991), y posteriormente se procedió al ajuste de los modelos teóricos.

El valor del semivariograma experimental se calculó mediante la expresión siguiente:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i+h) - z(x_i)]^2$$

donde:

$\gamma^*(h)$ es el valor experimental de la semivarianza a distancia h .

$N(h)$ es el número de pares de puntos muestrales separados por la distancia h .

$z(x_i)$ es el valor de la conductividad hidráulica saturada en el punto muestral x_i .

$z(x_i+h)$ es el valor de la conductividad hidráulica saturada en el punto muestral x_i+h .

Existen varios modelos de semivariogramas teóricos cuya adaptación al semivariograma muestral nos va a dar información sobre la existencia de estructura espacial de la variable a estudiar. Así, el denominado efecto pepita puro consistente en una línea recta que muestra que la semivarianza permanece constante con la distancia, indica la ausencia de correlación espacial, es decir no existe dependencia espacial entre los valores. Este efecto suele usarse como parte de otros modelos de semivariograma.

Algunos de los modelos más frecuentemente usados en hidrología son el esférico, el gaussiano y el exponencial. Una de las características del exponencial es que el valor al que se estabiliza la varianza es asintótico, y en el origen, la pendiente del semivariograma no es nula. El modelo gaussiano se caracteriza por estabilizarse asintóticamente la semivarianza y por tener pendiente en el origen nula. En el modelo esférico la pendiente en el origen no es nula y la semivarianza se estabiliza en un valor dado no asintótico.

Existen otros modelos que responden a otros tipos de funciones matemáticas también usados en hidrología de suelos (Vieira et al. 1981), pero que no van a ser considerados en este trabajo.

El modelo más usado en hidrología es el esférico que responde a la expresión:

$$\gamma(h) = \begin{cases} S_0 + \frac{S}{2} \left[3\left(\frac{h}{a}\right) - \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] & \text{para } h \leq a \\ S_0 + S & \text{para } h > a \\ 0 & \text{para } h = 0 \end{cases}$$

donde:

S es el valor al que se estabiliza la semivarianza, también denominado meseta.

a es el valor de h donde se alcanza S , también llamado alcance o rango.

S_0 es el efecto pepita.

El ajuste del semivariograma teórico se suele realizar visualmente puesto que otro tipo de ajustes como puede ser el de mínimos cuadrados no son recomendables pues no permiten dar más peso a los valores experimentales calculados con mayor número de pares de puntos muestrales.

Los métodos geoestadísticos son de óptimo uso cuando la variable a estudiar sigue una distribución normal. En caso de que la distribución difiera de la normalidad se puede realizar una transformación de la variable, como puede ser la logarítmica, que es una de las más utilizadas en hidrología. Además, para posteriores usos es poco complicado deshacer la transformación. Muchas veces el trabajar con la variable transformada hace más simple y clara la obtención de los parámetros del semivariograma.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron por separado los datos de cultivo, los de monte y los de la zona límite tomando esta como una franja de 5 m. a lo largo de la alambrada de separación de las dos zonas (figura 1). Los parámetros estadísticos de cada población y del total expresados en la tabla 1 muestran que en la zona límite la media de conductividad hidráulica es algo superior al resto, incluyendo el total. Así mismo, el coeficiente de variación más bajo de todos es el del cultivo. El coeficiente de variación de la zona límite es intermedio, y el de la zona de bosque es el más alto de todos. El efecto homogeneizador del cultivo explica la menor variación de la conductividad hidráulica como se tiene comprobado que ocurre con el contenido hídrico (González, 1995).

El valor mínimo está en la zona de cultivo mientras que el valor máximo se da en la zona de bosque, que coincide con la zona límite, poniendo de manifiesto que una menor alteración del suelo implica una conductividad hidráulica más alta. Así mismo, el hecho de que el valor medio en la zona límite no sea intermedio entre el de cultivo y bosque puede indicar que en la parte de cultivo de la zona límite el valor de conductividad es mayor que el del resto de la zona cultivada dado que las condiciones de manejo del suelo son algo menos intensas por la proximidad del límite.

	Media	D. stan.	C. var.	Máximo	Mínimo
Total	18,46	12,38	0,67	63,13	3,20
Bosque	21,85	17,75	0,81	63,13	6,13
Cultivo	17,01	9,26	0,54	32,70	3,20
Límite	22,30	13,83	0,62	63,13	8,50

Tabla 1. Parámetros estadísticos de los valores muestrales de conductividad hidráulica saturada (cm/hora).

El análisis geoestadístico se llevó a cabo considerando los logaritmos de la variable, por adaptarse esta transformación mejor que la propia variable a una distribución normal, como se ve en la figura 2 donde la curva de frecuencias en papel normal muestra casi una recta en el caso de la transformación logarítmica.

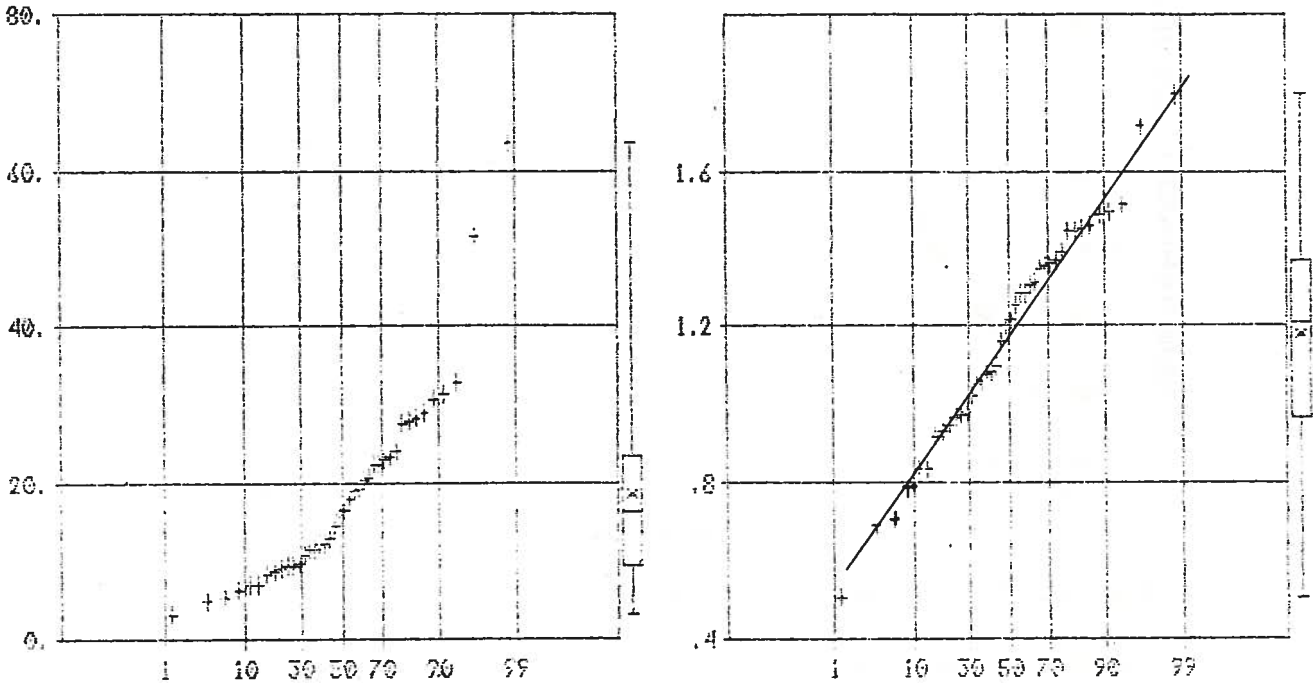


Figura 2. Representación en papel normal de los valores de frecuencias de la variable (izquierda), y de la transformación logarítmica (derecha). En la escala horizontal aparece la frecuencia acumulada y en la vertical el valor de la variable.

El número de datos tomados es similar al de algunos autores (Rogers et al, 1991), encontrando éstos que a veces no era posible ajustar un modelo de semivariograma distinto del puro efecto pepita, lo que demostraba la ausencia de correlación espacial. Sin embargo, en el presente estudio, los valores del semivariograma experimental son ascendentes, y tienden a estabilizarse alrededor de un punto o meseta. A la vista de estos valores, se puede ajustar un modelo de semivariograma teórico de meseta 0,09 y alcance 10. En la figura 3 se observan los valores de semivariograma experimental y su ajuste con el modelo esférico propuesto. Se observa que existe un 11 % de la varianza atribuible al un pequeño efecto pepita. Este valor puede representar una heterogeneidad a pequeña escala, o errores de medida.

El ajuste del semivariograma teórico, se hizo haciendo su trayectoria mas próxima a las distancias con mayor número de pares. A partir de aproximadamente los 32 m. el número de pares para cada distancia disminuía, despreciándose. Algunos autores ajustan otro tipo de modelos de semivariograma como el exponencial, pero en el presente caso es de peor ajuste. Esto implica que la elección del modelo vendrá en ocasiones dada por las características locales, que pueden afectar bastante a la posible estructura espacial existente. También hay que tener en cuenta que la transformación de la variable puede afectar a su "suavidad", afectando consiguientemente a la forma del semivariograma.

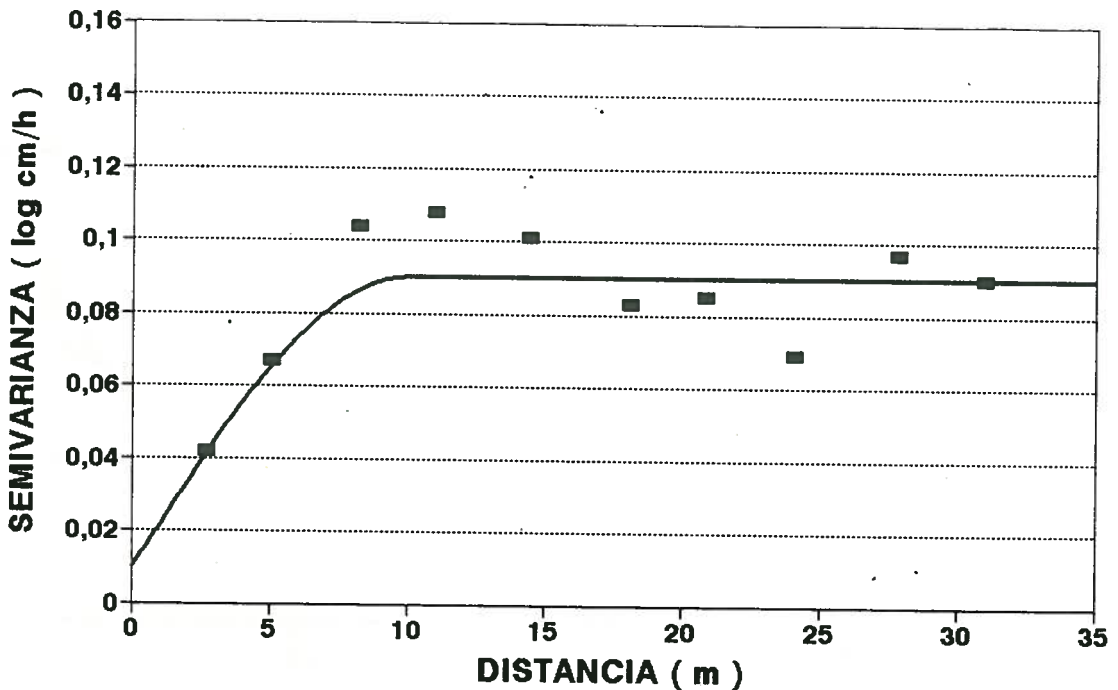


Figura 3. Semivariogramas muestral (recuadros) y teórico (línea) de la variable.

De estos valores se puede deducir que existe una dependencia espacial clara entre los valores de la variable. Se observa además que esta dependencia se va a mantener hasta distancias menores que la del alcance, es decir 10 m. A partir de esta distancia los valores son independientes entre sí.

Si el alcance es menor de 10 se considera que la variable está poco estructurada espacialmente, y a partir de 10 m, la estructura espacial es grande (Miyazaki, 1993). El presente caso se sitúa en el límite, por lo que se puede decir que existe una estructura espacial, pero no demasiado grande.

El siguiente paso sería la validación de la modelización del semivariograma mediante la técnica de la validación cruzada y el uso de otras técnicas como el krigado, que permitan realizar una estimación de la variable en toda la superficie, y la posterior cartografía. Así mismo sería interesante la extensión de las medidas a una superficie más extensa, y su posterior análisis geoestadístico.

CONCLUSIONES

Queda comprobado que la transformación logarítmica al igual que en muchas variables hidrogeológicas facilita el estudio de la variabilidad espacial al pasar de una variable que difiere de la normalidad, a una normal.

Los mayores valores de conductividad hidráulica saturada se dan en la zona límite al estar esta menos alterada y tener unas propiedades diferenciadas con respecto al resto. Sin embargo la menor variabilidad se da en la zona de cultivo, dado el efecto homogeneizador que aquí se produce.

El uso de técnicas geoestadísticas como la modelización de semivariogramas permite distinguir la existencia de una dependencia espacial entre los valores de una variable y la distancia a la que esa dependencia se anula.

BIBLIOGRAFIA

ANLAUF, L. 1987. Regional models. En: Models for processes in the soil. Catena paperback. Germany 1990.

CASTELAO, A.M. y DIAZ-FIERROS, F. 1992. Os solos da Terra Cha. Servicio de publicaciones de la Excma. Diputación Provincial de Lugo.

CASTELAO, A.; GONZALEZ, M.A. y NEIRA, X. 1994. Spatial variability of soil humidity in edge areas of Galicia (NW Spain). 15th World Congress of Soil Science. Mexico 1994.

CHEN, J.; FRANKLIN, F. J. and SPIES, T. A. 1993. Contrasting microclimates among clearcut, edge, and interior of old-growth Douglas -fir forest. Agricultural and Forest Meteorology, 63:219-237.

GONZALEZ M.A. y PAZ A. 1995. La influencia del efecto de borde en la variabilidad espacial y temporal del contenido hídrico. XII Jornadas Técnicas sobre Riegos. Tenerife 1995.

ENGLUND, A. and SPARKS, A. 1991. GEO-EAS.1.2.1. Geostatistical Environmental Assessment Software. User's guide. US-EPA.60018-91008. Las Vegas. USA.

KESSLER, J. and OOSTERBAAN, R.J. 1974. Determinación de la conductividad hidráulica de los suelos. En Principios y Aplicaciones del Drenaje. III Estudios e Investigaciones.

ILRI, Wageningen.

MIYAZAKI, T. 1993. Water flow in soils. Marcel Dekker. New York.

ROGERS, J. S.; SELIM, H. M.; CARTER, C.E. and FOUSS, J. L. 1991. Variability of Auger Hole Hydraulic Conductivity Values for a Commerce Silt Loam. Transactions of the ASAE 34:876-882

SAMPER, F. J. y CARRERA, J. 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R. y BIGGAR, J.W. 1981. Spatial Variability of Field-Measured Infiltration Rate. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:1040-1048

WARRICK, A. W.; MYERS, D. E. y NIELSEN, D. R. 1986. Geostatistical Methods Applied to Soil Science. En: Methods of soil analysis. Part 1-Physical and mineralogical methods. Klute Am.Soc.Agronomy, Soil Sci. Soc. Am. USA.

ESTIMACION DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SATURADA A PARTIR DE TECNICAS GEOESTADISTICAS

por

González García M.A.¹, Dafonte Dafonte J.¹, Paz González A.²

Resumen:

Se realizó un análisis geoestadístico de 40 medidas de conductividad hidráulica saturada en una zona límite agrícola-forestal. La variable que se usó fue el $\log K_{sat}$, analizando su estructura espacial mediante el ajuste de un semivariograma y obteniéndose la estimación mediante krigeado. Posteriormente se deshizo la transformación y se realizó un mapeado de los valores estimados. Se discute también la posibilidad de reducir la incertidumbre de la estimación, mediante la localización de algunos puntos suplementarios. Se observó que los mayores valores estimados de conductividad se sitúan en la zona límite, y los menores valores en la zona cultivada. Sin embargo el krigeado produjo unos valores que muestran un coeficiente de variación mas alto en el cultivo que en el bosque, contrariamente a lo que ocurre con los valores muestrales.

Summary:

Geostatistical analysis of 40 hydraulic conductivity measurements was studied using geostatistical methods in a edge zone crop-forestry. The variable used was the $\log K_{sat}$. Cross-validation was used to test the semivariogram model, and kriging of $\log K_{sat}$ was used to estimate a bidimensional grid of values for the variable. Contour maps of estimates and error maps was drawn. It was discussed the possibility of diminish the error, through the localizing of supplementary points. It was observed that the highest estimates values of conductivity are located in edge zone and the lowest values in the crop zone. Nevertheless the kriging produced a values that proves a variation coefficient more higher in crop land than forestry land on the contrary it was observed in the measured values.

INTRODUCCIÓN

La importancia de la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada, consecuencia de la heterogeneidad de la organización estructural del suelo y del manejo diferencial, ha sido reconocida varias veces (Vieira et al,1981 Rogers et al, 1991). La evaluación de la conductividad hidráulica es importante como factor de cálculo y resolución de problemas de drenaje y cuantificación de escorrentía. Así, la estimación correcta de estos valores adquiere especial importancia, y dada la posible incertidumbre existente se deben utilizar mecanismos de interpolación lo mas adecuados posible. En este trabajo se usará la geoestadística con ese fin, como ya ha sido usado por bastantes autores para gran cantidad de variables hidrológicas y en general relacionadas con las ciencias de la tierra (Samper y Carrera,1990 ; Martinez-Cob et al, 1992). En este campo, existe una metodología de diseño de sistemas de drenaje basándose en mapeados obtenidos mediante análisis geoestadístico de conductividad hidráulica saturada y nivel freático (Gallichand et al, 1991; Gallichand et al, 1992). La aplicación de esta metodología en las zonas susceptibles de hidromorfia en Galicia requiere previamente un estudio de la variabilidad espacial, sabiendo que esta es bastante alta en el paisaje agrario gallego dada la intensa parcelación y la gran cantidad de zonas de borde. En este contexto, el presente trabajo

¹ E.P.S. de Lugo. Universidade de Santiago de Compostela

² Facultade de Ciencias. Universidade de A Coruña.

pretende ser una contribución al estudio de esta variabilidad espacial y una exposición de los métodos geoestadísticos utilizados.

La geoestadística proporcionará unas estimas que no tienen sesgo y donde los errores de la estimación serán minimizados. Además se podrá averiguar la precisión de las estimas, pudiendo ver las zonas en que la estimación es mas fiable. Estas estimas permiten realizar un mapeado mas suave que un mapeado directo de los datos, haciendo mínimos los posibles errores o anomalías, permitiendo una mucho mejor distinción de la estructura espacial, y llegado el caso una delimitación por zonas susceptibles de recibir un trato particularizado (Hosseini et al, 1993).

MATERIAL Y METODOS

Las experiencias fueron realizadas en la granja Gaioso-Castro perteneciente a la Exma. Diputación Provincial de Lugo situada en Castro de Ribeiras do Lea (Lugo).

Se efectuaron 40 medidas de conductividad hidráulica saturada de los 40 cm superficiales por el método de auger-hole (Kessler, 1967) en una zona límite agrícola forestal. El análisis geoestadístico se efectuó con el programa GEO-EAS (Englund y Sparks, 1991) y consistió en tres pasos: 1) modelización del semivariograma; 2) validación del modelo y 3) krigeado (Samper y Carrera, 1990; Martinez-Cob et al, 1992).

La validez del modelo de ajuste del semivariograma se comprobó con la técnica denominada validación cruzada. Esta técnica consiste en eliminar un punto muestral y volver a estimarlo a partir de los restantes valores. Este proceso se efectua con todos los puntos sucesivamente. Posteriormente se examinará el cumplimiento de los siguientes criterios:

-La media de los errores (ME) deberá ser próxima a cero. El valor de ME se calcula mediante:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]$$

-El error cuadrático medio (ECM) será menor que la varianza de los valores muestrales. El valor de ECM responde a:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)]^2$$

-El error cuadrático medio estandarizado (ECMS) estará comprendido en el siguiente intervalo:

$$\left(1 - \sqrt{\frac{2}{n}}\right) \leq ECMS = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{[z^*(x_i) - z(x_i)]^2}{\sigma_k^2} \leq \left(1 + \sqrt{\frac{2}{n}}\right)$$

Por último se utilizó la técnica geoestadística del krigeado para describir la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica. Si los datos experimentales presentan una estructura

espacial, el krigado permitirá la estimación de nuevos valores en puntos donde la variable no se midió.

La estimación de una variable en un punto x_0 donde no se conoce, se realiza mediante una función lineal consistente en una combinación lineal de los valores x_i conocidos según la expresión:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

donde $Z^*(x_0)$ es el valor estimado de la conductividad hidráulica en el punto x_0 , y λ_i son unos coeficientes de ponderación o coeficientes de krigado. Las funciones de estimación no lineales se usan muy raras veces (Warric et al, 1986).

El estimador Z^* debe de ser insesgado, es decir:

$$E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0$$

Además la varianza del error de estimación deberá ser mínima:

$$\text{Var}[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = \text{mínimo}$$

Por último se deberá cumplir la restricción:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Con estas condiciones se puede usar el método de los multiplicadores de Lagrange, generándose un sistema de $n+1$ ecuaciones (ecuaciones de krigado) con $n+1$ incógnitas. De la resolución de este sistema se obtienen los n coeficientes de krigado λ y el multiplicador de Lagrange μ .

Posteriormente con las estimas realizadas se podrá realizar un mapeado con las isoclinas de conductividad hidráulica y con las isoclinas de la desviación estándar del krigado. Es de notar que el valor de la desviación estándar del krigado no depende del valor de la variable en el punto, sino en su situación respecto a los demás puntos.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores muestrales transformados logarítmicamente presentan una distribución normal de media 1.178 y varianza 0.082. El semivariograma teórico que mejor se adapta es uno con un efecto pepita de 0.01, meseta de 0.09 y alcance de 10 m.

El resultado de la validación cruzada muestra que la media de los errores es 0.027. El error cuadrático medio del krigado (ECM) es 0.069, que se comprueba que es menor que la varianza muestral. El error cuadrático medio estandarizado (ECME) es 1.094, y se observa

que es próximo a 1 estando comprendido en el intervalo $0.55 - 1.447 (1 \pm 2\sqrt{2/n})$. De todo esto se deduce que el modelo de semivariograma teórico elegido describe la dependencia espacial de la conductividad hidráulica saturada con un buen nivel de precisión.

De la realización del krigado se obtienen unas estimas del logaritmo de la conductividad hidráulica que conducen al mapa de isolneas de la figura 1. En este mapa H es el valor mas alto, y L el valor mas bajo. Se pueden observar unas zonas donde no existen isolneas. En estas zonas la incertidumbre de la estimación es bastante grande, por lo que el programa usado no efectua el cálculo.

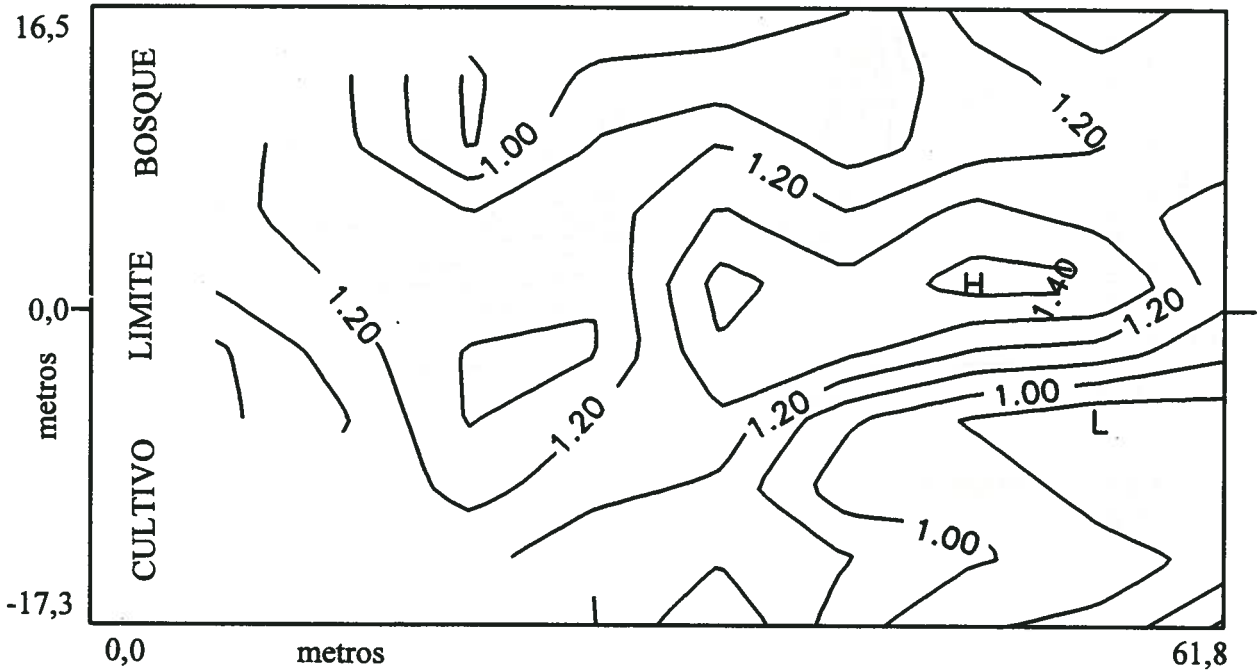


Figura 1. Mapa de isolneas del logaritmo de conductividad hidráulica (K_{sat}).

En la figura 2 se observa el mapeado de la desviación estandar de los errores de la estimación. De este mapa se deduce que la zona central con mayor densidad de puntos de muestreo es la que presenta una estimación mas fiable, mientras que las zonas de los laterales presentan una mayor incertidumbre al realizarse la estimación basándose en menos puntos. A la vista de este mapa se puede tomar la decisión de efectuar alguna o algunas medidas mas para mejorar la estimación. El método sería considerar un punto ficticio, efectuando posteriormente los cálculos. Al no depender la varianza del krigado del valor de la variable en el punto, sino solo de su posición, el proceso anterior es sencillo. Así con las nuevas desviaciones estandar del krigado se realiza el mapeado y se comprueba si la reducción de incertidumbre es satisfactoria. Este proceso se puede repetir las veces que sea necesario, haciendose secuencialmente con mas puntos. Mediante este sistema se puede hacer un diseño de redes de medida de manera que se cometa el menor error posible en la estimación.

Un ejemplo de esta aplicación se realiza situando dos nuevos puntos de medida en las coordenadas (20 , -15) y (50 , -15). El mapeado de los errores de la estimación con los dos puntos suplementarios aparece en la figura 3.

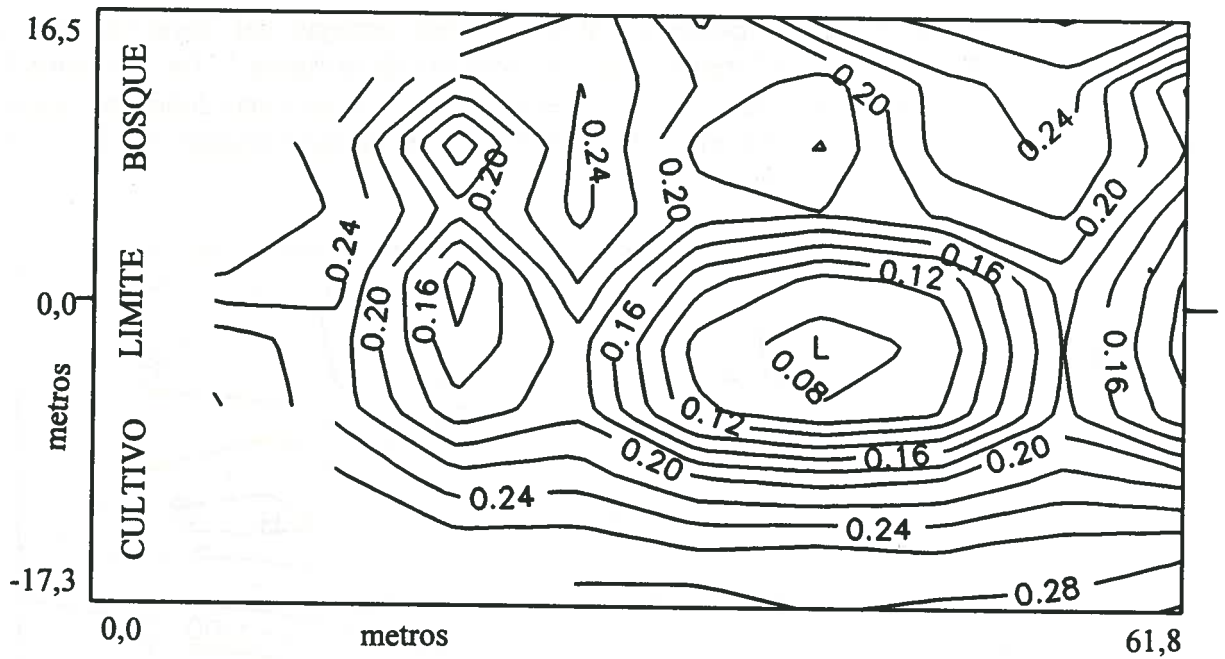


Figura 2. Mapa de isocuantas de la desviación estándar de la estimación del logaritmo de K_{sat} .

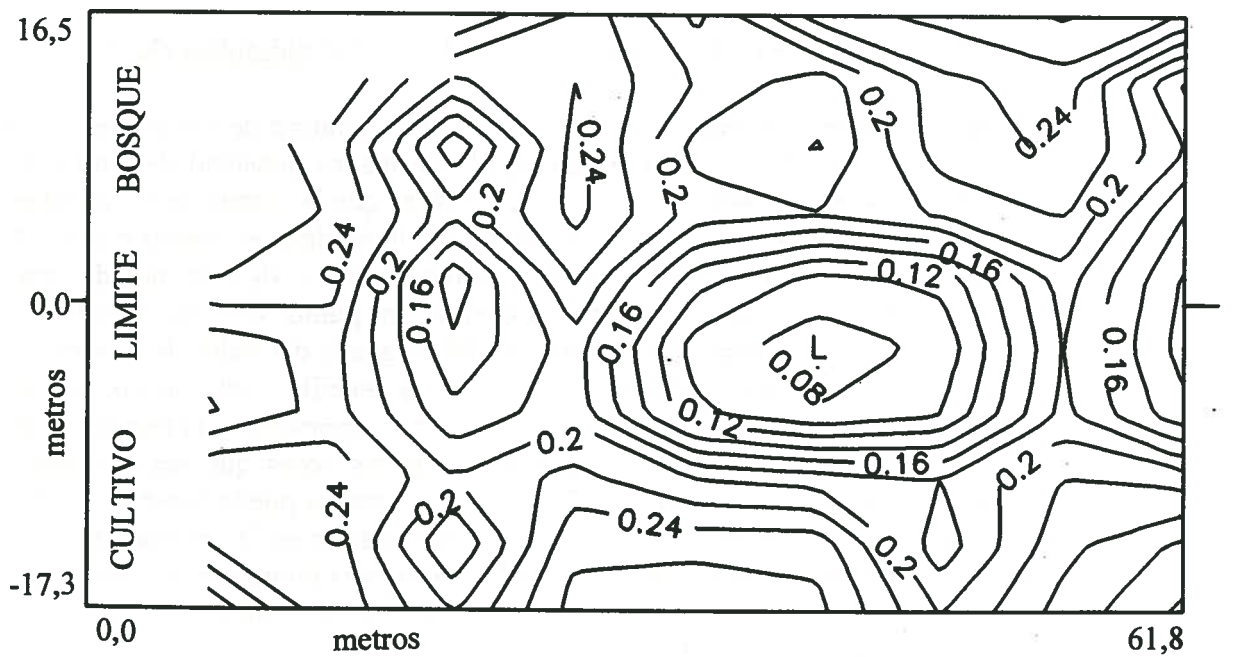


Figura 3. Mapa de isocuantas de la desviación estándar de la estimación del logaritmo de K_{sat} con dos nuevos puntos suplementarios.

Se puede comprobar que con los dos puntos suplementarios cambia notablemente la forma de las isolneas en una determinada zona de la parcela. Probando a situar algún punto mas en otras posiciones se pueden conseguir nuevas modificaciones. De este modo se puede moldear el mapa de errores del krigiado segun los diversos objetivos que se quieran conseguir, como mantener la varianza de la estimación dentro de un determinado límite, o diseñar una red de muestreo y toma de datos que posea la máxima fiabilidad.

Las estimas realizadas son de datos logarítmicos, y para su uso practico es preciso tener los valores reales de la variable. Estes se consiguen deshaciendo la transformación logarítmica mediante la función inversa:

$$K_{sat}^* = 10^{Y^*}$$

siendo K_{sat}^* la conductividad hidráulica resultante de la estimación y Y^* el logaritmo estimado proveniente del krigiado.

El mapa resultante de la variable una vez deshecha la transformación es el presentado en la figura 4.

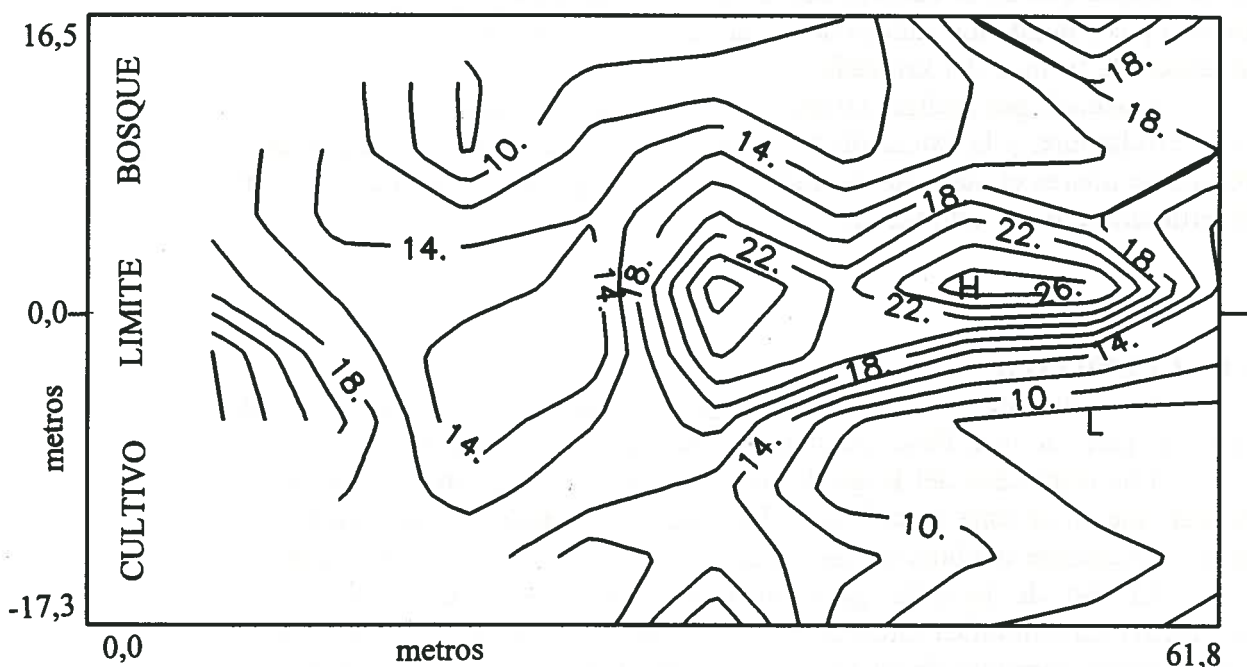


Figura 4. Mapa de conductividad hidráulica saturada (cm/h) una vez deshecha la transformación.

Los parámetros estadísticos elementales de la estimación, en diversas zonas están resumidos en la tabla 1. La zona límite se tomó como una franja de 5 m. a cada lado del punto 0.

	Cultivo	Bosque	Límite
Media	13,680	15,339	17,994
Des. estandard	5,563	4,978	4,980
Coe. variación	0,406	0,325	0,277
Máximo	26,51	27,44	27,44
Mínimo	4,78	7,65	10,46

Tabla 1. Datos estadísticos elementales de las estimas por krigeado de conductividad hidráulica (cm/h).

De la anterior tabla se puede extraer que los máximos valores se dan en la zona límite y los mínimos en la zona de cultivo. Así mismo la mayor variabilidad es en la zona de cultivo y la mínima en la zona límite. Esta menor variabilidad de la zona de bosque frente a la de cultivo, se puede explicar por la suavización de los datos que realiza el krigeado. Trabajando con los datos reales se puede comprobar como los coeficientes de variación de cultivo y bosque son respectivamente 0,54 y 0,81 , por lo que se observa una mucha mayor reducción en el bosque que en el cultivo, donde la disminución es pequeña. Entre los datos de bosque existen picos donde los valores de la variable son mucho mas altos y que se reducen bastante al aplicar la técnica del krigeado.

Quedaría por realizar un aumento de los puntos muestrales con criterios de minimizar la incertidumbre, y la extensión de las medidas a un area de mayores dimensiones. Tambien resulta de interés el aumento de distancia entre los puntos de medida y su influencia sobre la incertidumbre de la estimación.

CONCLUSIONES

El modelo de semivariograma elegido describe perfectamente la variabilidad espacial, como se pone de manifiesto mediante el método de la validación cruzada.

Los resultados del krigeado muestran una suavización bastante mayor el la zona de bosque que en la zona de cultivo. La zona de máxima conductividad se situa en la zona límite, situandose también en ese lugar la zona con menor error de estimación.

El uso de técnicas geoestadísticas para analizar la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada es una herramienta muy útil de cara a realizar estimaciones y posteriores mapeados de los valores mas probables de la citada variable. Así mismo permite averiguar la magnitud de los errores de la estimación, proporcionando un método para reducirlos, y así poder realizar la extensión o el diseño de redes de medida que minimicen la incertidumbre.

Con el análisis de la variabilidad espacial se pueden establecer zonas diferenciadas para la conductividad hidráulica que serán de utilidad de cara al cálculo y diseño de sistemas de drenaje.

BIBLIOGRAFIA

GONZALEZ GARCIA, M.A. y PAZ GONZALEZ, A. 1995. Evaluación mediante métodos geoestadísticos de la variabilidad espacial del contenido hídrico del suelo. Revista de la Real Academia Gallega de Ciencias. Vol XIV.

HOSSEINI, E.; GALLICHAND, J. and CARON J. 1993. Comparison of Several Interpolations for Smoothing Hydraulic Conductivity Data in South West Iran. Transactions of the ASAE. Vol 36, No 6 1687-1693.

ENGLUND, A. and SPARKS, A. 1991. GEO-EAS.1.2.1. Geoestadistical Enviromental Assesment Software. User's Guide. US-EPA.60018-91008. Las Vegas. USA

GALLICHAND, J.; PRASHER, S.O.; BROUGHTON, R.S. and MARCOTTE, D. 1990. Kriging of Hydraulic Conductivity for Subsurface Drainage Design. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 117, No 5 :667-681.

GALLICHAND, J.; MARCOTTE, D. and PRASHER S.O. 1991. Including Uncertainty of Hydraulic Conductivity into Drainage Design. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol 118, No 5: 744-756.

KITANIDIS, P.K. 1992 Geostatistics. En: Handbook of Hydrology. Maidment D.R. McGraw-Hill. USA.

MARTINEZ-COB, A.; CUENCA, R.H. y FACI J.M. 1992. Geoestadística multivariante aplicada a estudios regionales de evapotranspiración. Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales. Vol. 7(3).

ROGERS, J.S.; SELIM, H.; CARTER, C.E. and FOUSS, J.L. 1991. Variability of Auger Hole Hydraulic Conductivity Values for a Commerce Silt Loam. Transactions of the ASAE 34:876-882.

SAMPER, F.J. y CARRERA, J. 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la hidrología subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona.

VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R. and BIGGAR J.W. 1981. Spatial Variability of Field-Measured Infiltration Rate. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:1040-1048.

WARRIC, A.W.; MYERS, D.E. and NIELSEN, D.R. 1986. Geostatistical Methods Applied to Soil Science. En: Methods of Soil Analysis. Part I. Am. Soc. of Agronomy, Soil Sci. Soc. of America. USA.

APROXIMACIÓN A LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO GUADALQUIVIR

Relaño¹, J.A.; J. Roldán¹ y J. Andreu²

¹ Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba

² Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia

1. Introducción

La necesidad de racionalizar el uso de los recursos hídricos en la cuenca del río Guadalquivir tanto en el sector agrícola como en otros sectores ajenos a la agricultura, avala la realización de un estudio sobre su gestión de que sirva de base para establecer una futura planificación hidrológica.

Una adecuada gestión de los recursos hídricos requiere, en primer lugar, la caracterización de la cuenca definiendo los elementos que la componen así como los parámetros que describen a estos elementos. En conjunto, habría que localizar y cuantificar los distintos tipos de salidas o demandas (agrícola, urbana e industrial) y sus retornos; definir los elementos reguladores del sistema (embalses superficiales y acuíferos) estableciendo sus criterios de funcionamiento; calcular el régimen de entradas o aportaciones a la cuenca; y, por último, determinar las redes o caminos de agua (naturales o artificiales) que conectan todos los elementos mencionados.

En segundo lugar, hay que establecer los criterios o reglas de explotación para conseguir la mejor gestión, manejo, asignación y distribución de los recursos.

En tercer lugar, y a partir del grado de satisfacción de las demandas se deben inferir los errores en los criterios de gestión adoptados y las posibles deficiencias de las actuales infraestructuras hidráulicas que impiden alcanzar los objetivos de gestión fijados. Estas carencias pueden orientar sobre la necesidad de su ampliación, cambio o eliminación de cara al establecimiento de un Plan Hidrológico de la Cuenca.

2. Modelo de simulación SIMGES

La gestión del sistema hidrológico de la cuenca del Guadalquivir se ha realizado utilizando un programa de simulación de recursos hídricos, denominado SIMGES, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia (Andreu y col., 1.993).

Este modelo forma parte de un sistema gráfico denominado AQUATOOL (Andreu y Capilla, 1.991). Éste es un soporte de decisión que será utilizado por el usuario para la toma de decisiones y que permite la utilización de otros modelos como OPTIGES o SIMMUL.

SIMGES es un modelo de gestión de recursos hídricos que trata de reproducir, mediante simulación, el funcionamiento de un sistema determinado cuyos elementos constituyen los datos de entrada al mismo: acciones exteriores tales como las aportaciones hidrológicas; características de las infraestructuras (capacidades de embalses y conducciones) y de las distintas demandas; y reglas de gestión con que se explota dicho sistema. Así, SIMGES nos dará los valores de los distintos parámetros del sistema (garantías de abastecimiento de las demandas, caudal de sueltas de cada embalse, etc.) considerando como aportaciones hidrológicas del sistema las correspondientes a un período de años anterior. Por tanto, se puede saber cuál es el comportamiento del sistema en caso de que con las infraestructuras actuales se produjera un régimen de precipitación similar a otro producido realmente (seco, medio o lluvioso). Esto nos servirá para poder detectar posibles fallos del sistema y resolverlos o bien realizar cambios en la gestión del mismo; o lo que es lo mismo, plantear las bases para la planificación de la gestión futura.

En cuanto a los otros dos modelos que componen AQUATOOL, OPTIGES es un módulo para optimización de recursos hidráulicos, el cual, al igual que SIMGES utiliza series hidrológicas de períodos de tiempo anteriores para obtener la solución óptima, entre todas las posibles. Sin embargo, presenta el inconveniente de que representa la realidad de la cuenca de forma menos precisa que como los hace SIMGES y, por tanto, esta solución óptima tiene una importancia relativa.

Por último, SIMMUL realiza la simulación del sistema propuesto pero, en su caso, las series hidrológicas no provienen de períodos anteriores, sino que son series sintéticas obtenidas mediante distintos métodos estadísticos.

En SIMGES, la simulación se efectúa a escala mensual y reproduce con el detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uni o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y subterráneas.

La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de operación tendentes a mantener un nivel similar de llenado en los embalses a partir de unas curvas de zonado de embalse. Dichas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo. Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de

determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volúmenes objetivo de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica (Andreu y col., 1.994).

3. Esquema general de la cuenca del Guadalquivir. Descripción y simplificación

El esquema general de la cuenca del Guadalquivir comprende varios subsistemas de explotación de recursos hídricos (figura 1):

- Sistema Salado de Morón
- Sistema Campiña Sevillana
- Sistema Alto Genil
- Sistema Guadajoz
- Sistema Jaén
- Sistema Hoya de Guadix
- Sistema Alto Guadiana Menor
- Sistema Rumblar
- Sistema Guadalquivir
- Sistema Bembézar-Retortillo
- Sistema Rivera de Huesna
- Sistema Viar
- Sistema Sevilla
- Sistema Almonte-Marismas
- Sistema de Regulación General

Según la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (C.H.G.), las demandas urbanas de los mismos son las mostradas en el cuadro 1, y las agrícolas las que aparecen en el cuadro 2. Los recursos superficiales regulados de cada uno de los subsistemas se incluyen en el cuadro 3. Los acuíferos no han sido considerados en una primera instancia.

FIGURA 1. Subsistemas de explotación de recursos hídricos en la Cuenca del Guadalquivir.



CUADRO 1. Demandas urbanas en los Sistemas de la Cuenca.

SISTEMA	POBLACIONES	HABITANTES	DEMANDAS ($hm^3/año$)
1. Salado de Morón	El Coronil, Los Molares, Montellana	14.850	1'4
2. Campiña Sevillana	Viso del Alcor	15.040	1'5
3. Alto Genil	Granada y otros	543.860	36'3
4. Guadajoz	Varias	123.355	15'1
5. Jaén	Jaén y 12 pueblos	137.709	18'1
6. Hoya de Guadix	Varias	61.814	5'7
7. Alto Guadiana Menor	Varias	71.879	7'0
8. Rumberal	Bailén y Baños de la Encina	18.867	1'9
9. Guadalmellato	Córdoba	310.928	58'9
10. Bembézar-Retortillo	Plan Ecija (12), Palma, Lora y Hornachuelos	206.000	22'6
11. Ribera de Huesna	---	0	0'0
12. Viar	---	0	0'0
13. Sevilla	Sevilla	1.058.000	156'0
14. Almonte-Marismas	Varias	53.249	5'4
15. Regulación General	Condado	21.336	2'0
	La Loma	99.071	12'2
	Varios	15.838	2'1
	Linares	56.720	8'8
	Andújar-Marmolejo	42.297	4'7
	Villaviciosa	4.158	0'3
	Posadas	6.985	0'9
	Varios	391.213	27'8
Bajo Guadalquivir	83.474	9'5	
TOTAL		3.336.643	398'1

FUENTE: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

CUADRO 2. Demandas agrícolas en los Sistemas de la Cuenca.

<i>SISTEMA</i>	<i>SUPERFICIE (ha)</i>	<i>DEMANDA (hm³/año)</i>	<i>DOTACION (m³/ha)</i>
1. Salado de Morón	2.057	15'5	7.700
2. Campiña Sevillana	9.639	53'8	5.580
3. Alto Genil	35.817	204'0	5.700
4. Guadajoz	9.597	34'6	3.600
5. Jaén	24.483	73'6	3.000
6. Hoya de Guadix	19.264	70'9	3.680
7. Alto Guadiana Menor	21.581	102'4	4.750
8. Rumber	5.632	39'8	7.060
9. Guadalmellato	9.319	74'4	8.000
10. Bembézar-Retortillo	16.607	139'2	8.400
11. Ribera de Huesna	1.045	5'5	5.260
12. Viar	12.160	65'0	5.350
13. Sevilla	1.132	6'1	5.400
14. Almonte-Marismas	12.092	73'6	6.100
15. Regulación General	262.590	1.882'0	7.418
TOTAL	443.015	2.890'4	6.658

FUENTE: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

CUADRO 3. Recursos superficiales regulados en los Sistemas de la Cuenca.

SISTEMA	EMBALSE	CAPACIDAD (hm^3)	VOLUMEN REGULADO ($hm^3/año$)
1. Salado de Morón	Torre del Aguila	66	17
2. Campiña Sevillana	Sin regular. La Puebla (en construcción)	---	---
3. Alto Genil	Embalses: Quentar, Canales, Cubillas, Bermejales Flujo base ríos	255 8	169 0
4. Guadajoz	Sin regular	---	---
5. Jaén	Quiebrajano	32	14
6. Hoya de Guadix	Sin regular. Flujo base: río Fardes y Guadahortuna, Minas de Alquife	---	---
7. Aļto Guadiana Menor	Bolera (Guadaletin)	53	45
8. Rumblar	Rumblar	126	44
9. Guadalmellato	Guadalmellato	145	67
10. Bembézar-Retortillo	Bembézar Retortillo	347 73	137 30
11. Ribera de Huesna	Huesna	135	43
12. Viar	Pintado	202	79
13. Sevilla	Aracena	127	51
	Zufre	167	62
	Minilla	60	30
	Cregal	35	14
	Cala	58	31
14. Almonte-Marismas	Sin regular. Flujo base: río Guadalimar y arroyo de la Rocina	---	---
15. Regulación General	Tranco de Beas	500	164
	Guadalmena	345	107
	Guadalén	163	54
	Jándula	322	86
	Yeguas	229	85
	San Rafael Navallana	156	24
	Puente Nuevo	286	34
	Breña	103	26
	Negratín	546	184
Iznájar	981	292	
TOTAL		5.521	1.889

FUENTE: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

La gran extensión de la cuenca ha obligado, para poder aplicar el modelo de simulación, a realizar una simplificación de la misma que se ha hecho considerando únicamente los subsistemas que son objeto de regulación por parte de la C.H.G. y que, por tanto, son objeto de una gestión conjunta y homogénea. Se han eliminado aquellos que se encuentran sin regular, como es el caso de Campiña sevillana, o también otros cuya regulación es independiente del conjunto tal como el Alto Genil. Una vez hecha esta primera simplificación, se ha realizado una segunda mediante la cual, dentro de cada subsistema considerado, no se han tenido en cuenta todas aquellas demandas que se abastecen de cursos situados por encima de los mecanismos de regulación, ya que no se tiene control sobre estos abastecimientos. Además de esto, no se han considerado de momento las demandas que se abastecen de recursos subterráneos (Relaño, 1.995).

De esta forma, el esquema simplificado con el que se va a trabajar abarca el tronco principal del río Guadalquivir, así como las cuencas de los ríos Guadalimar, Jándula, Yeguas, Guadalmellato (desde el embalse de San Rafael de Navallana), Guadiato, Guadiana Menor (desde el embalse del Negratín) y Genil (desde el embalse de Iznájar), que se corresponde con el subsistema de Regulación General, así como los subsistemas Guadalmellato, Bembézar-Retortillo, Rivera de Huesna, Viar y Sevilla. Los demás subsistemas de la cuenca se consideran cerrados, por lo que no afectan a las reglas de explotación del resto.

Esto supone, desde el punto de vista de las demandas urbanas, que el sistema simplificado que se ha utilizado comprendería 2.296.020 habitantes sobre un total de 3.336.643, que se correspondería con el número total de habitantes de todos los subsistemas que conforman la cuenca del Guadalquivir (siempre según datos de C.H.G.). Por tanto, se ha analizado un 68'8% de la población total.

Sin embargo, si tenemos en cuenta la demanda anual en hm^3 , el porcentaje analizado con respecto al total de la cuenca asciende hasta un 76'8% ($305'8 \text{ hm}^3/\text{año}$ del esquema simplificado por $398'1 \text{ hm}^3/\text{año}$ del total).

Desde el punto de vista de las demandas agrarias, el sistema simplificado que se ha utilizado supone el 68'3% de la superficie total de las demandas agrícolas de la cuenca (302.853 ha frente a las 443.015 ha totales), pero asciende hasta más del 75% de la demanda anual ($2.172'2 \text{ hm}^3$ frente a los $2.890'2 \text{ hm}^3$ de toda la cuenca según datos de la C.H.G.).

Todas estas cifras nos indican que se ha trabajado con la mayor parte de la cuenca, y que la simplificación de la misma no resta valor a los resultados obtenidos, aplicables al conjunto de la cuenca del río Guadalquivir.

4. Datos de entrada al modelo

- *Datos hidrológicos (aportaciones)*

Estos datos se refieren a la serie de aportaciones hidrológicas de la cuenca. En nuestro caso se ha dispuesto de un registro que abarca el período de años comprendido entre 1.942 y 1.987. Los datos aportados han sido previamente restituidos al régimen natural por la C.H.G. Las aportaciones de la serie disponible han sido distribuidas y dispuestas entre la cabecera de todos los embalses incluidos en el esquema simplificado de la cuenca (figura 2) y seis puntos concretos a lo largo del curso del río Guadalquivir (aportaciones intermedias) (figura 3). Para la determinación de estas aportaciones intermedias se ha tenido en cuenta, en primer lugar, el total de cuenca aportante y, en segundo, el total de zonas de demanda que se van a abastecer aguas abajo de esa aportación. Con esto se consigue una homogeneidad en cuanto a la cuantía, así como se refleja de una forma más real el abastecimiento a las distintas demandas.

- *Elementos de regulación (embalses superficiales)*

Los datos necesarios para caracterizar los elementos de almacenamiento de agua, y que son imprescindibles para el modelo, incluyen su volumen inicial en el período de simulación, sus volúmenes máximo y mínimo, así como las curvas batimétricas de cada uno y la evaporación registrada mensualmente.

También se requiere establecer una priorización de los embalses, que permita decidir cuales de ellos aportará el agua en primer lugar, conforme haya que satisfacer a las distintas demandas.

- *Demandas*

Los datos de demandas urbanas considerados son los facilitados por la C.H.G. y que aparecen en el cuadro 1.

En lo que respecta a las demandas agrícolas, y dado que representan un elevado porcentaje del total en esta cuenca, se ha procedido a realizar un nuevo cálculo de las necesidades de agua a partir de la distribución real de cultivos en las distintas zonas regables.

En cualquier caso, se han desechado aquellas demandas que se abastecen de recursos subterráneos así como aquellas otras que están situadas por encima de embalses de cabecera de cuencas debido a su imposibilidad de regulación en el sistema hidrológico establecido.

La evaluación de las necesidades de agua de las distintas zonas de demanda se ha llevado a cabo mediante la utilización del programa CROPWAT (Smith, 1.993), en el cual se determinan las necesidades de riego de cada cultivo en cada zona regable, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona, así como otros factores como el tipo de suelo y el método de riego utilizado en cada caso. A partir de las necesidades de cada cultivo, y conociendo la distribución de cultivos de cada zona regable, se calcula la demanda mensual agrícola. De este modo, dicha demanda se ha ajustado en mayor medida a la realidad en relación con los supuestos iniciales considerados por la C.H.G.: 1.013 hm³/año según Relaño (1.995) frente a 2.172 hm³/año (ver apartado 3). Por otro lado, la demanda urbana también se ha ajustado a un valor inferior (283 hm³/año).

Dentro de cada zona de demanda se han clasificado los distintos cultivos en varios grupos, a cada uno de los cuales se les puede asignar un número de prioridad. Con ello se decide el orden de suministro de agua a los mismos, lo que puede resultar fundamental en momentos de sequía.

La asignación de la prioridad de abastecimiento a las demandas agrícolas puede no ser sólo función del tipo de cultivo, sino que también se puede tener en cuenta la productividad de la zona, el interés social, paro agrario, etc.

- *Otros datos*

Entre los datos restantes que hay que aportar al modelo se encuentran los caudales máximos y mínimos de los tramos de río, o conducción, los puntos donde se considera que se incorporan a la red los retornos provenientes tanto de los núcleos urbanos como de las zonas regables, el valor de dichos retornos, y otros de menor interés.

5. Resultados y discusión

El modelo aporta, como resultado, la evolución mensual de todas las variables durante el período de simulación elegido. Resultados de variables a destacar son los relativos a volumen de aportaciones a embalses e intermedias, y número de sueltas y vertidos en embalses, así como su cuantía, garantía de abastecimiento de las distintas demandas consideradas y déficit de las mismas en caso de que existiera.

Con las salidas obtenidas se pueden determinar los beneficios o perjuicios de la alteración en las prioridades establecidas, tanto en embalses como en demandas, las reglas de explotación que pueden ser más adecuadas, las capacidades de embalse, conducciones e instalaciones más idóneas para unos niveles determinados de garantías, etc.

En el caso de este trabajo, en particular, se ha simulado cuál sería el comportamiento del sistema de la cuenca del Guadalquivir si las aportaciones que recibiera en un período futuro fueran las que de hecho se produjeron entre los años 1.942 y 1.945.

Las prioridades asignadas a los embalses fueron en orden ascendente desde los embalses de cabecera del río hasta la desembocadura, de forma que ante el abastecimiento de las distintas demandas soltarán agua siempre en primer lugar los más cercanos a la desembocadura, quedando los demás en situación de reserva.

Por otro lado, también se realizó la siguiente priorización de las demandas:

- Prioridad 1: abastecimientos urbanos.
- Prioridad 2: cultivos permanentes (cítricos, frutales).
- Prioridad 3: huertos familiares.
- Prioridad 4: olivo.
- Prioridad 5: cultivos temporales (trigo, algodón, etc.).

En cuanto a los retornos de las distintas demandas al sistema, se han considerado un coeficiente del 40% para las agrícolas y de un 80% para las urbanas.

El modelo encuentra, manteniendo las demandas actuales con la serie de aportaciones de 1.942 a 1.945, sólo dos zonas de demanda que presentarían déficit: Sevilla y la zona del Viar (figuras 4 y 5).

La simulación de otros períodos de tiempo permite verificar si el problema encontrado es estructural o si, por el contrario, es simplemente coyuntural. Las causas que lo original pueden ser posteriormente analizadas. En este caso, podría deberse a la ineficacia de los embalses para abastecer las demandas, fundamentalmente el caso del embalse del Pintado, cuyo volumen embalsado a lo largo del período considerado así como la aportación al mismo en dicho período se pueden observar en las figuras 6 y 7.

En cualquier caso, los resultados encontrados siempre habrá que analizarlos teniendo en cuenta que el modelo hace una simulación ideal en la que no se tienen en cuenta aspectos como el robo de agua, el funcionamiento incorrecto de las instalaciones, etc., y, en este caso, la existencia de acuíferos y de demandas abastecidos por los mismos.

SISTEMA GUADALQUIVIR (5 tomas): SEVILLA

FIGURA 4. Demanda urbana de Sevilla. Déficit mensual.

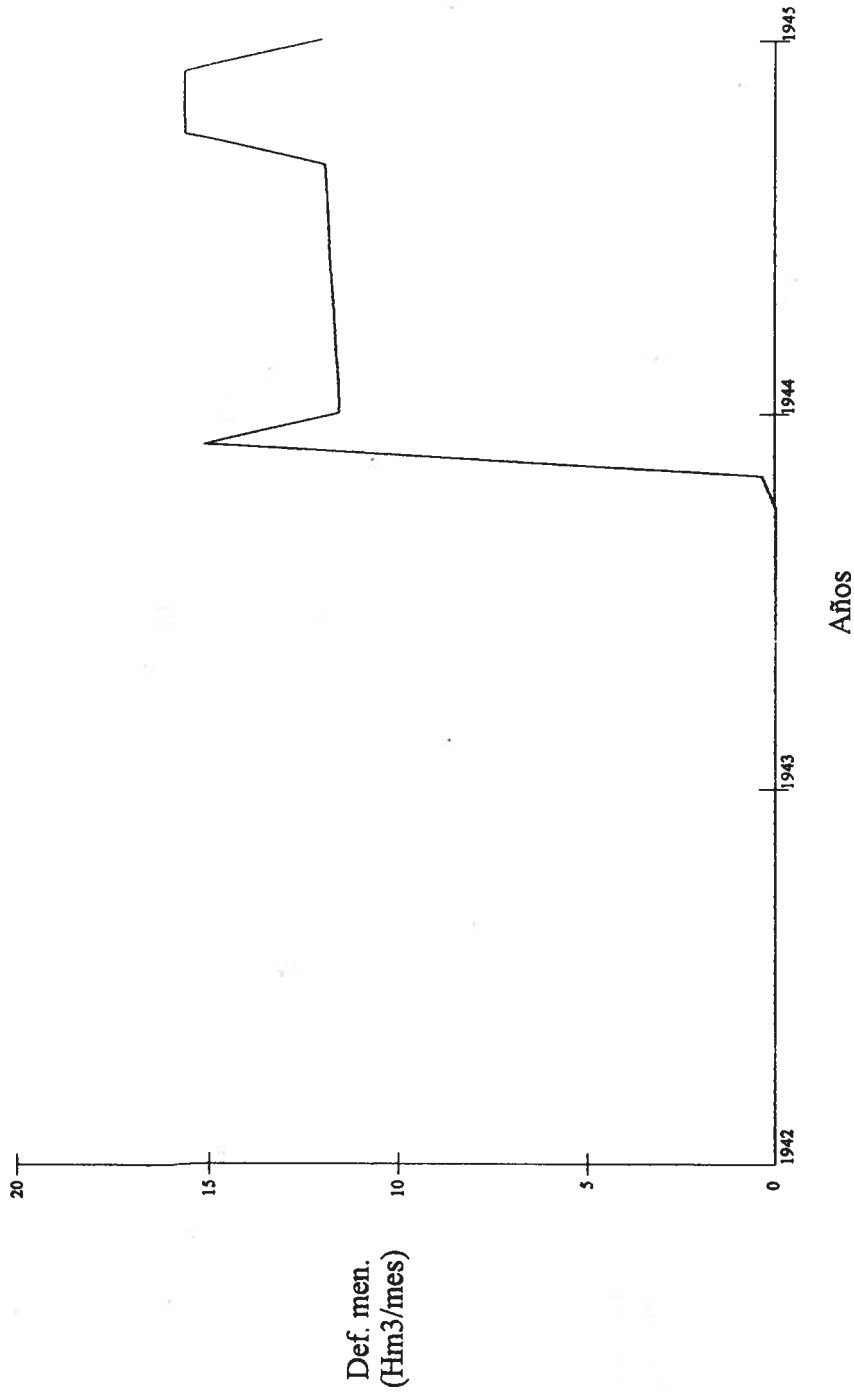
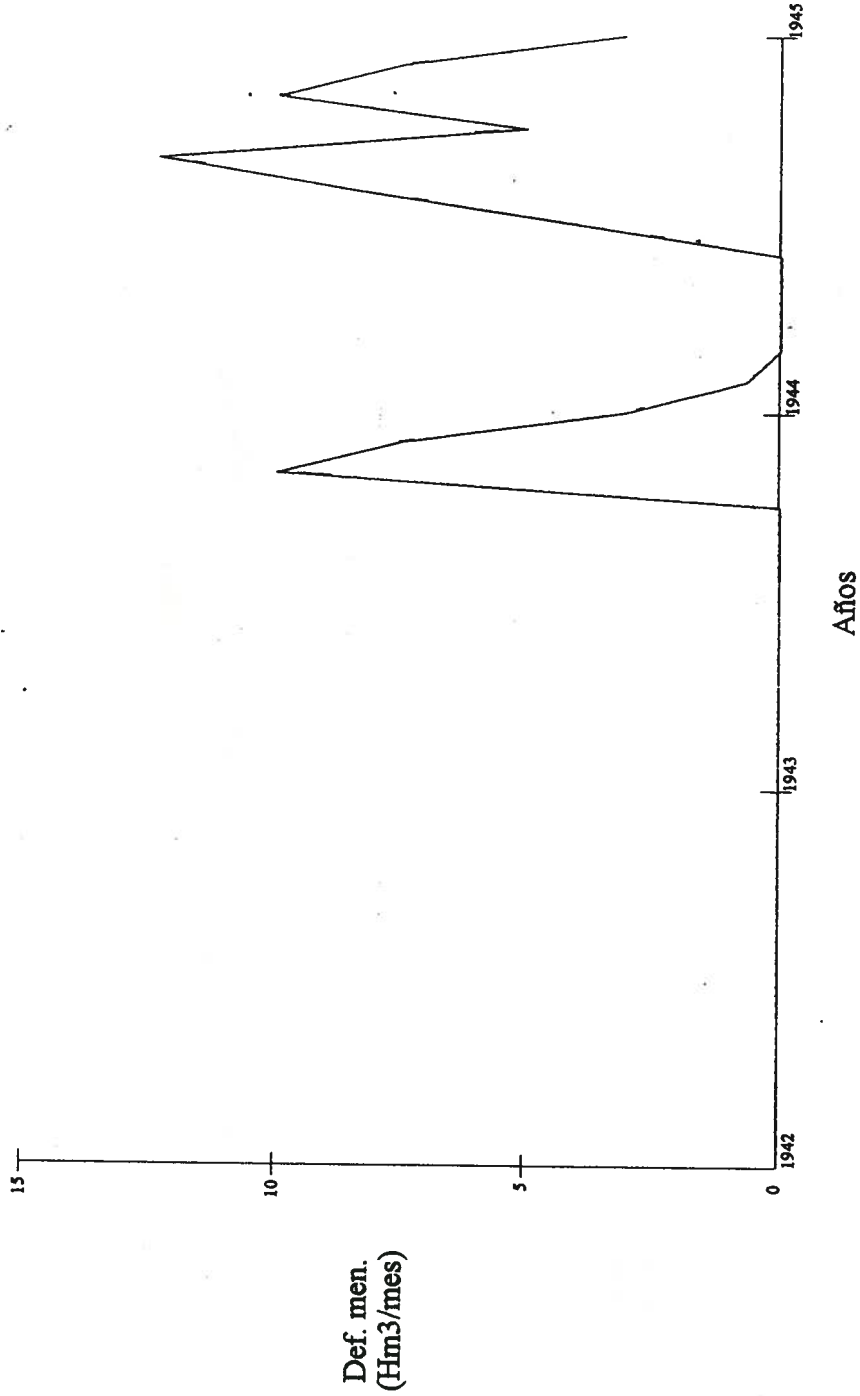


FIGURA 5. Demanda agraria de la Zona Regable del Viar. Déficit mensual.

SISTEMA GUADALQUIVIR (5 tomas): ZR. VIAR



SISTEMA GUADALQUIVIR (5 tomas): EL PINTADO

FIGURA 6. Aportaciones mensuales al embalse de El Pintado.

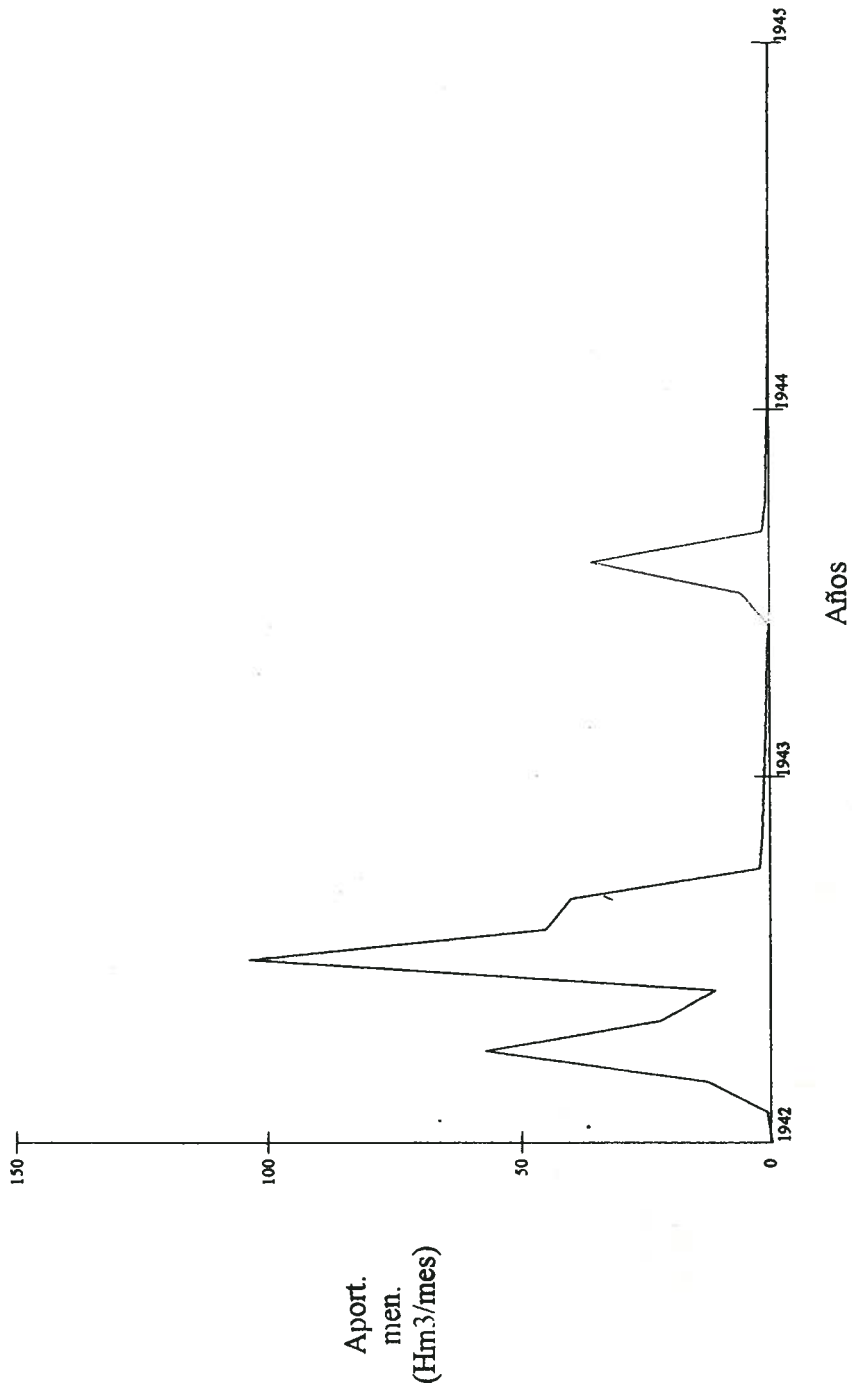
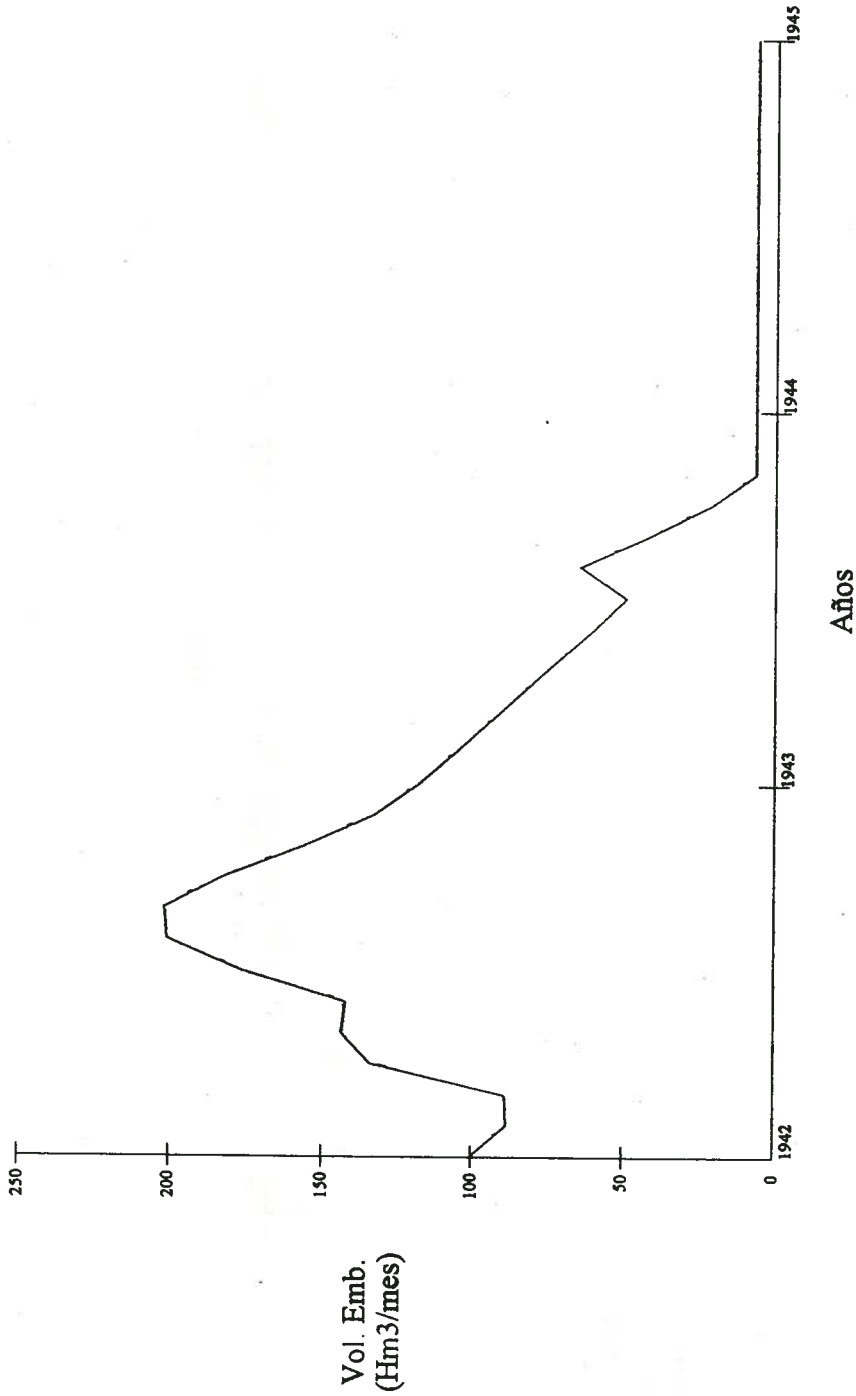


FIGURA 7. Volumen embalsado mensual en El Pintado.

SISTEMA GUADALQUIVIR (5 tomas): EL PINTADO



6. Conclusiones

La conclusión más importante que se puede obtener es la idoneidad del modelo utilizado, SIMGES, como herramienta para establecer las pautas para la gestión de los recursos hídricos en una cuenca como la del río Guadalquivir. Gracias a este modelo, se pueden determinar, por un lado, las garantías para distintas hipótesis de infraestructura y evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca. Por otro lado, se pueden evaluar las reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de garantías y los beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua, así como las capacidades de embalse, de conducciones, etc., para unos niveles de demanda y garantía dados. Por último, es posible detectar posibles problemas estructurales en el sistema y sugerir soluciones a los mismos.

Sin embargo, el modelo no tendrá ninguna validez sin un estudio previo de caracterización y definición de todos y cada uno de los elementos que conforman el sistema en la realidad. Sin lugar a dudas, ésta es la parte más importante del proceso de gestión y planificación, ya que de nada servirán los resultados obtenidos a partir de un esquema que no refleje de manera fidedigna la situación real.

7. Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado gracias al Convenio entre la Universidad de Córdoba y la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, titulado "*Estudio de Gestión de Recursos Hídricos para Uso Agrícola en Andalucía*".

Se agradece, asimismo, la colaboración de Rafael Cuevas por sus acertados consejos técnicos.

Los datos han sido facilitados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

8. Bibliografía

- Andreu, J. y J. Capilla. 1.991. El modelo de gestión de cuencas SIMGES. Curso sobre Modelos de Gestión de Sistemas de Recursos Hídricos, CEDEX, Madrid.
- Andreu, J.; J. Capilla; E. Sanchís y P. Tormo. 1.993. AQUATOOL: sistema soporte de decisión para la planificación de recursos hídricos. Manual del usuario. Servicio de Publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia.
- Andreu, J.; J. Capilla y F. Cabezas. 1.994. Los sistemas soportes de decisión en la planificación y gestión racionales de los recursos hídricos. Ingeniería del Agua, 1(2):7-20.
- Relaño, J.A. 1.995. Gestión de recursos hídricos para uso agrícola en la cuenca del río Guadalquivir.
- Smith, M. 1.993. CROPWAT. Programa de ordenador para planificar y manejar el riego. Estudios FAO: Riego y Drenaje, nº 24. Roma.

EFFECTO DEL AGUA APLICADA SOBRE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN UN CULTIVO DE REMOLACHA AZUCARERA

Guirao Sola, J.(P); de Benito Muñoz, A.¹

Resumen

Durante los años 1994 y 1995 se llevó a cabo el estudio de la lixiviación de nitratos en un cultivo de regadío (remolacha azucarera) en la Vega del Río Pisuerga. Teniendo como objeto del estudio ver el efecto del riego y de la fertilización nitrogenada en las pérdidas de nitrógeno hacia las aguas superficiales y profundas. En dichos ensayos se experimentó durante el año 1994 con dosis de agua y la fertilización habitual de la zona y del cultivo (180 UFN/Ha), y durante el año 1995 con dos dosis de riego (similares a las del año 1994) y dos fertilizaciones nitrogenadas (la habitual, 180 UF y otro mayor, 234 UF). Los resultados de dicho ensayo dan una clara influencia del agua de riego y la fertilización en la lixiviación de nitratos, de modo que pequeños incrementos de agua aplicada (en torno a 100 mm más /ciclo) supone que el aumento de nitrógeno lixiviado lo hace en un 50 %. Por otro lado incrementos de fertilización (30 % más) aumentan la lixiviación de nitratos hasta un 60%. En estos mismos ensayos se observó que aplicar agua y abono en exceso llegan a duplicar la cantidad de nitratos lixiviados con respecto a lo que ocurre en unas prácticas agronómicas normales (riego y fertilizaciones normales)

Summary

During 1994, 1995 nitrate leaching research was carried out on an irrigation crop (sugar beet), in the Pisuerga Valley. The aim of the experiences was to study the irrigation and nitrogen fertilizations effects in the nitrate leaching in superficial and ground water. In 1994 the nitrogen fertilizer doses was the habituals for the crop and zone (180 UFN/Ha), in 1995 there were two fertilization (habitual level, 180 UFN/Ha, and 234 UFN/Ha). Both years had two doses of irrigation (close by hidric necessity of the crop, and other more larger). The trial results showed a clear influence of irrigation and nitrogen fertilization rate in nitrate leaching, so little increments of applied water (100 mm more than standard)increased nitrate leachig was increased by 50%. At the same time an increase of 30 % in nitrogen fertilization (30% more) produced 60% increased in the nitrate leaching. Irrigation and nitrogen fertilizer applied in excess to the crop, could lead to the duplication of nitrate leaching and produced by normal practices.

Introducción

En la actualidad la superficie permanente de regadío en Castilla y León, tanto con aguas superficiales como profundas, asciende a unas 550.000 Ha (Junta Castilla y León, 1994). Es previsible además, según las mismas fuentes, que en el plazo de unos años se pueda llegar a una superficie de regadío en torno a las 900.000 Ha. No hay duda del potencial productivo de los suelos de regadío sobre todo en zonas semiáridas en las que climatológicamente se encuadra Castilla y León, y en la que una superficie del 13% del total de las tierras cultivadas, que es el ocupado por las áreas regables, produce más del 50% de los ingresos totales del sector agrario.

Pero no se puede olvidar, por otro lado, el gran potencial contaminante que conllevan las prácticas agrícolas de regadío, debido principalmente a la utilización de mayores cantidades de abono y fitosanitarios. Por lo que en vista de los precedentes y de las perspectivas de futuro, surge la preocupación por abordar dentro de la investigación agraria de la región el problema de la lixiviación de nitratos en cultivos de regadío.

La fertilización de cultivos de regadío lleva consigo un gran aporte de abono nitrogenado, principalmente como nitrato, que es la forma más soluble y fácilmente asimilable por la planta. El exceso de este fertilizante, no utilizado por la planta, se lixivia fácilmente incorporándose a las aguas superficiales

¹Servicio de Investigación Agraria. Valladolid. Junta de Castilla y León

Los problemas medio-ambientales de la presencia de nitratos en las aguas, tanto superficiales como profundas, han sido largamente estudiados y su amplitud abarca desde la eutrofización de las aguas superficiales, hasta los problemas sanitarios de la ingestión de agua con elevada concentración de nitratos.

En Castilla y León el problema de la contaminación de las aguas subterráneas con nitratos, se encuentra en una fase que todavía no se puede considerar alarmante, pudiendo decirse que salvo algunos puntos negros, se encuentra en buena situación. Es precisamente ahora cuando parece oportuno abordar el problema desde un punto de vista preventivo, teniendo en cuenta la perspectiva de aumento de las áreas de regadío.

Los principales factores dentro de las prácticas agronómicas de regadío, causantes de la lixiviación de nitratos son principalmente los incorrectos manejo del riego y de la fertilización (Guirao, 1992). Así continuando estudios de este Servicio de Investigación Agraria, se ha tratado de profundizar en la influencia de estos factores en la lixiviación de nitratos en un cultivo de regadío. Puesto que la remolacha azucarera es el cultivo más representativo de los regadíos de Castilla y León, y además es uno de los que soportan una alta fertilización nitrogenada, ha sido el escogido para realizar el presente estudio.

Material y Métodos

Los experimentos se realizaron, durante los años 1994 y 1995 en la finca Zamadueñas del Servicio de Investigación Agraria, Valladolid, Junta de Castilla y León, dentro de una parcela ubicada en la llanura aluvial del Valle del Pisuerga, con un suelo de textura franco-arcillosa, muy homogéneo y con buena permeabilidad.

En esta superficie se planteó una experiencia de riego y fertilización nitrogenada en remolacha, utilizando un diseño de fuente lineal de riego por aspersión (Hanks et al, 1976), para poder diferenciar en la experiencia distintos tratamientos de agua. Las dosis de abono se aplicaron al azar en bandas perpendiculares a la línea fuente en todos los tratamientos de agua. Se diferencian 5 niveles de agua aplicada en dirección perpendicular a la línea de aspersión, para cada una de las dos mitades de la fuente, y considerando para nuestro caso dos: el nivel central y el más próximo a la fuente.

La remolacha se sembró con máquina de precisión a 0,50 m. entre líneas, a una densidad de 80.000 plantas/ha en los primeros días de abril siendo el cultivo precedente girasol, utilizando semilla monogermen, realizándose las labores normales del cultivo.

La dosis de fertilizante utilizada en 1994 fue la habitual de la zona para el desarrollo del cultivo, 180 U.F./ha de nitrógeno, 105 U.F./ha de fósforo y potasa. En el año 1995 se aplicó además otra dosis más de 234 UFN/ha (un 30% más de lo habitual). El abonado nitrogenado se realizó en sementera en forma amoniacal con 1/3 de la dosis total y en cobertera los otros 2/3 en forma de nitrato amónico cálcico, 27%.

El desarrollo del cultivo fue normal necesitándose controlar el oidio y el pulgón en dos ocasiones. Se recolectó en la primera semana de Noviembre, cortándose el riego a finales de Septiembre.

El agua a aplicar en cada riego se calculó a través de un balance hídrico en la parcela, teniendo en cuenta el contenido de agua del suelo, la precipitación, el riego, la evapotranspiración del cultivo. El agua aplicada con riego y lluvia se midió mediante pluviómetros instalados en la parcela, en líneas perpendiculares a la fuente lineal. El riego así controlado se estableció para obtener dos dosis de agua: **Dosis 1**, correspondiente a las necesidades de agua del cultivo, y **Dosis 2**, a un riego sobredimensionado.

La toma de muestras de la solución de suelo, para calcular la cantidad de nitrógeno lixiviado se realizó mediante tubos de succión a vacío colocados a 1.50 m de profundidad, de forma semanal desde el mes de Junio hasta Septiembre, siendo desde el corte de riego hasta la recolección de forma quincenal.

Las muestras de agua de drenaje así recogidas se analizaron mediante Cromatografía de Líquidos

Iónica (Antonissen 1986).

El cálculo de la cantidad de drenaje de agua se realizó mediante balance de los cloruros. (Ramos 1987, Slavich 1990)

Resultados y discusión

En la tabla 1 se presenta un cuadro resumen, donde se recogen los datos totales de las dosis de agua aplicada en mm (lluvia más riego), la habitual y otra mayor, las cantidades de fertilizante nitrogenado utilizado y los nitratos lixiviados (expresados en kg de Nitrógeno lixiviado/ha), para el ciclo completo de cada año.

	Año 1994		Año 1995			
Fertilizante (UF/ha)	180		180		234	
Agua aplicada (mm)	735,7	824,5	712,6	842,5	712,6	842,5
Nitratos lix. (kg N/ha)	31,42	45,46	32,42	46,77	51,30	68,60

Tabla 1. Nitratos-N lixiviados/ha totales para dos dosis de agua. Años 1994 y 1995

En la tabla 2 se presentan los resultados de lixiviación de nitratos obtenidos y expresados en Kg N-Nitratos/ha, para todas las fechas de muestreo, con su correspondencia en días transcurridos entre las distintas fechas en las que se establece el balance, en los distintos años de realización de la experiencia, y para cada ensayo de fertilización.

En la gráfica 1 se muestran las diferencias de las cantidades totales lixiviadas de nitratos según la dosis de agua, fertilizante y para cada año.

En las gráficas 2, 3 y 4 se representan los lixiviados de N-Nitratos frente al tiempo transcurrido tras la puesta de tubos (siembra) a lo largo del ciclo, para cada una de las dosis de riego, y año respectivamente. En cada gráfica se diferencia claramente dos partes, la de la izquierda que muestra los valores discretos de lixiviación de nitratos entre las distintas fechas de muestreo y la de la derecha que muestra los valores acumulados a lo largo del ciclo.

Los datos de lixiviación de nitratos entre las distintas fechas de muestreo, varían de forma diferente según el período y fecha considerado. Así se puede decir que los valores más altos se corresponden siempre para los riegos más abundantes, y a continuación del abonado de cobertera, decreciendo con el corte del riego, y períodos sin precipitaciones.

Año 1995 Fertil. 234 UFN/ha

Fecha Muest	Días	Dos.1 712mm	Dos.2 842mm
12Jul	88	19,22	24,24
19Jul	7	4,64	2,03
28Jul	9	3,75	7,57
04Ag	7	1,49	7,61
17Ag	13	6,69	5,05
25Ag	8	5,60	8,82
01Sep	7	8,07	8,42
12Sep	11	0,12	2,73
22Sep	10	0,09	0,03
06Oct	14	0,62	0,61
06No	31	1,04	1,45
Total	205	51,33	68,56

Año 1995 Fertil.180 UFN/ha

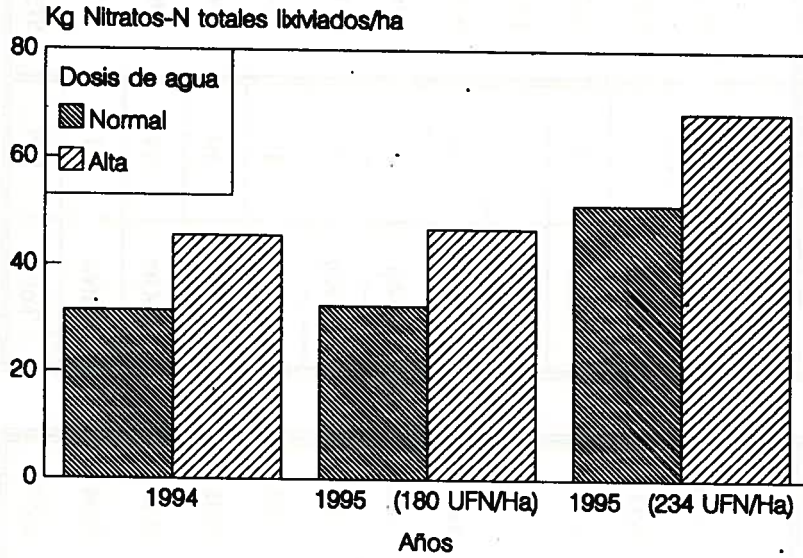
Fecha Muest	Días	Dos.1 712mm	Dos.2 842mm
12Jul	88	18,21	23,53
19Jul	7	1,02	0,95
28Jul	9	1,57	3,15
04Ag	7	1,41	2,20
17Ag	13	2,24	4,02
25Ag	8	2,04	3,02
01Sep	7	4,34	7,86
12Sep	11	0,55	0,92
22Sep	10	0,01	0,01
06Oct	14	0,18	0,17
06No	31	0,85	0,94
Total	205	32,42	46,77

Año 1994 Fertiliz. 180 UFN/ha

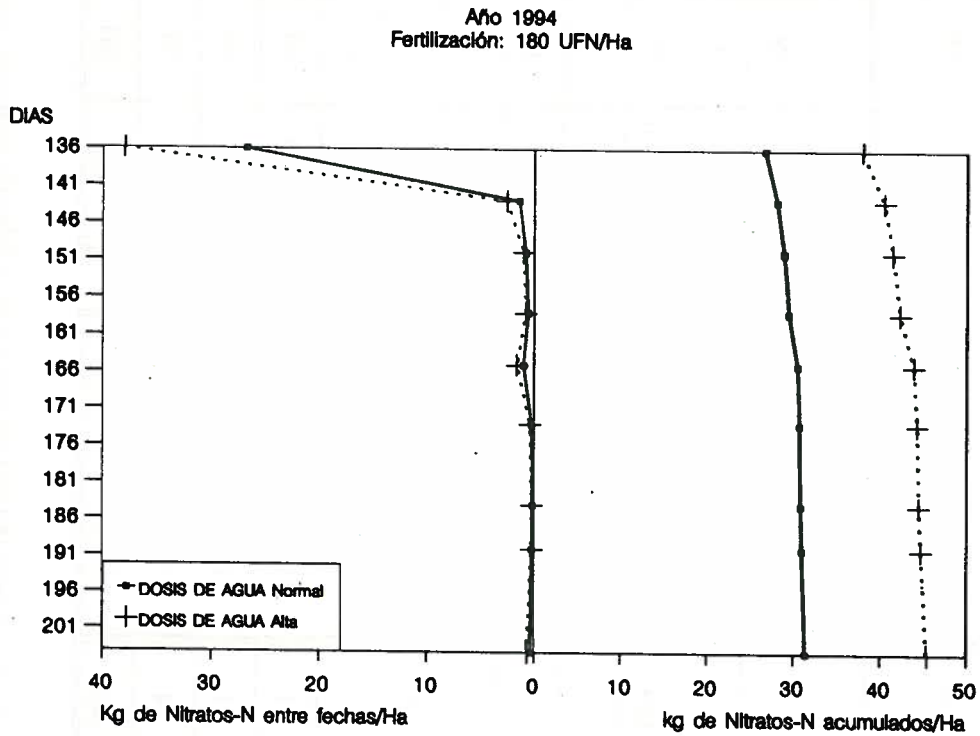
Fecha Muest	Días	Dos.1 736mm	Dos.2 825mm
24Ag	136	26,75	37,98
31Ag	7	1,38	2,56
07Sep	7	0,80	1,00
15Sep	8	0,58	0,81
22Sep	7	1,01	1,61
30Sep	8	0,24	0,39
11Oct	11	0,12	0,20
17Oct	11	0,17	0,24
31Oct	14	0,37	0,67
Total	209	31,42	45,46

Tabla 2. Lixiviación de nitratos (kg NO₃-N/ha), en un cultivo de remolacha azucarera para dos dosis de agua. Años 1994 y 1995

Años 1994 y 1995

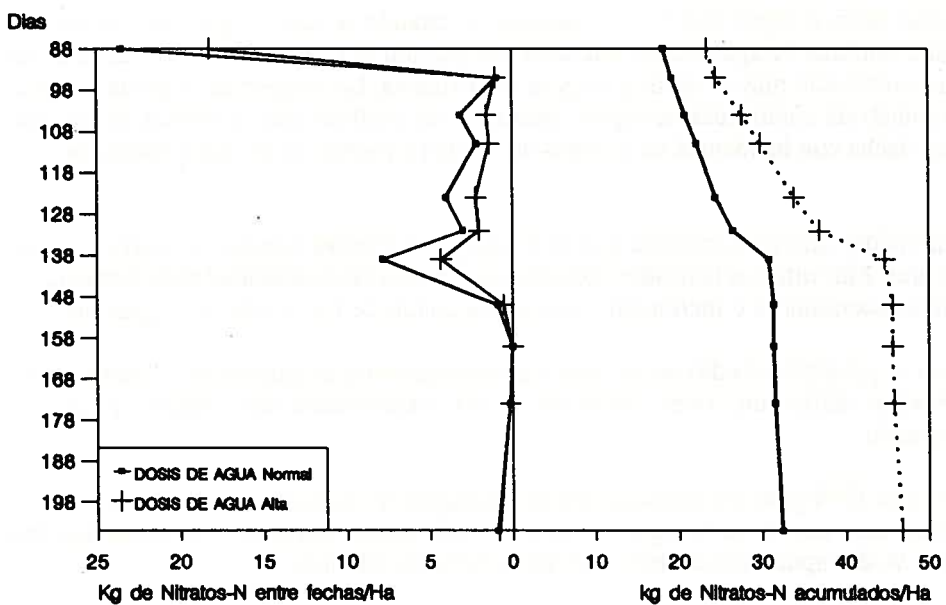


Gráfica 1.- Lixiviación de nitratos para cada año y según la dosis de agua y cantidad de fertilizante añadido.



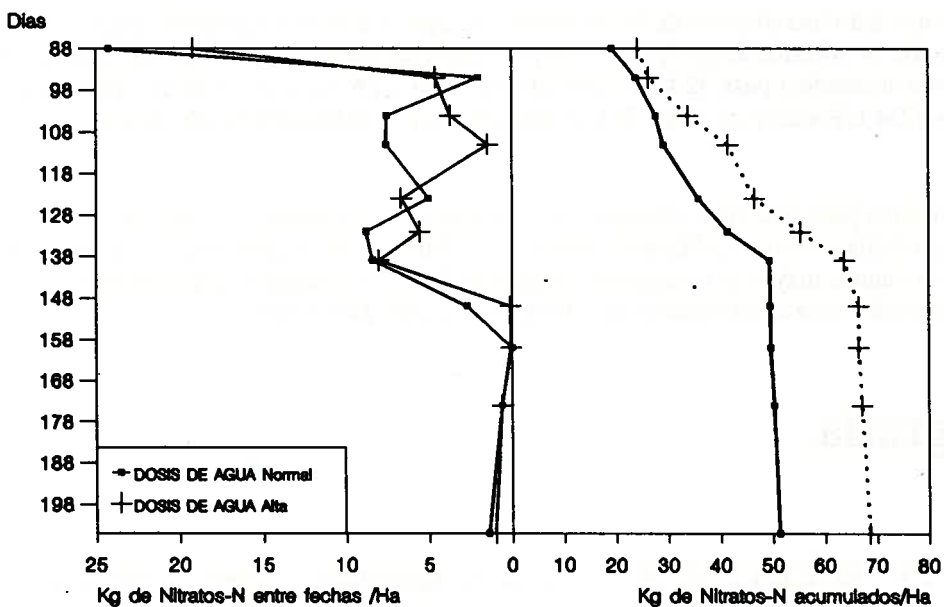
Gráfica 2.- Lixiviación de nitratos a lo largo del ciclo (días tras puesta de tubos), para dos dosis de agua, 180 UFN de fertilización/Ha. Año 1994.

Año 1995
Fertilización: 180 UFN/Ha



Gráfica 3.- Lixiviación de nitratos a lo largo del ciclo (días tras puesta de tubos), para dos dosis de agua, 180 UFN de Fertilización/Ha. Año 1995.

Año 1995 .
Fertilización: 234 UFN/Ha



Gráfica 4.- Lixiviación de nitratos a lo largo del ciclo (días tras puesta de tubos), para dos dosis de agua. 234 UFN de Fertilización/Ha. Año 1995.

Conclusiones

¿ Regar bien, o regar mal ?. Y normalmente cuando se dice "regar mal", se entiende regar en exceso, con una cantidad de agua mayor que la necesitada por el cultivo. Las consecuencias entre un riego correcto o incorrecto son muy diversas y de gran importancia. La primera es la de un despilfarro de agua en una zona semiárida como nuestra región, otra es la de posibles disminuciones de producciones en el cultivo de remolacha con incidencia en factores de calidad y pureza de los jugos sacáricos (Mompin et al., 1991, 1992).

Y sin olvidar otra consecuencia que es el objeto de nuestro estudio, se incrementa la cantidad de nitratos lixiviados. Más nitratos lixiviados (puesto que evitarlo en su totalidad prácticamente es imposible) implica pérdidas económicas e incrementa la contaminación de los acuíferos y aguas subterráneas.

Así en el presente estudio se ve clara y meridianamente la diferencia en cuanto a la cantidad de nitratos lixiviados entre un riego próximo a las necesidades del cultivo y otro fuertemente sobredimensionado.

En el año 1994 para un riego normal la lixiviación de nitratos alcanza hasta el 18% (31,4 kg de N) del aportado para una dosis de agua aplicada normal, incrementándose esta cantidad hasta 45 kg de N lixiviado (25 % del aportado) cuando el riego lo hace en 100 mm.

En el año 1995 los resultados son muy similares a los del 94, para dosis de agua y fertilización parecidas (180 UF N/ha), así se lixivían 32,4 Kg de N (18% del aportado) para una dosis normal de agua aplicada, incrementándose esta cantidad hasta 46.77 Kg de N (26% del aportado) cuando el riego lo hace en algo más de 100 mm. Pero para dosis de agua idénticas la fertilización excesiva modifica las cantidades de nitratos lixiviados, así cuando fertilizamos con 234 UFN/ha nos encontramos que la lixiviación de nitrógeno para una cantidad de agua aplicada normal es de 51,3 Kg de N/ha (se aumenta un 60 % la cantidad de N lixiviado con respecto a la fertilización de 180 UF/ha), mientras que cuando la dosis de agua aplicada es muy alta la lixiviación de nitrógeno alcanza valores cercanos a 70 Kg de N/ha lo cual supone que la lixiviación de nitrógeno aumenta un 33% con respecto a cuando fertilizamos con 180 UF/ha manteniendo la misma cantidad de agua aplicada.

Por otro lado incrementos de fertilización conjugados con un riego inadecuado y alto puede hacer que la lixiviación de nitratos con respecto a la que ocurre en unas prácticas agronómicas normales (riego y fertilizaciones normales) pase 32 kg N lixiviados/ha (180 UFN/ha y un riego de 712 mm) a 63 Kg de N Lixiviados/ha (234 UFN/ha y un riego de 843 mm) es decir la lixiviación de nitratos aumente hasta en un 100% .

Se observa pues una clara respuesta del riego excesivo en cuanto a al lixiviación de nitratos en un cultivo de remolacha azucarera, abonando con la dosis habitual de la zona para el cultivo. Esta influencia es tanto mayor cuanto mayor es la cantidad de agua aplicada. Y además si combinamos un riego excesivo con una fertilización alta la lixiviación de nitratos se ve muy aumentada.

Bibliografía.

- JUNTA CASTILLA Y LEÓN. Consejería de Agricultura y Ganadería. Memoria 1994.
- ANTONISSEN, A.H.M.A. "Cromatografía iónica- Aplicaciones basadas en H.P.L.C.". Millipore. 1986.

- GUIRAO, J.; BENITO, A. GARCIA, M.A.; " Lixiviación de nitratos en un cultivo de remolacha azucarera para dos dosis de riego". Comunicación en las XI Jornadas Técnicas de Riegos y Drenajes. Valladolid 2-4 Junio, 1993.
- HANKS, R.J., KELLER, J., RASMUNSEN, V.P. and WILSON, G.D. 1976. "Line source sprinkler for continuous variable irrigation-crop production studies". Soil Sci. Soc. Am. J. 40: 426-429.
- MOMPIN, A.; LOPEZ, T.; BENITO, A.; GUIRAO, J.; "Sugar-beet yield response to water and nitrogen in the duero valley". 56th Winter Congress International Institute for Beet Research. Bruxelles, Palais des Congrès, 10-11 Février 1993.
- RAMOS, C. "The use of the chloride balance method for estimating nitrate leaching". Nitrogen efficiency in agricultural soils. Ed. by D.S. JENKINSON AND K.A. SMITH. 1988.
- SAS. INSTITUTE INC. 1985. Cary, North Carolina.
- SLAVICH, P.G.; YANG, J. "Estimation of field scale leaching rates from chloride mass balance and electromagnetic induction measurements" Irrigation Science. 1990. 11:7-14

XIV CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS

II

COMUNICACIONES

**GRUPOS DE TEMAS C Y D
RECIBIDOS FUERA DE PLAZO
Y
PRESENTACIONES ESPECIALES**

AGUADULCE, ALMERÍA, 11-13 DE JUNIO DE 1996

GRUPO DE TEMAS C
INGENIERÍA DEL RIEGO

PRESENTACIÓN ORAL

DISPOSITIVO DE AFORO DE POZOS DE SONDEO¹

Autor : Gómez Pompa, P.²

Resumen:

El aforo de pozos puede hacerse por el método de caudal constante que resulta de aplicación complicada con bombas centrífugas. El autor presenta un dispositivo que incorpora un regulador de presión, un limitador de caudal y una sonda electrónica cuyos registros analizados por un ordenador permiten relacionar los tiempos con las alturas de lámina en el pozo. De estos datos se deduce una relación entre los niveles de agua en el pozo y los caudales producidos.

El dispositivo proyectado puede suministrar datos en un período de tiempo relativamente reducido que permiten seleccionar la bomba más adecuada y ajustar el mejor campo de funcionamiento atendiendo a las necesidades de suministro, las diferentes producciones del pozo a los diferentes niveles y el resto de las condiciones de marcha.

Abstract:

Well flow gauging is made in different ways. Constant wealth method results from application complicated with centrifugal pumps. Author presents a device with pressure and wealth regulators, and electronical probe whose records analyzed by a computer give the relation betwin well water level and well wealth.

With these test, in a short time is posible to chose the best pump and the best operation field attending to the supply needs, the different produccctions of the well from the different levels and rest of pumping conditions.

Antecedentes

El aforo de los caudales producidos por pozos es una operación cara y lenta. El resultado del aforo puede no ser muy duradero al cambiar las condiciones del acuífero. Un buen estudio previo de éste garantiza buenas probabilidades de acierto en el aforo y sobre todo en su evolución futura con el inconveniente de su elevado costo, pero si se desea utilizar un pozo de sondeo con una bomba bien seleccionada, es preciso disponer de un buen conocimiento de los caudales que puede producir el pozo a las distintas profundidades de la lámina de agua. En los pozos de sondeo no surgentes, la lámina de agua oscila frecuentemente decenas de metros y esto implica fuertes oscilaciones del caudal bombeado si se utiliza una bomba centrífuga.

El aforo de un pozo de sondeo se hace frecuentemente introduciendo una bomba potente, e intentando estabilizar el caudal producido. El método de Mendes de Sousa, utiliza ciclos de vaciado y llenado pero no es admisible cuando la altura manométrica de bombeo oscila mucho. Esta idea ha servido para diseñar el dispositivo que se presenta.

Se ha pretendido producir un prototipo de equipo que permita el aforado

¹ Available in English

² Doctor Ingeniero Agrónomo. De la Universidad de Extremadura

económico y rápido de un pozo de sondeo sin perder precisión frente a la metodología habitual de estabilizar el flujo por medio del manejo de la llave de descarga.

Este proyecto de investigación ha sido cofinanciado por la CICYT a través de la Universidad de Extremadura y la empresa ACOSTA de riegos.

Fundamentos científicos

El método de Mendes de Sousa establece en uno o varios ciclos de vaciado-llenado, que el caudal promedio producido por el pozo es el siguiente

$$Q = q \cdot \frac{t1}{t1 + t2}$$

En la ecuación anterior:

Q = caudal del pozo en litros por segundo

q = caudal de bombeo

t1 = tiempo de vaciado

t2 = tiempo de llenado

La fórmula está basada en el uso de un caudal de bombeo constante que puede lograrse con una bomba de pistón o con un dispositivo como el que hemos usado para el empleo con bombas centrífugas.

Dispositivo ensayado

Se han proyectado y ensayado variantes de un dispositivo basado en una sonda electrónica que envía lecturas de nivel con un margen de error muy pequeño a un ordenador, cuando se bombea el pozo.

En el modelo ensayado, usamos una electrobomba de 10 CV que forma un conjunto "buzo" con el motor, y se gobierna mediante un cuadro de maniobra cuyo elemento principal es un contactor de potencia. Hay un relé cuya bobina viene activada por la salida de un ordenador que es quien gobierna todo el sistema.

En el cuadro se incluyen también, juego de fusibles, térmico, y conexiones para la entrada de señal del controlador.

El elemento electrónico de medida es una sonda provista de un captor de presión que envía su señal a un "rack" en el que se ha montado una botonera de mando y un panel de ajuste. La señal enviada se traduce en una variación miliamperimétrica que, previamente tarada, se hace llegar al ordenador para poder leer un registro de altura de agua sobre la sonda. La precisión de la sonda es de 25 cm. lo que exige un tarado bastante afinado con suficiente profundidad para no introducir un error sistemático importante en las lecturas de números grandes.

El prototipo diseñado y ensayado fundamentalmente, consistió en una unidad de bombeo acoplada a una tubería de descarga en cuyo extremo de salida había conectado un regulador de presión seguido de una tubería en tridente distribuidora que terminaba en tres salidas equipadas cada una de ellas, con una llave de paso de esfera y un limitador de caudal. Desaguaban en un colector que permitía alejar el agua bombeada.

Un modelo de control se realizó mediante un PC conectado al controlador de sonda. Para evitar las perturbaciones que el flujo dentro del pozo, y la aspiración pudieran causar, el sensor de nivel se protegió adecuadamente.

Las medidas de nivel se relacionan en el ordenador, con las de tiempo reglado por el reloj interno del PC, proporcionando curvas [tiempo-profundidad], al mismo tiempo que se envían órdenes al relé para la parada o arranque de la bomba.

Una pantalla muestra en ordenadas, la profundidad del pozo desde su boca hasta el nivel de seguridad de bombeo. En abscisas, se representa el tiempo en escala variable, que presenta un valor por defecto que permite introducir en la pantalla, los datos captados en 300 minutos tomados cada 15 segundos con una precisión de 0.25 %, muy por encima de lo necesario en la práctica (dependiendo de la precisión del tarado inicial).

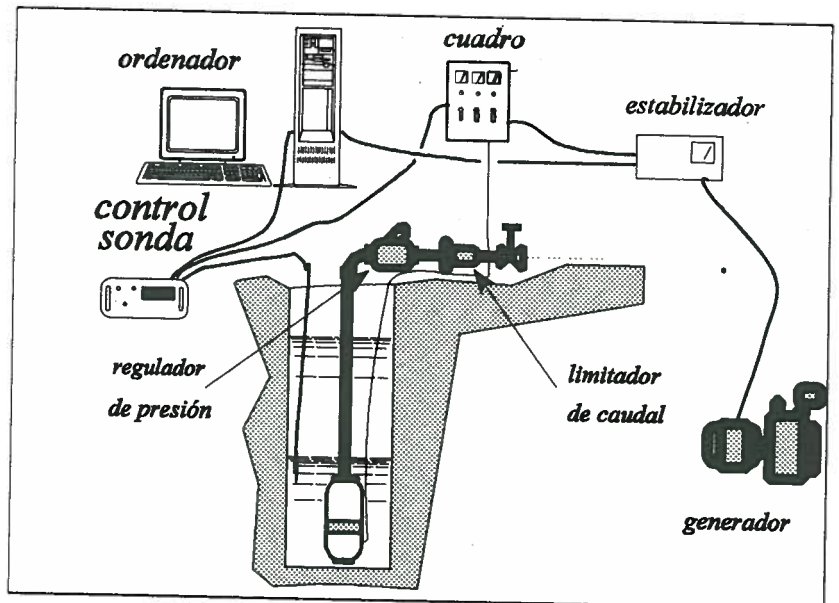


Ilustración 1 El ordenador detecta en cada tiempo el nivel del agua en el pozo y emite la información en forma de gráfico

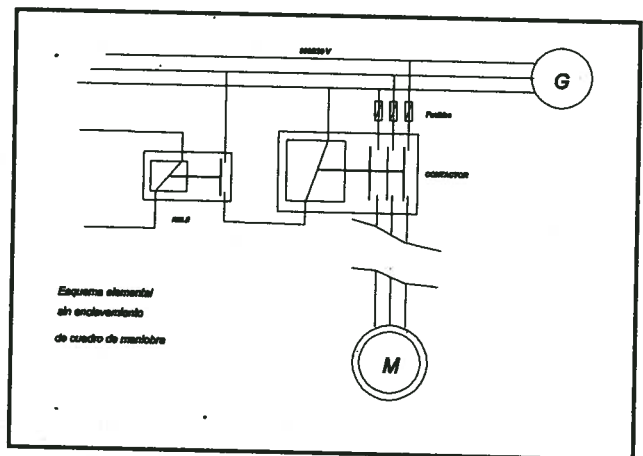


Ilustración 2 Esquema eléctrico del cuadro de maniobra de la electrobomba con corriente de generador trifásico

El programa permite decidir el momento de arranque y parada, interrumpir el proceso y reiniciarlo, almacenando los datos para un posterior estudio y análisis. Además, gobierna el cuadro de maniobra y decide la parada o arranque automático del

sistema cuando es necesario. En tal caso, en la pantalla, se representa la curva [tiempo-nivel], que proporcionará la información necesaria para decidir posteriormente la bomba más adecuada. Los datos [tiempo-nivel] se elaboran mediante una hoja de cálculo Excel5 para transformarlos en datos [nivel-caudal].

La corriente trifásica puede obtenerse de red como en nuestros primeros ensayos, o mediante un generador trifásico con motor diesel de 40 CV como se ha hecho en los que no disponíamos de red eléctrica.

UTILIZACIÓN DEL DISPOSITIVO PARA EL AFORO

Un ensayo típico comienza por la instalación del dispositivo de aforo que se ha descrito. Si el pozo es de nueva apertura, puede ser preciso vaciarlo varias veces antes de hacer el aforo, porque si tiene mucho lodo, el agua sucia puede deteriorar los aparatos hidráulicos instalados.

Seguidamente se detiene el bombeo para dejar que el pozo se recupere.

Recuperado el nivel, se comienza el ensayo con el limitador de caudal de mayor tamaño que debe proporcionar una curva de descarga de muy poca amplitud en abscisas. A la vista de la forma de esa curva, se continúa el ensayo o se detiene y se continúa con otro limitador menor lo que proporcionará una curva más tendida. El ideal es que el rango de abscisas de esta curva entre en un tercio de la pantalla. El dispositivo dibuja la curva mixtilínea correspondiente al uso de los distintos limitadores de caudal. Si el caudal no es muy superior a lo necesario, la fracción de curva que interesa es la que corresponde a la tercera parte inferior de la zona perforada del manto productivo.

Si la curva presenta una rama asintótica horizontal próxima al nivel bajo de seguridad, el ensayo ha determinado todo lo necesario para seleccionar la bomba. El caudal del pozo a la profundidad de estabilidad es el del limitador.

Si la curva alcanza el nivel de seguridad, el ordenador parará la electrobomba y comenzará a dibujar la curva de recuperación. Si el tiempo transcurrido es superior a 15 minutos desde el comienzo del ensayo, una vez dibujada la curva de recuperación, tendremos datos suficientes para seleccionar la bomba adecuada.

Obtenida la curva [caudal-nivel] podemos seleccionar la bomba a emplear en el uso definitivo.

El aforo de los caudales suministrados por el pozo dependerá de los niveles entre los que deseemos que trabaje la electrobomba a instalar.

En principio, para que el contactor de potencia de un motor tenga tiempo de recuperarse del calor producido por el corte de corriente en carga, es recomendable que no se produzca un número elevado de arranques cada hora³. Para grandes estaciones de bombeo que utilizan motores a media tensión, el número de maniobras por hora puede reducirse a dos solamente, pero ése no es el caso más frecuente en pozos de sondeo.

³ El número de maniobras que puede admitirse en una hora, depende de la potencia de la máquina, de la conexión de arranque, de la situación del armario de maniobra y de las temperaturas a soportar en la época de funcionamiento. En todo caso, es posible que un contactor que sufra recalentamiento por una frecuencia de maniobras muy alta, pueda substituirse por otro de mayor capacidad lo que evite el problema de colapso.

Si se adopta un tiempo T entre dos maniobras sucesivas de la bomba, bastará con llevar ese tiempo a la escala de abscisas de las curvas sucesivas de descarga y recarga del pozo para poder establecer la posición de las sondas de nivel de parada y rearme. La ilustración 3 adjunta aclara la teoría expuesta.

Como se conoce el caudal bombeado en ese tiempo, puesto que estamos bombeando a caudal constante, se deduce inmediatamente el volumen producido por el pozo en el intervalo de tiempo y de aquí, el caudal promedio.

La operación siguiente debe ser seleccionar una bomba que posea una curva de funcionamiento adecuada a los niveles y caudales a que pretendemos operar.

En un manto freático de mayor potencia que la profundidad del pozo, cuanto más profunda sea la cota media del bombeo en relación con la cota freática, más carga media se aprovecha y la producción del pozo es mayor. Pero en contra, el intervalo entre dos maniobras sucesivas puede ser menor, la producción media de la maquinaria bajará y la duración de los contactores, también.

Si el espesor del manto es pequeño, el bombeo más productivo se debe conseguir aproximadamente en la cota inferior de la intersección de ese manto con el pozo.

La incidencia de los equipos electromecánicos de maniobra en el diseño de un bombeo es muy importante.

Ensayo de tiempo-nivel en bombeo a caudal constante desde pozo.

En principio, se ha dispuesto de dos pozos que la empresa colaboradora en el estudio (Acosta S.A.) ha perforado en las proximidades de Badajoz en una finca de su propiedad, pero los ensayos han podido comenzar en un pozo perforado en la finca "Santa Engracia" en la carretera de Badajoz a Cáceres, donde se halla instalada la Escuela de Ingenierías Agrarias de la Universidad de Extremadura. Este pozo ha dado un caudal muy pobre.

Una vez modificado y ajustado el software de captación de datos de nivel de agua dentro del pozo, hemos comprobado diversas apreciaciones:

Las mediciones de la sonda no resultaban alteradas por la turbulencia del flujo dentro del pozo, siempre que la sonda se colocó 4 metros por encima de la bomba. No se hicieron comprobaciones colocando la sonda a menor distancia.

Es preferible utilizar en el aforo, electrobombas de potencia bastante mayor que la prevista para el pozo porque un defecto de potencia causa perturbaciones en los caudales tarados por el limitador.

El movimiento creado por el par del motor tiende a enroscar la sonda alrededor de la tubería. En la mayoría de los ensayos hemos trabajado con la sonda fijada a la

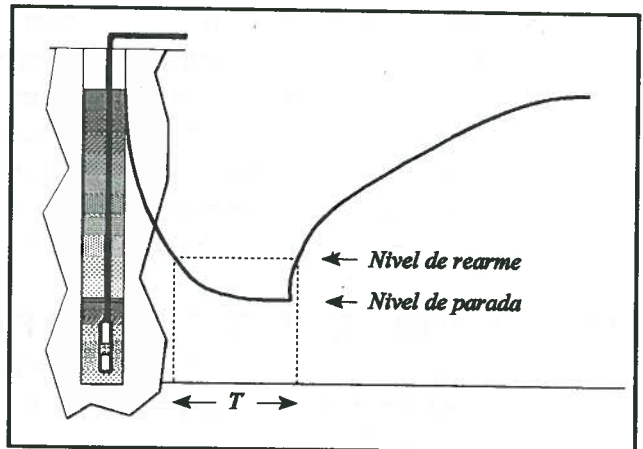


Ilustración 3 Ajuste del tiempo entre dos maniobras sucesivas

tubería. El agua bombeada en el ensayo no debe verterse a tierra en las proximidades del pozo porque podría retornar al mismo.

VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

La fiabilidad de los resultados de cualquier ensayo depende en gran parte de los contrastes de los valores obtenidos pero también de que los instrumentos utilizados en los ensayos estén correctamente calibrados.

En el caso que nos ocupa, las medidas afectan a tres parámetros: nivel de agua en el pozo, tiempo y caudal de bombeo. La presión de salida es un elemento secundario que depende del correcto calibrado del regulador de presión, y no influye en los resultados definitivos. De todas formas, también se comprueba para evitar resultados anómalos en caso de una distorsión muy fuerte en su funcionamiento que podría desviar los valores de los limitadores de caudal.

La correcta medida de la sonda de niveles se ha verificado periódicamente mediante una lectura de cinta métrica embadurnada de tiza y sumergida mediante un contrapeso.

Los limitadores de caudal han venido tarados de fábrica (Contafluid de Barcelona) en cuyo laboratorio se ha hecho un cuidadoso ajuste teniendo en cuenta el fin perseguido. Pero como en el transcurso de los viajes e instalación en los lugares de ensayo, podrían haber sufrido algún desajuste, periódicamente se ha comprobado su medida vertiendo el agua de un sondeo a un bidón de 200 litros aforado. Para evitar errores de lectura en arranque y parada, se marcaron señales en las paredes del bidón y se introdujo el agua con un tubo llegando al fondo del mismo para eliminar las desviaciones producidas por turbulencias.

El tiempo se ha contrastado con un cronómetro Heuer de precisión más que suficiente para las medidas realizadas. El tiempo registrado por el ordenador se ha comprobado únicamente cuando está alimentado por grupo electrógeno. En los ajustes hechos con alimentación por red, se ha considerado de suficiente precisión. Todas las comprobaciones hechas en relación con el tiempo dieron como resultado una precisión muy superior a la requerida en el estudio. Conviene destacar que un error en las lecturas de tiempo inferior a 1 segundo por hora no altera la validez de los resultados del ensayo puesto que los errores relativos, admisibles en las bombas comerciales son muchísimo mayores (entre 15 y 40 veces más)

ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS EN RELACIÓN AL USO DEL DISPOSITIVO

Aunque el estudio no está concluido al terminar de escribir este trabajo, es posible y conveniente analizar críticamente los ensayos realizados señalando los posibles puntos de controversia y los problemas futuros a resolver.

* El tiempo lluvioso ha sido un fuerte obstáculo en la investigación. Con el terreno empapado de agua, se obtenían registros absolutamente anómalos.

* El dispositivo ensayado ha necesitado de un ajuste en los limitadores de caudal que en principio, no estaban tarados para el vertido a la presión atmosférica.

* Se ha ensayado la modificación del caudal extraído directamente en el ensayo. Es incluso conveniente porque la forma de la curva obtenida informa sobre el mejor ajuste del dispositivo. Cuanto más tendida es la curva en el último tramo del ensayo, la precisión es mayor.

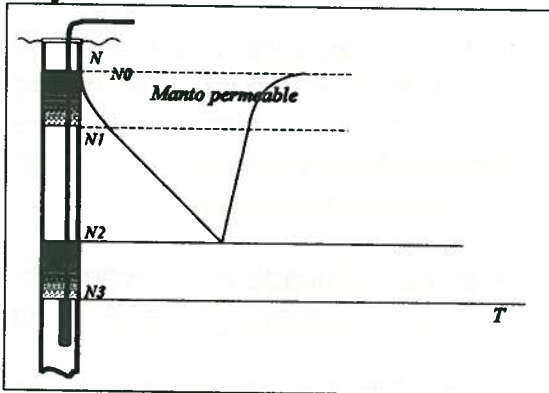


Ilustración 5 Pozo con manto permeable que ha sido perforado en exceso.

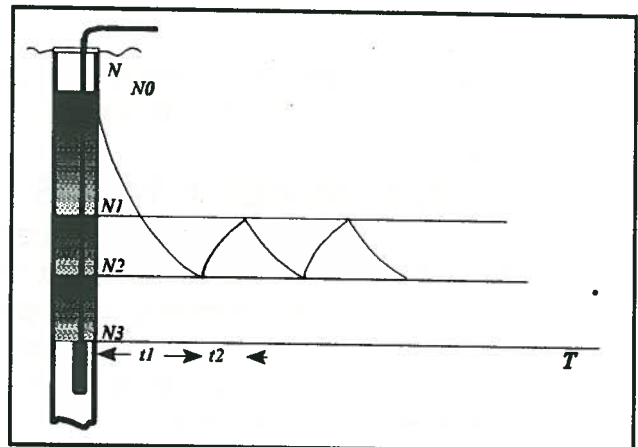


Ilustración 4 Curva de descarga típica en un pozo no surgente y cuyo acuífero ocupa una capa de permeabilidad homogénea que baja a mayor profundidad que el nivel N3.

* Las diferentes formas de curva que pueden obtenerse pueden ser atribuidas a distintos tipos de carga en el pozo. Véanse las ilustraciones 4 y 5. Hacer bajar el nivel del pozo hasta el valor N2 es conveniente en la I4 porque se obtiene mayor producción, mientras que en la I5, solo conduce a un mayor gasto de energía.

* Conviene continuar los ensayos con variantes del dispositivo. Especialmente pueden considerarse dos que ya se han montado y cuyos ensayos están en marcha:

- Ajuste de la relación nivel-caudal mediante un varistor que modificará el caudal bombeado proporcionalmente al número de revoluciones de la bomba.
- Substitución de la descarga tarada por un caudalímetro cuyos registros se pasan al ordenador de forma que pueda deducirse la relación [nivel-caudal producido].

En ambos casos, se modifica el criterio del bombeo a caudal constante, incidiendo en la determinación de la relación [nivel del pozo-producción].

CONCLUSIONES

- * El sistema diseñado garantiza que el caudal bombeado desde un pozo profundo es constante a lo largo del ensayo.
- * La parte baja de la curva de descarga proporciona información más precisa que la curva de recarga porque el lapso de tiempo entre los mismos caudales es mucho mayor en la primera.
- * El sistema diseñado aporta información en un espacio de tiempo mucho menor que el procedimiento usualmente utilizado.
- * El costo del modelo usado sin incluir bomba ni tubería es inferior al medio millón de pesetas. Un modelo con capacidad para caudales mucho mayores tendría un costo algo mayor solamente por el precio del regulador de presión. Puede reducirse la inversión utilizando orificios calibrados en lugar de limitadores de caudal.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) AGÜERA SORIANO, J. *Mecánica de flúidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*. Ciencia 3, Madrid, 1992.
- 2) CLEMENT, R.: *Controle et exploitation automatique des systèmes d'irrigation. Regulation d'un ensemble hydraulique*. 8ª Reunión europea de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes. Aix-en-Provence, 1971.
- 3) CRANE (División de Ingeniería). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw Hill, México, 1989
- 4) DE PEDRO, A. : *Las rutas geológicas del agua*. Madrid, 1975
- 5) GÓMEZ POMPA, P. *Instalaciones de bombeo para riego y otros usos*. Editorial Agrícola Española. Madrid, 1993.
- 6) KARASIK, KRUTZSCH y FRASER. *Manual de bombas*. McGraw Hill, México, 1988.
- 7) KRUSEMAN G.P. y RIDDER N.A.de.: *Analysis and evaluation of pumping test data*. IILRI. Wageningen, 1990.
- 8) PULIDO BOSCH, A. *Los acuíferos kársticos españoles*. Investigación y Ciencia, enero, 1996, 50/56. Madrid
- 9) VERDIER, J. : *Choix des équipements de stations de pompage de moyenne importance*. 8ª Reunión europea de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes. Aix-en-Provence, 1971.

PROBLEMAS DE REGULACION DESDE AGUAS ARRIBA EN CANALES DE RIEGO Y SOLUCION ADOPTADA PARA EL CANAL DEL ZUJAR.

Liria Montañés J.(P)(*)

RESUMEN.-

Los caudales que se introducen en el comienzo de un canal de riego llegan frente a las tomas con desfases horarios muy importantes e incluso la ley de variación de los caudales a lo largo del tiempo suele ser una curva mucho más aplanada que la de la alimentación. Este fenómeno se incrementa generalmente si se colocan compuertas de nivel constante aguas arriba, para facilitar la derivación del agua por las tomas.

Para mejorar la explotación del canal, se propone colocar una balsas laterales, hacia la parte final del canal, donde aún haya varias tomas aguas abajo, para regular los caudales no aprovechados y utilizarlos en las últimas tomas. Por otra parte se considera fundamental el disponer de un buen modelo matemático que permita en tiempo real saber cómo va a reaccionar el canal ante una forma determinada de suministro de agua. De esta forma se puede manejar el canal con mucha más eficiencia.

Se analiza la aplicación y resultados de estas ideas en el canal del Zújar, con una capacidad de 27 m³/sg de caudal.

ABSTRACT-

The flow entering the irrigation canal intake takes a long time to reach the turnouts and its flow/time curve is much flatter than the original one. This phenomenon is normally increased if some constant upstream level gates are used to facilitate the water supply to the turnouts.

In order to improve canal management, the use of several buffer reservoirs, located mainly towards the canal end is advisable, but still with several turnouts downstream, in order to make use of the exedentary flows, once regulated.

On the other hand, a good mathematical model to show how the canal will react upon several rates of incoming flows is essential. The canal may then be managed more efficiently.

These ideas and their results in the Zujar Canal, with a capacity of 27 m³/sg, are analyzed in this paper.

(*)Profesor Catedrático de Obras Hidráulicas
(*)Ingeniero Consultor

TEXTO.

PRESENTACION DEL PROBLEMA.

Los canales de riego tradicionales están generalmente diseñados para una regulación desde aguas arriba. Esto quiere decir que en su toma deben introducirse los caudales con un ritmo tal que lleguen a todas y cada una de las diversas tomas derivadas en los tiempos y cuantía demandados.

Si se tiene en cuenta el gran intervalo de tiempo que se necesita en un canal largo para que lo recorra el agua y el efecto de laminación que produce el mismo canal sobre una ola de incremento de alimentación, se comprende lo difícil que es en general conseguir un buen manejo del canal.

Bien es verdad que en muchos canales existentes se han intercalado, después de un cierto tiempo, compuertas de regulación de niveles aguas arriba, previamente definidos. Pero su principal utilidad se limita a asegurar una buena derivación en las tomas, aprovechando los calados garantizados, sin resolver el problema citado. Más bien al contrario, las compuertas de regulación remansan el agua arriba de ellas, con lo que retrasan el movimiento del agua y hacen que el canal reaccione mucho más lentamente a las variaciones del caudal que introduzcamos en su toma de alimentación.

Las leyes de caudales se van distorsionando tanto más cuanto más lejos nos encontremos del comienzo del canal, hasta el punto de que son precisamente las tomas del final las que sufren más inconvenientes, unas veces porque el agua no les llega y otras veces porque el canal se desborda.

La problemática que hay que resolver en estos canales es por tanto doble: Por un lado hay que dotarlos, además de las compuertas de regulación de nivel constante aguas arriba, de algún otro elemento que garantice la buena alimentación de las tomas situadas en la cola, y por otro lado hay que disponer de un sistema de modelización del canal que nos ayude a programar las leyes de suministro de caudales, para acertar con la que sea adecuada.

La forma que a nuestro juicio es la más adecuada es la de colocar, hacia el final del canal, pero en un lugar donde aún haya dos o tres tomas más aguas abajo, una o varias balsas laterales de regulación. Su misión será la de almacenar aguas sobrantes, que no se han podido utilizar, y suministrarlas a las tomas del final cuando éstas las necesiten.

Dada la facilidad que ahora existe de colocar compuertas conectadas a sensores de nivel o caudal, incluso alejadas de ellos, que reaccionen abriendo más o menos, según sea la medida recibida, es posible hacer que las balsas desagüen de acuerdo con las demandas de las últimas tomas.

Un canal concebido de esta forma se debe manejar intentando

alimentarlo con una ley de caudales que sea lo más capaz posible de suministrar, en los tiempos correctos, los caudales demandados por las tomas. Pero como ello será muy difícil de conseguir, por no decir imposible, se dimensionan las balsas de forma que puedan regular los caudales en cola, con leyes de desagüe adaptadas a las necesidades de las últimas tomas.

Para resolver el problema de ajustar la ley de suministro en cabeza a las leyes de caudal solicitadas en cada un de las tomas (supuestas conocidas de antemano, tanto en lo que se refiere a tiempos de comienzo y cierre como a la variación en el tiempo de los caudales), hace falta un modelo matemático que simule en tiempo real el movimiento variable en el canal, para poder predecir cómo reaccionará éste al variar la apertura o cierre de las tomas derivadas y por supuesto al modificar la alimentación principal.

En el momento actual la única posibilidad que nosotros conocemos para obtener la ley de alimentación buscada es mediante el método de falsa posición, haciendo diversos tanteos y modificando lo que haga falta para acercarnos al resultado deseado.

Ello exige, para que el tiempo de obtención sea corto, el disponer de un modelo matemático muy bueno, que con gran rapidez sea capaz de simular anticipadamente el proceso que vaya a seguir el agua.

Este modelo no sólo nos servirá durante la explotación del canal para poder simular su funcionamiento con diversas leyes de alimentación, sino que nos servirá también para, en el proceso previo de diseño, elegir las superficies a asignar a las balsas de regulación, para que puedan cumplir con su misión de regulación.

No hay que olvidar que el volumen total de regulación viene dado no sólo por el propio de las balsas que queremos implantar, sino por el volumen adicional que tiene el propio canal al pasar de un calado a otro diferente. La variación de éste segundo, dado que el remanso que forma la superficie del agua se modifica rápidamente si el canal esté en proceso de llenado o vaciado, hace que no se pueda calcular exactamente sin la ayuda del modelo matemático que defina la forma y rapidez de variación de la lámina.

APLICACIÓN AL CASO DEL CANAL DEL ZUJAR.

El tramo de riego del Canal del Zujar consta de nueve tomas derivadas que alimentan otras tantas centrales de bombeo de grandes sectores de riego por aspersión.

La longitud del tramo es de 61 Km (antes hay un canal de mero transporte de 30 Km de longitud). Las pendientes oscilan alrededor de 20 cm/Km y las secciones transversales tienen forma de arco de círculo, con radios de 4,71 m, 4,46 m, 4,30, 4,13 m, 3,67 m y 3,35 m. Existen cuatro acueductos, de sección trapecial y pendientes entre 0,8 y 0,5 por mil.

Para facilitar la toma de agua en los bombeos, se ha previsto la colocación de nueve compuertas de nivel fijo aguas arriba. Como obras intercaladas importantes hay dos grandes sifones, de 3m. de diámetro cada uno, nueve aliviaderos y otras obras de menor importancia. El esquema del perfil longitudinal del canal puede verse en la Figura 1.

Se decidió hacer un tratamiento del canal con la metodología expuesta, por lo que además de las compuertas de nivel fijo agua arriba, se han intercalado relativamente cerca del final, dos balsas, a distancias aproximadas del origen general del canal de 67,997 y 74,390 Km. Aguas abajo hay dos tomas. Las superficies adoptadas para las balsas son de 89.000 m² y 110.000 m².

Las balsas están dotadas de compuertas capaces de dar el caudal que se solicite en cada momento. Ello es posible porque estarán dotadas de sensores de nivel aguas arriba y aguas abajo de cada una, así como de un sensor del grado de apertura de la compuerta. Sendos autómatas programables pueden hacer el cálculo del caudal que se está soltando y compararlo con el solicitado en cada momento, dando la orden correspondiente de corregir la apertura o cierre de la compuerta. Esta operación se realiza por unos motores eléctricos adosados.

Como seguridad de funcionamiento, los autómatas programables ordenan el cierre gradual de la compuerta cuando el nivel aguas arriba baja de uno determinado (para evitar el vaciado del canal) o bien ordenan la apertura gradual y total de la compuerta, cuando el nivel en la balsa llega a un máximo (para evitar el desbordamiento). La gráfica se asemeja a la indicada en la figura 7. La parte vertical de la curva representa la zona de funcionamiento normal de la compuerta, con un caudal saliente independiente del nivel en la balsa, pero que puede adoptar un valor u otro según las necesidades de riego aguas abajo.

En la primera fase de manejo del canal, utillado de la forma explicada, se preve que los caudales soltados por las balsas sean iguales a la suma de los caudales de las tomas situadas aguas abajo (Figura 5), que funcionan con riego a la demanda. Para ello basta con que haya junto a las correspondientes tomas, sendos sensores que midan sus caudales y trasmitan la información (en este caso por radio) a los autómatas de las balsas.

Como las tomas son de estaciones de bombeo por aspersión, los sensores que miden el caudal derivado están colocados en las propias bombas.

Esta forma de operar tiene en rigor el problema del desfase que hay entre la transmisión de la demanda del caudal y la llegada del agua solicitada a la toma. Pero como la distancia entre la última balsa y las tomas no es muy grande, entre 6 y 17 Km, el error introducido es mucho menor que si el caudal se regulase desde el inicio del canal.

Si en lugar de riego a la demanda, fuese riego programado, la ley

de soltado de caudales en las balsas se haría teniendo en cuenta el tiempo de viaje del agua por el canal en el último tramo.

El estudio del funcionamiento del canal en régimen variable se ha hecho con el modelo llamado "CANVAR" en cuyo estudio no entramos porque fué descrito en el trabajo titulado "PROGRAMA CANVAR: UN MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAR EL FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO DE UN CANAL DE RIEGO", que fué presentado en Tenerife con ocasión de las XIII Jornadas de la Asociación Española Riego y Drenaje en Junio de 1995. Tan sólo diremos que la gran rapidez del programa permite la simulación de 24 horas de funcionamiento de los 66 Km de canal, con sus tomas y obras especiales incluidas, en sólo 2 minutos si se utiliza un modesto ordenador 386 (provisto de coprocesador matemático), tiempo que se reduce a 1 minuto con un ordenador Pentium.

Esta gran velocidad de funcionamiento del programa permite la realización en tiempo muy breve de diversas pasadas, con diferentes hipótesis de leyes de caudales, pudiendo en su caso tomar sobre la marcha las decisiones más convenientes sobre las medidas de explotación a adoptar.

En la actualidad, aunque el canal de riego del Zújar tiene una capacidad de transporte en cabeza de 27 m³/sg continuos, debido a que sólo una fracción de la zona se ha puesto bajo riego, sólo se necesita aproximadamente el 50% del volumen previsto.

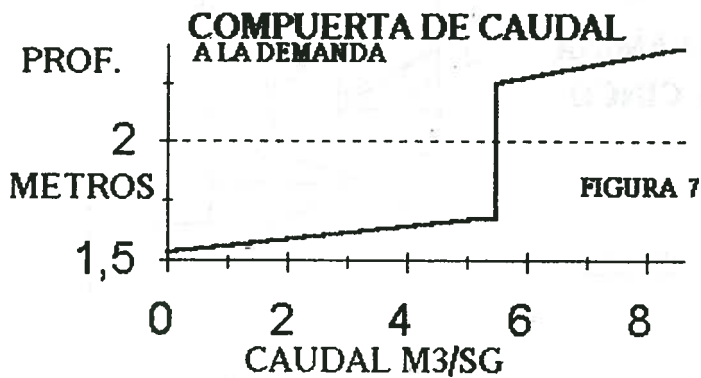
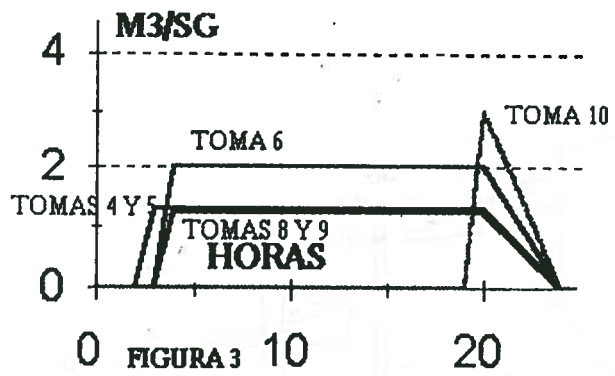
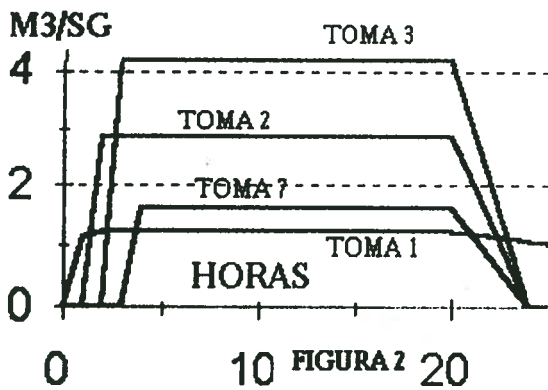
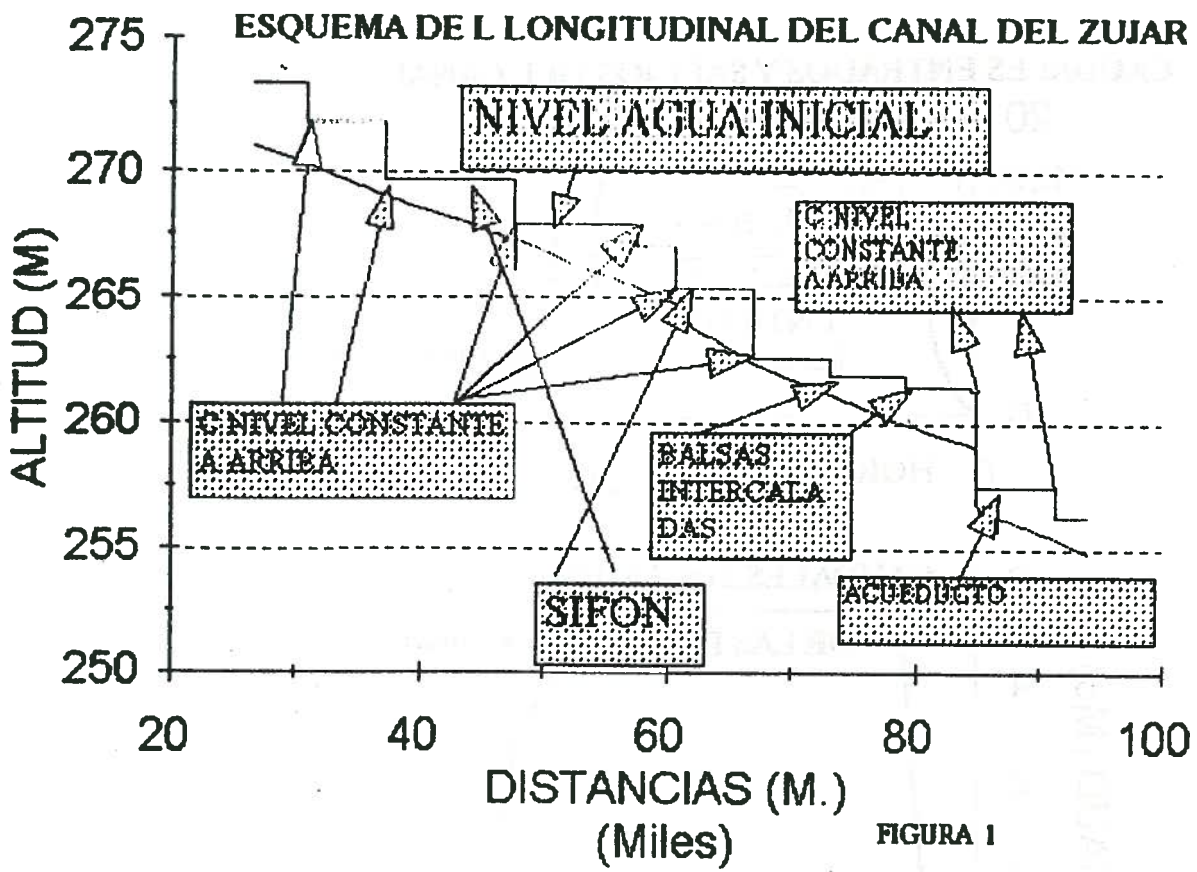
Ello permite utilizar leyes temporales de consumo en las tomas que no ocupan las 24 horas del día.

En el estudio realizado, dado que el riego de la zona se hace a la demanda, sistema incompatible con la regulación de caudales desde aguas arriba, se han supuesto leyes de consumo en las tomas que se aproximan a las obtenidas por estadísticas observadas y que se adjuntan en la Figuras nº 2 y 3.

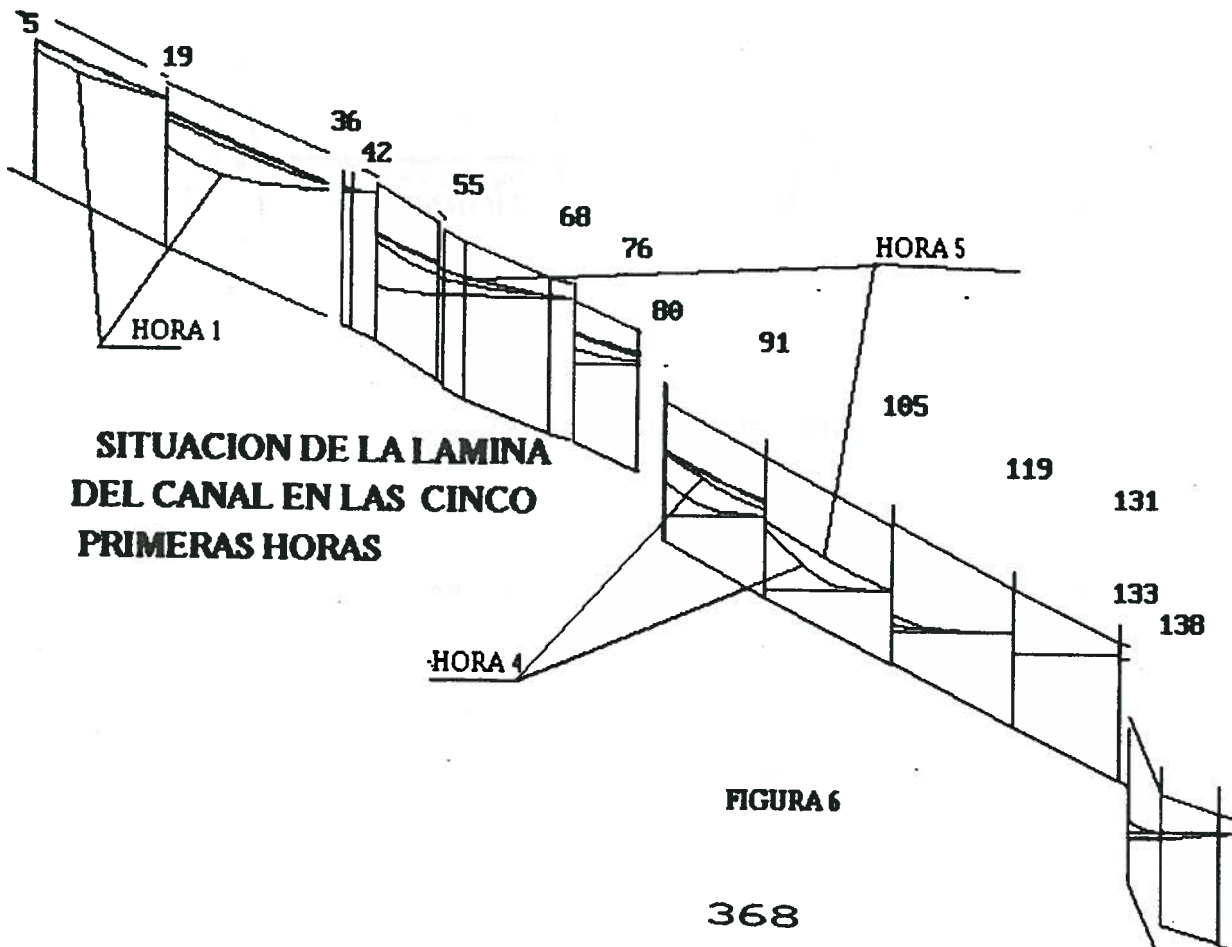
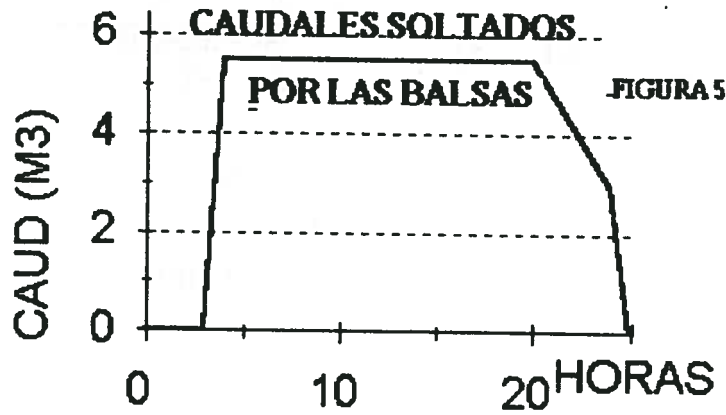
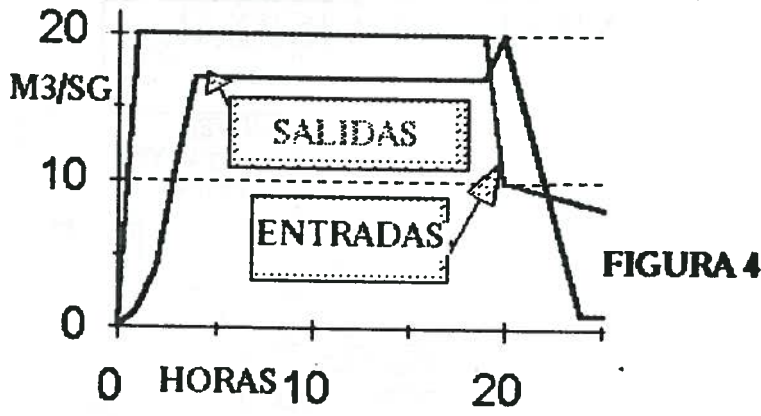
En la figura 4 puede verse la curva suma de los caudales demandados o salidos y la elegida después de pocos tanteos para alimentación o entrada en el canal. Puede verse que está anticipada en el tiempo (para llegar en el momento preciso a las diversas tomas) y que encierra un área superior a la de la curva total de consumo. Esto es porque el estudio del canal se ha iniciado con el canal vacío (es decir con niveles horizontales correspondientes a caudales nulos) y se desea llegar a una situación de funcionamiento normal con canal lleno.

En la Figura 6 puede verse una situación de la pantalla que el programa CANVAR muestra durante el proceso. Cada curva de nivel de agua sale en un color distinto, para que se distinga fácilmente, lo cual no se ha podido reproducir en esta figura.

Del análisis minucioso de estas gráficas puede deucirse fácilmente que la ley de alimentación elegida es acertada y que sin el uso del programa CANVAR, su deducción hubiese sido prácticamente imposible.



CAUDALES ENTRADOS Y SALIDOS DEL CANAL



**DISEÑO ASISTIDO DE SISTEMAS DE CONDUCCIÓN
Y DISTRIBUCIÓN EN ZONAS REGABLES.
REGVAR - DARRCO**

José Manuel Puerto. Departamento Obras Hidráulicas TYPESA

Juan Zapardiel. Departamento Obras Hidráulicas TYPESA

Juan Osuna. Departamento Obras Hidráulicas TYPESA

RESUMEN

Según los estudios realizados para la redacción del Plan Hidrológico Nacional, en torno a un millón quinientas mil hectáreas de regadío en España requieren obras de mejora y modernización de infraestructuras para un mejor aprovechamiento del recurso agua, principal factor limitante para su expansión y consolidación. Por otra parte, mantener la población rural, mejorando su nivel de vida, es uno de los objetivos generales de la nueva política agraria, factor que se traduce, entre otras en la necesidad de modernizar las infraestructuras existentes con el fin de facilitar su explotación. Estos dos factores demandan de forma creciente servicios de ingeniería centrados fundamentalmente en la mejora de la regulación de canales existentes y la sustitución de antiguas conducciones en lámina libre por modernas redes de tubería para riegos por aspersión o baja presión. Es por esto que TYPESA ha desarrollado herramientas informáticas específicas, REGVAR y DARRCO, con el fin de optimizar los diseños minimizando los costes de inversión necesarios.

ABSTRACT

According to studies carried out for the National Hydrologic Plan, over 1,500,000 ha of irrigated land area stand in need of works to rehabilitate and modernize their infrastructure for a better water allocation. The water scarcity is considered the major limiting factor for expansion and settlement of these regions. On the other hand, the new agriculture policy has among its general objectives to maintain rural population improving quality of life, circumstance which leads to accommodate existing infrastructure to a friendly and flexible operation system. These two factors increasingly require engineering services aimed to improve channel regulation and replace ancient open-channel flow canals with modern buried-pipe networks for low pressure and sprinkler irrigation systems. On this basis, TYPESA has developed specific software, REGVAR & DARRCO, to optimize design and minimize investment expenditure.

INTRODUCCIÓN

España cuenta en la actualidad con una superficie de regadío que se aproxima a tres millones cuatrocientas mil hectáreas, que si bien suponen únicamente el 15% de la superficie cultivada, aportan cerca del 60% de la producción sectorial.

Según el Avance del Plan Nacional de Regadíos (APNR) solo el 27% de los regadíos tienen menos de 20 años de antigüedad, lo que supone en gran medida infraestructuras obsoletas y, generalmente, sistemas de riego poco eficientes.

Estos dos datos son suficientes para comprender la importancia que tiene en España los regadíos, y la necesidad acuciante por una parte de modernizar los regadíos existentes, y por otra la de diseñar nuevas transformaciones haciendo uso de modernos sistemas que permitan el ahorro de un recurso siempre escaso, y que permitan un mayor flexibilidad, tanto de cultivos como de técnicas de riego.

Para abordar el estudio y diseño de obras de modernización y transformaciones de regadío, TYPESA ha desarrollado dos herramientas que si bien son complementarias, son a su vez muy diferentes

La primera de ellas es el sistema REGVAR, cuyo fin es la simulación de regímenes de explotación de canales de regadío en régimen variable, y la segunda es el sistema DARRCO, para el diseño asistido de redes de riego colectivo a presión.

En el momento actual, TYPESA está trabajando en el desarrollo de unos nuevos módulos basados en estas dos herramientas y en un sistema de Información Geográfica, que permitan convertirlas en auténticas herramientas de gestión de zona regable, tanto desde el punto de vista del funcionamiento diario de los canales, como desde el punto de vista de control de producciones y tarificación de la propia zona.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO REGVAR

El modelo está dividido en cuatro módulos, los dos primeros sirven para la introducción de datos, tanto geométricos como temporales, tales como los caudales demandados o las aperturas en compuertas de accionamiento manual. El tercero es un módulo de análisis, que es el auténtico motor del sistema, y el cuarto y último es un módulo gráfico que permite el análisis de los resultados.

El módulo de introducción de datos permite una introducción bastante libre, de

RIESGOS Y VENTAJAS DE LA INTRODUCCION **DEL INTERCAMBIO DE CONCESIONES**

por

Ricardo Segura Graño¹

Resumen:

La ponencia presenta la experiencia obtenida en California al introducir medidas que permiten el intercambio de derechos legales al uso del agua y analiza las implicaciones de su trasposición al caso español. Especial atención se presta a las ventajas e inconvenientes que se derivarían si se introduce en nuestras normas el intercambio de concesiones.

Summary:

The paper presents the experience obtained in California when introducing measures allowing the interchange of legal rights for water use and analyses the effects of its application to the Spanish case. Particular attention is given to the advantages and drawbacks that would derive from the interchange of administrative allowances, if this item is introduced into the Spanish legislation.

1. El régimen legal para el aprovechamiento del agua

En nuestro país, y como es sabido, el aprovechamiento de los recursos hídricos en el regadío se efectúa mediante el otorgamiento a favor de los usuarios – regantes – de una concesión administrativa. Mediante esta figura legal, los regantes pueden utilizar el agua – elemento constitutivo del dominio público hidráulico – para regar sus fincas, a las que se adscribe este derecho; en nuestra legislación el derecho al uso del agua va unido, inseparablemente, a la propiedad de la tierra. El agua queda adscrita a los usos indicados en el título concesional sin que pueda ser aplicada a otros distintos, ni a terrenos diferentes.

En consecuencia, las normas españolas no contemplan, ni permiten, salvo autorización administrativa específica, la negociación – compra/venta – de derechos sobre el agua, excepto en el archipiélago canario y cuando el agua proceda de pozos alumbrados antes de la entrada en vigor de la Ley de Aguas, en cuyo caso el agua es de propiedad privada.

Se exceptúan de este procedimiento general –el uso por concesión – el archipiélago canario; las aguas subterráneas alumbradas con anterioridad al 1 de

¹ Subdirector General de Planificación Hidrológica, Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente - Madrid

enero de 1986 – fecha de entrada en vigor de la Ley de Aguas de 1985 (1) –, que seguirán siendo privadas; finalmente, aquéllos usuarios de pozos y manantiales, cuyo uso es autorizado por la ley siempre y cuando el volumen total no pase de 7.000 m³.

2. Reasignación en situaciones de escasez

Siempre según la vigente Ley de Aguas, en situación de sequía extraordinaria declarada mediante Real Decreto, se pueden adoptar medidas en relación con la utilización del agua, aun cuando hubiese sido objeto de concesión. Es decir, en estos casos excepcionales se admite y contempla la reasignación por la Administración de los recursos disponibles, siempre en función de la preferencia entre los distintos usos; en general, aguas destinadas normalmente al riego se derivan al uso urbano.

No se concretan en la norma las compensaciones a que tienen derecho los usuarios privados del uso del recurso para satisfacer el suministro de otros usuarios. Así, por ejemplo, la utilización de las reservas del embalse del Pintado, destinadas al riego de la Z.R. del Viar y que se han reasignado al suministro de la población de Sevilla y su alfoz. Actuaciones de esta naturaleza, puestas en vigor en el episodio de sequía 1991/95, están originando conflictos jurídicos, aún en vías de resolución, ajenos al objetivo de esta comunicación.

En una época en la que prevalecen las consideraciones económicas sobre las de otra índole, se sugiere en numerosos foros (2) que la asignación de los recursos hídricos en períodos de escasez debería fundamentarse en la rentabilidad obtenida por los diferentes usuarios. Aquellos usos en los que se consiga un rendimiento mayor utilizarían el agua escasa, previa adquisición del correspondiente derecho a otros usuarios a los que el precio pagado compensaría de su renuncia. En el debate sobre el Plan Hidrológico Nacional (3), las experiencias del llamado mercado del agua, aplicadas en California (4) en los últimos años, son aportadas para reforzar esta postura.

3. El mercado del agua

La compraventa de agua privada ya existe, al menos de facto, en algunas zonas de España –Canarias, Reus, Valle del Vinalopó– y presenta un amplio espectro de posibilidades en función de la duración del intercambio –temporal o permanente– y de la cantidad relativa del volumen negociado –parcial o total–. Así, se puede adquirir una cantidad determinada –volumen en m³–, un caudal durante un período o, entre otras posibilidades, una participación en los recursos de un pozo, mina o manantial.

forma que no haya que ordenar previamente nudos, tramos, etc., esto se ha hecho así para que las correcciones sucesivas puedan realizarse con toda comodidad. Así se pueden suprimir tramos, cambiar características de secciones, condiciones de borde, etc., sin que sea necesario rehacer la mayor parte de la entrada de datos.

Inmediatamente después de la entrada de datos se validan los mismos. Así se tiene una entrada consistente en sí misma, evitando tramos y/o nudos repetidos o inexistentes o no completamente definidos, etc. Se logra de esta manera que los datos sean consecuentes, lo que no quiere decir que el problema esté bien planteado, esto depende del ingeniero, y no hay programa que pueda realizar esta comprobación hasta sus últimas consecuencias.

El modelo hidráulico emplea las ecuaciones de Saint Venant, continuidad y flujo de la cantidad de movimiento expresadas en forma integral, que se resuelven por métodos numéricos. Se ha empleado el método de las diferencias finitas, haciendo uso del esquema implícito de los cuatro puntos o de Alexandre Preissman.

Este esquema es uno de los más empleados para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant, habiéndose empleado en modelos tales como el DWOPER del National Weather Service de los Estados Unidos.

El empleo de un esquema implícito permite que el programa sea incondicionalmente estable. Por otra parte, la formulación integral es especialmente adecuada para la modelización de situaciones de resalto localizadas en el espacio, permitiendo, también, la discretización en tramos de gran longitud e intervalos de tiempo considerables.

El programa permite la simulación de elementos fijos dentro del canal, tales como orificios, vertederos (picos de pato) y aliviaderos laterales o de bypass; elementos móviles, tales como compuertas de regulación y derivaciones o incorporaciones de caudal, y balsas tanto laterales como de regulación interpuestas en el canal.

Como estrategias de control el sistema considera el riego programado y riego a la demanda. Para la simulación de riegos programados, se pueden emplear compuertas de accionamiento hidráulico o eléctrico, fijando los niveles correspondientes empleando algoritmos altamente contrastados en la práctica como es el Little Man.

Para la simulación de riegos a la demanda se emplean o bien compuertas hidráulicas o bien compuertas de accionamiento eléctrico dotadas de control tipo EL-FLO, EL-FLO RESER, VIBAL o SCAP (ésta última en desarrollo).

La condiciones de borde que se pueden dar son las de caudales en función del tiempo, o calados en función del tiempo, estas condiciones, junto con los elementos anteriores, permiten simular cualquier situación que se dan en la práctica.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO DARRCO.

El modelo DARRCO está concebido de forma modular, integrando una serie de elementos que permiten al ingeniero, diseñar, calcular y obtener los documentos de proyecto, anejos, planos y presupuestos, sin necesidad de hacer uso de personal auxiliar. Seguidamente se describen brevemente los módulos que componen el sistema DARRCO.

Tratamiento de cartografía

A partir de una cartografía restituida se estructuran los datos para su posterior tratamiento por el programa, dividiéndose en coberturas temáticas, y generando un modelo digital del terreno (MDT).

Diseño de la red de tuberías en planta

El módulo de diseño de la red de tuberías en planta está compuesto por unas aplicaciones generales y unas facilidades auxiliares, tipo CAD, que permiten de forma interactiva efectuar el diseño de las redes directamente sobre el ordenador. Por medio de este módulo se define el trazado de las tuberías, y se disponen las tomas en las parcelas. El programa automáticamente genera la numeración de nodos y asigna cota a todos los puntos singulares.

Cálculo analítico de caudales circulantes

Este módulo del programa calcula los caudales circulantes por cada tramo de la red a partir del diseño en planta y de los datos facilitados por el ingeniero, tales como dotaciones, rendimiento de la red, grados de libertad, nivel de confianza, modulación de caudales y tipo de tomas. Asimismo, es preciso facilitar características de las tuberías y parámetros hidráulicos básicos, tales como rugosidades, velocidades admisibles y carga mínima en toma. El método de cálculo que se emplea es el de Clement, siendo posible utilizar como leyes de probabilidad tanto la binomial como la normal.

Optimización de diámetros de redes ramificadas

Este módulo lleva a cabo la optimización a partir de los caudales calculados y unos datos de partida adicionales, de tipo hidráulico y constructivo, como son el recubrimiento o la longitud mínima de tramo. El método de cálculo es el de Labye,

método de programación dinámica que consiste básicamente en trazar la curva que da el precio mínimo de una red en función de la pérdida de carga total que se produce en todo el sistema.

Diseño del perfil longitudinal de los ramales de la red

Seleccionado el ramal que se desea diseñar, se identifica la jerarquía de éste y el programa ajusta automáticamente el perfil longitudinal en base a unos criterios básicos de pendientes admisibles, incorporando todas las piezas especiales necesarias, tales como desagües, ventosas, derivaciones, conos de reducción, codos etc. El diseñador dispone de una serie de herramientas auxiliares que permiten modificar fácilmente el diseño automático realizado por el programa.

Producción de planos de proyecto

Este módulo produce de manera automática los planos de la red, ajustando de forma automática la información al formato de papel que se seleccione, optimizando su uso. Esta aplicación genera planos de planta general, planta de las redes, perfiles longitudinales de los ramales y perfiles transversales.

Producción de mediciones e informes de red

A partir del contenido de los archivos de los módulos de diseño, se realizan las mediciones de todos los elementos, tanto de movimiento de tierras, tuberías como piezas especiales, cargando unas bases de datos que posteriormente son empleadas para generar los informes de red que permiten la elaboración de los presupuestos.

APLICACIONES PRÁCTICAS

Estos dos programas han sido empleados por TYPESA. Se hace a continuación una breve reseña de algunos de los proyectos en los que han sido empleados.

Zona Regable del Canal del Esla

El Canal del Esla domina en su margen derecha una superficie total de 15.800 Has de las cuales son regadas en la actualidad 10.473 Has. La superficie regable está comprendida entre el nuevo canal y el río Esla, además de atender algunos riegos de la margen derecha mediante bombeo. Las redes de distribución en acequia están pensadas para riego programado con una capacidad hidráulica correspondiente a riego a 24 horas siete días a la semana. Actualmente se producen conflictos entre regantes en los turnos diarios, donde la demanda es mayor que la oferta, y por contra se desperdicia gran cantidad de agua durante las horas y épocas valle.

La Confederación Hidrográfica del Duero, con la asistencia técnica de TYPESA, ha

redactado el proyecto de modernización de la Zona Regable del Canal del Esla que incluye la regulación del canal y la sustitución de las redes de acequias por redes de tuberías.

Regulación del canal del Esla

Las necesidades de regulación vienen por una parte de la reducción de la jornada de riego y por otra el paso de riego programado a riego a la demanda. La idea fundamental ha sido conseguir transformar el canal a uno que sea capaz de satisfacer unas demandas puntas muy superiores a las actuales, pero que en valor medio prácticamente no sufren variación.

Esto se logra mediante la interposición de unas balsas reguladoras que almacenen volúmenes durante las horas valle para cederlo durante las puntas. Los puntos de ubicación de las balsas se ajustan a las posibilidades del canal, disponiéndolas en los saltos que, afortunadamente, aparecen distribuidos en el trazado.

Las balsas dividen el canal en tramos prácticamente independientes, cada uno de los cuales se puede explotar con suficiente independencia. En los dos primeros se deja correr el agua libremente, garantizando los niveles por medio de los picos de pato existentes, almacenando los caudales no utilizados en las balsas de regulación.

En tercer tramo responde a un concepto de regulación a la demanda pura con compuertas hidráulicas con nivel constante aguas bajo, lo que supone una transformación del tableado actual a uno correspondiente a este nuevo esquema, lo que da lugar a la práctica reconstrucción del canal.

La optimización del dimensionamiento de las balsas, la definición de resguardos, la disposición y capacidad de aliviaderos, los algoritmos de control de las compuertas, etc., han sido efectuados haciendo uso extensivo del programa REGVAR.

Proyecto de sustitución de redes de acequias por tuberías

Con base en la cartografía a escala 1:2.000, tratada mediante el módulo específico, el parcelario de la zona y la lista de regantes, se ha estudiado la sustitución de las redes de acequias existentes por redes de tuberías con tomas hasta nivel de parcela.

El diseño en planta, encaje por pantalla, ha tratado de respetar la distribución de acequias actual. La longitud de tuberías proyectadas en ramales principales ha sido de más de 100 km y de más de 400 km en ramales de orden inferior.

La asignación de tomas a parcela se ha realizado tratando de minimizar el número

de hidrantes. El caudal de cada toma se ha modulado con base en los resultados del Estudio de Demandas. El número de tomas ha superado las 7.000.

Una vez definidos los caudales en las tomas se ha procedido a estimar los caudales circulantes por cada tramo de las redes, utilizando el módulo de cálculo analítico de caudales. Con los valores anteriores, la cota piezométrica en cabecera en cada red y los distintos tipos de tuberías respecto a materiales y timbraje, se ha llevado a cabo la optimización de diámetros mediante el módulo correspondiente, el rango de diámetros nominales comprende desde 110 hasta 1.600 mm.

Los perfiles longitudinales de todos los ramales se han diseñado de forma interactiva, con la información trasferida por módulos anteriores, partiendo de la solución propuesta por el programa. Esta optimiza el movimiento de tierras, respetando un recubrimiento y pendientes ascendente y descendente mínimas. Una vez fijado el perfil longitudinal se procedió a la ubicación automática de piezas especiales junto con los elementos de protección y maniobra, ventosas, desagües y válvulas de seccionamiento y los anclajes necesarios. El total de piezas tanto especiales como de control, protección y maniobra que se han previsto sobrepasa las 10.000.

El módulo de planos de proyecto generó de forma totalmente automática los planos de planta, perfil longitudinal y transversales, en total más de 800.

Finalmente, el módulo e informes y mediciones hizo la trasferencia de los datos detallados al programa de presupuestos para la confección del mismo.

Otros proyectos de regulación de canales de regadío

Además del canal del Esla, TYPESA ha proyectado la regulación del canal de las Dehesas y está proyectando la regulación de los canales de Montijo, Lobón, Urgell y Almazan.

Canal de las Dehesas

Se trata de un canal de sección circular diseñado para regar una zona de 30.000 has. En una primera fase se van a poner en riego unas 14.000 has con una demanda acumulada punta en cabecera de canal de 19,24 m³/s. El sistema adoptado para la regulación del canal ha sido el El-Flo Reset. Debido a que el canal se diseñó para regar una zona mucho mayor de la que está previsto hoy poner en riego, el propio canal dispone de una amplia capacidad de regulación, no siendo necesaria la construcción de balsas adicionales.

Canal de Montijo

Este canal toma de la presa de Montijo, en el río Guadiana aguas abajo de su paso por Mérida, sirviendo junto con el canal de Lobón para el riego de las Vegas Bajas. El sistema de explotación actual corresponde a un riego programado con petición previa. Se desea instalar un sistema de regulación que permita reducir en alguna medida las necesidades de riego nocturno y flexibilizar la explotación, sobre todo en comienzo de campaña, momento en el cual las peticiones de caudal son mucho más variables.

Se prevé la construcción de dos balsas una de regulación general en el salto de la Alcazaba y otra de regulación de un sector de aspersión. Se prevé automatizar las compuertas instalando un accionamiento eléctrico controlado por un sistema tipo Little Man.

En este momento el proyecto aún no ha concluido y está en fase de modelización de la solución propuesta.

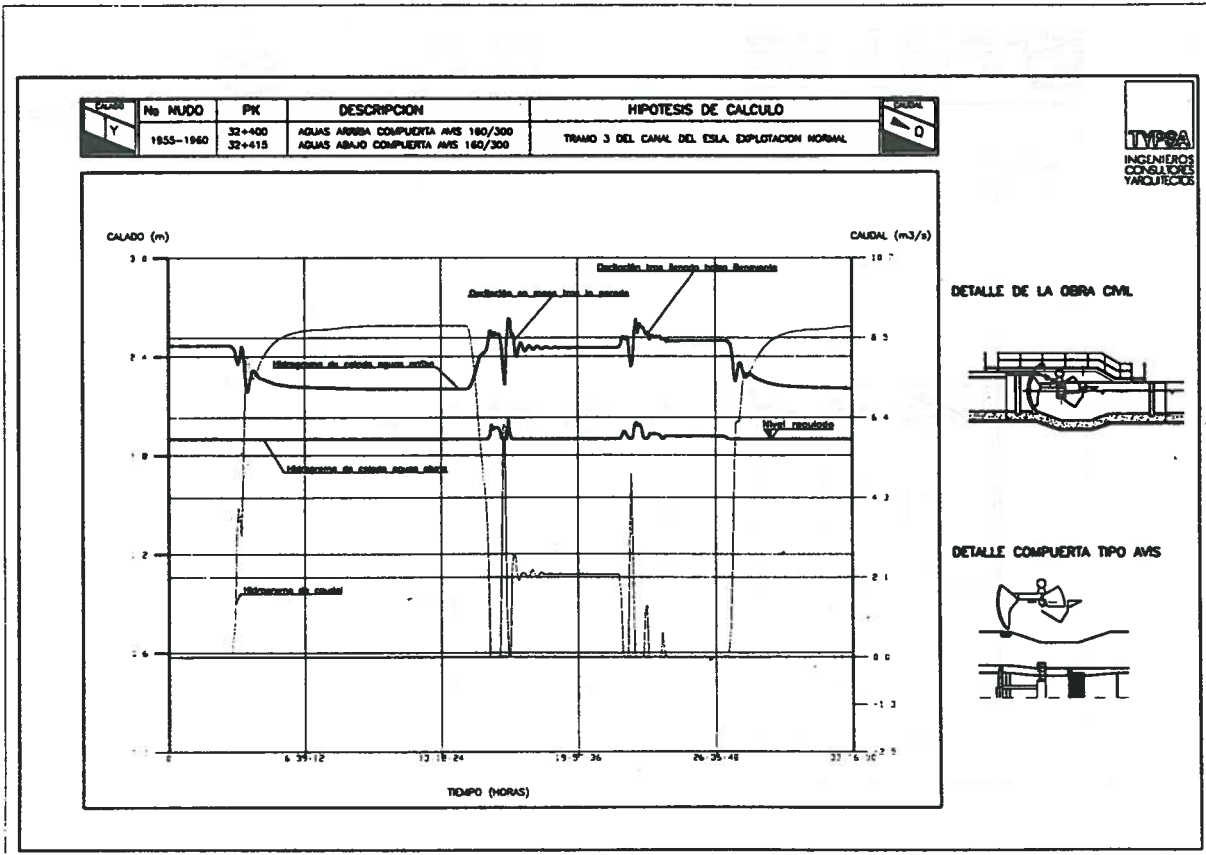
CONCLUSIONES

A lo largo de los trabajos llevados a cabo entre los que se encuentran los anteriormente reseñados, los sistemas REGVAR y DARRCO han demostrado ser dos herramientas que permiten la optimización de los diseños, permitiendo analizar un alto número de alternativas sin suponer un coste elevado, empleando un personal muy limitado en número pero de elevada cualificación.

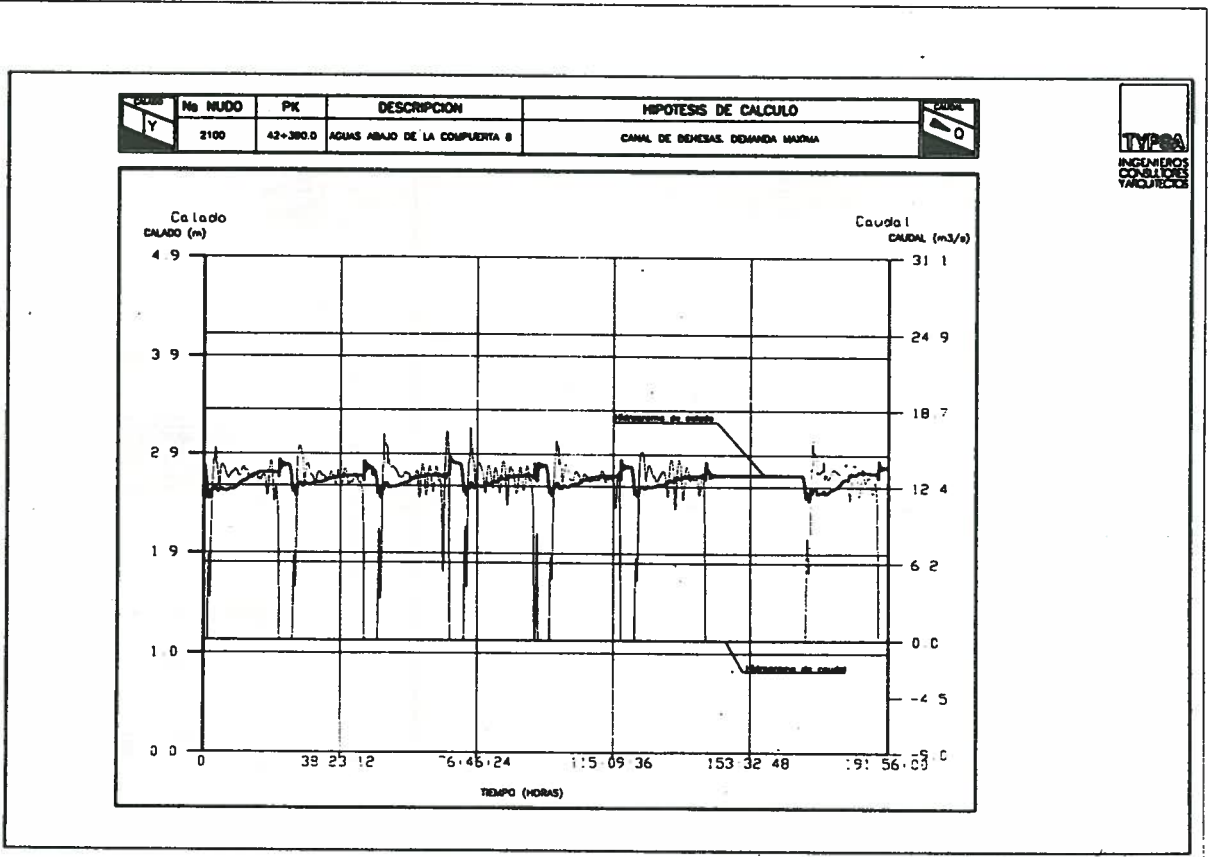
AGRADECIMIENTOS

En primer lugar queremos mostrar nuestro agradecimiento a los ingenieros D. Antonio Rodríguez de la Torre y D. Francisco Franco, de Confederación del Duero, y a D. Fermín Jiménez, D. Fernando Aranda y D. José Luis Sánchez Carcaboso, de Confederación del Guadiana por haber confiado en TYPESA para la asistencia técnica para la realización de éstos trabajos y por las numerosas y valiosas ideas que han aportado sin las cuales habría sido imposible llevar a cabo los trabajos.

FIGURAS

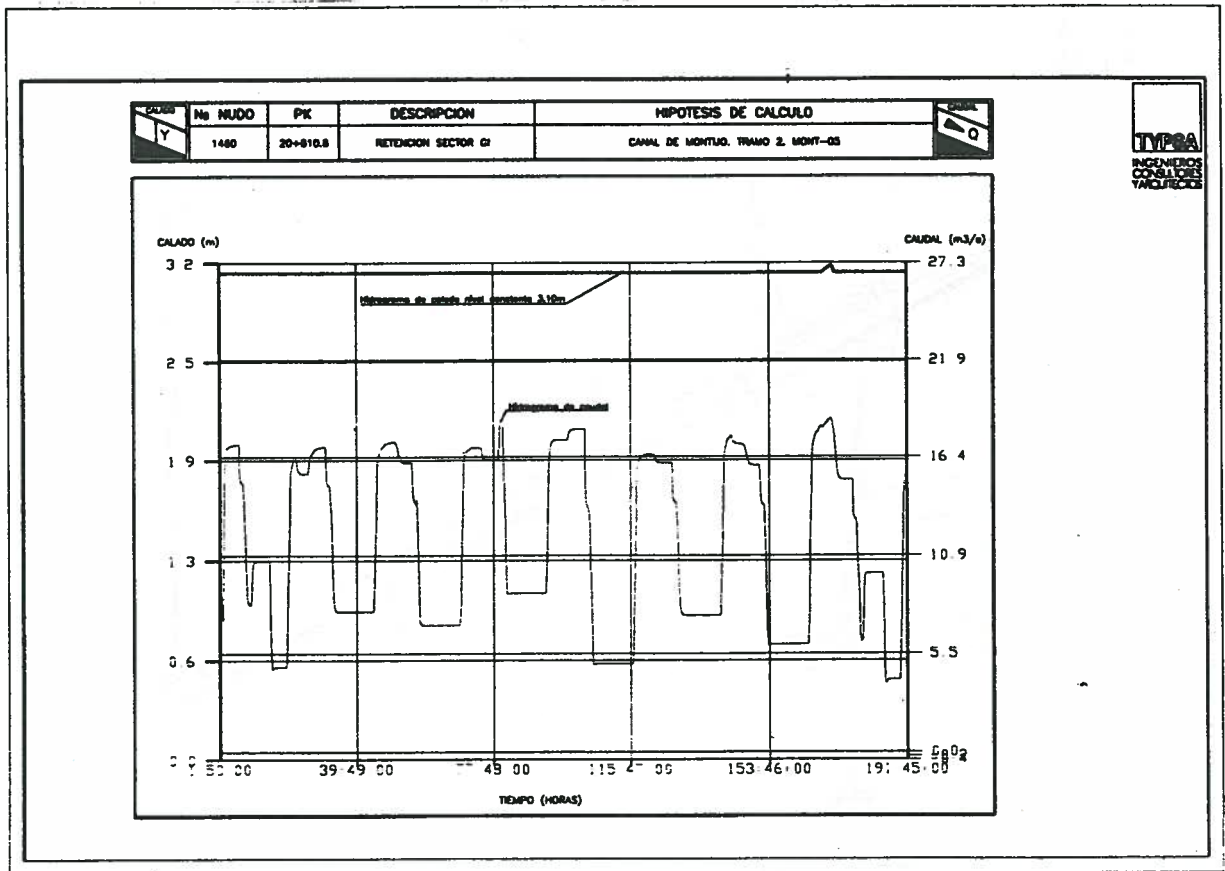


Hidrograma de caudal y calado aguas arriba y abajo compuerta hidráulica de nivel constante aguas abajo.



TYPSA
INGENIEROS
CONSULTORES
Y ARQUITECTOS

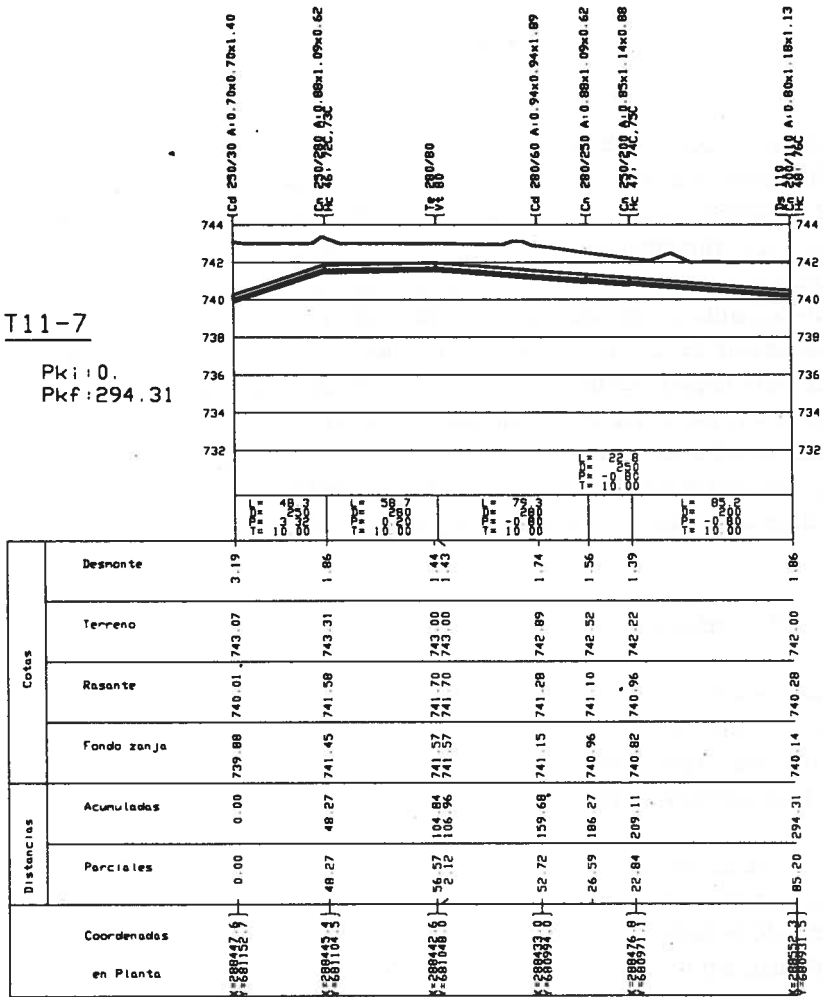
Hidrograma de caudal y calado aguas abajo compuerta de accionamiento eléctrico dotada de control tipo El-Flo Reset



Hidrograma de caudal y calado aguas arriba compuerta hidráulica de nivel constante aguas arriba.

T11-7

Pki: 0.
Pkf: 294.31



Plano de perfil longitudinal de red de tuberías con situación de piezas especiales, protección, control y maniobra e hidrantes y tomas de riego.

REDES COLECTIVAS CON DISTRIBUCION A LA DEMANDA. APLICACION DE TECNICAS DE ANALISIS EN EL DIMENSIONADO Y SELECCION DE GRUPOS DE IMPULSION

Arviza Valverde, J (P); Royuela Tomás, Alvaro; Montalvo López, T;¹

RESUMEN

En la presente comunicación se aborda una metodología para selección y dimensionado de grupos de impulsión en redes colectivas de riego a presión con distribución a la demanda. Definida la localización de hidrantes y trazado de la red, el cálculo de caudales se efectúa mediante la aplicación de las fórmulas de Clement, lo que permite abordar el dimensionado de la red mediante técnicas de optimización. Una vez dimensionada la red, se propone la realización de un análisis del funcionamiento hidráulico de la red estableciendo hipótesis crecientes de demanda de la red, modelizando el funcionamiento de los hidrantes en cada caso. Esto permite construir la curva de demanda o curva resistente de la red, lo que permite determinar bajo cualquier situación de consumo (demanda de caudal) los requerimientos de presión en origen y por tanto la altura manométrica que deberán suministrar los grupos. La selección del número de grupos se efectúa en base a la curva de demanda construida, condiciones de funcionamiento, costes energéticos, costes de los grupos y variador electrónico de frecuencia. El método propuesto permite modelizar el funcionamiento de la red con inyección directa así como evaluar la respuesta de los grupos dimensionados.

1.- INTRODUCCION. OBJETIVOS

En los últimos años la modernización de sistemas de riego ha llevado asociada la proliferación de redes colectivas de riego a presión, en muchos de los casos con distribución a la demanda. En aquellos casos en que no existe cota geométrica suficiente es necesario recurrir a la instalación de grupos de bombeo para garantizar los requerimientos de caudal y presión en los hidrantes de la red.

En el proceso de dimensionado, en la fase de cálculo de caudales circulantes por los tramos de la red se vienen empleando métodos basados en una distribución probabilística de caudales. Básicamente se pretende la determinación de los máximos caudales circulantes por tramo garantizando una calidad de funcionamiento determinada. De los métodos aplicables el más utilizado se basa en la aplicación de la Fórmula de Clement. Si bien la aplicación de esta formulación permite abordar el dimensionado de los diámetros de la red, al no cumplirse la ecuación de continuidad en los nudos de la red, los requerimientos reales de presión en origen y por tanto la altura manométrica requerida calculada en base a estos planteamientos puede diferir de los requerimientos reales.

Se pretende, mediante la utilización de técnicas de análisis hidráulico, determinar la presión requerida en origen bajo cualquier demanda prevista para garantizar los requerimientos mínimos de presión fijados en hidrante. El análisis permitirá la construcción de la curva resistente de la red, la cual se utilizará para la selección de los grupos y características de los mismos.

Se ha aplicado la metodología planteada a distintas redes colectivas de riego con sistema de riego localizado en parcela observando que los requerimientos de presión obtenidos del dimensionado difieren por exceso o defecto, dependiendo de los casos, de los obtenidos tras un análisis hidráulico del funcionamiento de la red, por lo que se considera adecuada su aplicación para garantizar el correcto funcionamiento de la red y un funcionamiento de los grupos de bombeo con máximo

¹Dpto. Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universidad Politécnica de Valencia

rendimiento.

2.- MATERIALES Y METODOS

Para el desarrollo de la presente metodología se han utilizado, desarrollados para el caso los siguientes paquetes informáticos:

DM :	Cálculo de caudales circulantes por línea en redes colectivas con distribución a la demanda.
RG :	Dimensionado óptimo económico de redes ramificadas de tuberías a presión
ARED:	Análisis hidráulico de redes basado en la formulación nodal
BOMBAS:	Programa para el ajuste de curvas características de bombas y su asociación y determinación del punto de funcionamiento.

2.1. Metodología

2.1.1. Fase de dimensionado

Para la determinación de los caudales circulantes por línea se plantean las siguientes condiciones de diseño.

1) Ordenación de las superficies de las parcelas a cubrir, estableciendo intervalos en función de la superficie y de la posibilidad de sectorización en parcela. En base a esta ordenación se establecen distintos tipos de tomas (máximo de 8)

2) El grado de libertad se establece en función del tiempo de riego estimado por toma, jornada efectiva (JER) y número de sectores (N_s).

$$GL = \frac{JER}{t N_s} \quad (1)$$

3) El caudal asignado a cada toma vendrá dado por la siguiente expresión:

$$d = (S_{\max} - S_{\min}) q GL K_m \quad (2)$$

Siendo:

- d : Caudal asignado a la toma
- S_{\max} : Superficie máxima del intervalo considerado
- S_{\min} : Superficie mínima del intervalo considerado
- q : Caudal ficticio continuo para el periodo de máximas necesidades
- GL : Grado de libertad de la toma
- K_m : Coeficiente de mayoración que depende de la variabilidad de superficies en cada intervalo

4) El caudal circulante por cada tramo se calcula aplicando la fórmula de Clement para distintos tipos de toma. El caudal máximo probable requerido en origen vendrá dado por:

$$Q_o = \sum_{i=1}^N n_i p_i d_i + U(P_q) \sqrt{\sum_{i=1}^N n_i p_i q_i d_i^2} \quad (3)$$

Siendo:

N : Número de tipos de tomas

n_i : Número de total de tomas del tipo i

p_i : Probabilidad de funcionamiento de la toma i . $p_i = 1/GL_i$

q_i : Probabilidad de no funcionamiento de la toma i . $q_i = 1 - p_i$

$U(P_q)$: Parámetro que depende de la calidad de funcionamiento adoptada

d_i : Caudal asignado a la toma i

El caudal máximo demandado suponiendo un funcionamiento simultáneo de todas las tomas será:

$$Q_T = \sum_{i=1}^N n_i d_i \quad (4)$$

Se puede definir como simultaneidad de funcionamiento máxima probable (SFMP) a la relación:

$$SFMP(\%) = \frac{Q_o}{Q_T} 100 \quad (5)$$

El dimensionado de la red una vez determinados los caudales circulantes por línea se efectúa en base a minimizar una función objetivo sumatorio de costes energéticos más costes de amortización de la red.

$$C_T = C_E + C_A$$

Cumpléndose en todos los hidrantes de la red:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + H_c - Z_i - \sum h_{r_i} \geq \frac{P_{r_i}}{\gamma} \quad (6)$$

Siendo:

P_{r_i}/γ : Presión mínima requerida en el hidrante o toma i

Σh_{r_i} : Pérdidas de carga en los tramos que unen el origen con el hidrante i

H_c : Pérdidas estimadas en el cabezal de filtrado colectivo, si lo hubiere.

El proceso de dimensionado conduce a determinar la altura manométrica que deberá suministrar la instalación de bombeo (H_m).

2.1.2. Fase de análisis

Debido al método adoptado para el cálculo de los caudales circulantes (fórmula de Clement),

éstos no tienen por qué cumplir la ecuación de continuidad en los nudos de la red, debido a que la simultaneidad de caudales por línea es mayor cuando el número de tomas que alimente sea menor. Esta situación conduce a que la altura manométrica calculada pueda garantizar las presiones mínimas en hidrante.

Para ello se debe realizar un análisis del funcionamiento hidráulico de la red bajo distintas hipótesis de funcionamiento. Como solución práctica se plantea estudiar la red, bajo demandas crecientes hasta llegar a la SFMP redondeando al valor superior múltiplo de 5, estableciendo hipótesis crecientes de 5 en 5%.

Los hidrantes se modelizan de la siguiente forma:

El consumo es una función de la presión resultante en hidrante del tipo:

$$q_H = K H^x \quad (7)$$

Siendo:

q_H : Consumo en hidrante

K : Coeficiente que depende de la superficie de la parcela, sectorización y tipo de emisor utilizado. Calculándose K mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{q_H}{H^x} = \frac{S q JER}{t N_s H^x} \quad (8)$$

x : Exponente que depende del tipo de emisor utilizado en parcela.

H : Presión resultante en hidrante.

Si en hidrante se instala un limitador de caudal calibrado a un caudal q_{HT} . Se presentan dos situaciones en el análisis del funcionamiento.

Si $q_H \geq q_{HT}$ entonces $q_H = q_{HT}$

Si $q_H < q_{HT}$ entonces $q_H = K H^x$

Adoptando como altura manométrica base del análisis la obtenida en el dimensionado, la altura manométrica que debe suministrar la estación de bombeo para cada una de las hipótesis de funcionamiento planteadas será:

$$H_{m_j} = H_m + \left(\frac{P_{\min}}{\gamma} \right)_j - \left(\frac{P_r}{\gamma} \right)_j \quad (9)$$

Siendo:

H_{m_j} : Altura manométrica requerida para una simultaneidad del j %

$(P_{\min}/\gamma)_j$: Presión mínima de todos los hidrantes de la red para la simultaneidad del j %

$(P_r/\gamma)_j$: Presión requerida en el hidrante de presión mínima.

Para los n casos de simultaneidad estudiada se obtienen n valores de H_{m_j} crecientes. Los pares de valores caudal-altura manométrica requerida se ajustan a una función polinómica del tipo:

$$H_m = A_1 + A_2 Q + A_3 Q^2 \quad (10)$$

Esta ecuación permite modelizar los requerimientos de presión en función del caudal demandado en origen, denominándola curva de demanda o resistente de la red.

La selección de los grupos de bombeo se realizará en función del caudal máximo probable (Q_{\max}), número de grupos y altura manométrica requerida por la red (H_{md}), obtenida a partir de la ecuación de ajuste anteriormente expuesta.

$$H_{m_d} = A_1 + A_2 Q_{\max} + A_3 Q_{\max}^2 \quad (11)$$

El número de grupos puede establecerse de tal forma que se minimice la siguiente función de costes:

$$C_T = \alpha [(n + 1) C_B + C_V] + P T n N \left(\frac{Q_{\max}}{n} \right) \quad (12)$$

Siendo:

- n : Número de grupos
- C_B : Coste de cada grupo motobomba
- C_V : Coste del variador electrónico de frecuencia
- α : Factor de amortización técnico financiera
- P : Coste específico de la energía, en pts/kW-h
- T : Tiempo anual estimado de funcionamiento
- N : Potencia absorbida por cada grupo de bombeo

Determinado el número de grupos y características de las bombas, las curvas motrices de las bombas pueden ajustarse a funciones del tipo:

$$\begin{cases} H = C - D \left(\frac{Q}{i} \right)^2 \\ \eta = E \left(\frac{Q}{i} \right) + F \left(\frac{Q}{i} \right)^2 \end{cases} \quad (13)$$

siendo i el número de bombas en funcionamiento.

Estableciendo el intervalo óptimo de funcionamiento de cada asociación de bombas, mediante la ecuación resistente de la red puede modelizarse el comportamiento hidráulico de la red analizando la idoneidad de instalación de distintos elementos de regulación (válvulas reductoras, mantenedoras, etc)

3.- RESULTADOS

Se aplica la metodología expuesta a una red colectiva con distribución a la demanda con inyección directa a la red. Los datos de partida son los siguientes:

- Superficie regable 167.7 Has

- Presión mínima requerida en hidrante 30 m.c.a.
- Jornada efectiva de riego 18 horas
- Caudal ficticio continuo en periodo máximas necesidades 0.5 l/sg/ha
- Tiempo medio de riego en periodo máximas necesidades 3.6 horas
- Número total de tomas de la red 98
- Calidad de funcionamiento adoptada para más de 10 tomas 99%
- Material red Fibrocemento/PVC
- Tiempo medio de funcionamiento estimado 2563 horas
- Coste específico de la energía estimado 9.46 kWh
- Factor de amortización 0.11

Se han establecido 6 tipos de tomas de la siguientes características:

Tipo toma	S_{\min} (has)	S_{\max} (Has)	S_m (Has)	Km	GL	P	d (l/sg)	d_a (l/sg)
A	0.15	0.50	0.30	1.10	5.00	0.20	1.11	1.1
B	0.56	0.98	0.70	1.10	5.00	0.20	2.58	2.6
C	1.11	1.97	1.60	1.10	5.00	0.20	5.90	6
D	2.05	3.78	2.90	1.10	2.50	0.40	5.34	5.4
E	4.10	6.85	5.60	1.15	1.67	0.60	7.19	7.2
F	7.10	9.32	8.50	1.05	1.25	0.80	7.47	7.5

Siendo:

- S_{\min} : Superficie mínima del intervalo
- S_{\max} : Superficie máxima del intervalo
- S_m : Superficie media del intervalo
- P: Probabilidad de funcionamiento de la toma
- d: Caudal en toma calculado
- d_a : Caudal asignado a la toma

El número total de tomas de cada tipo son:

Tipo Toma	A	B	C	D	E	F
Total	12	30	34	16	3	3

Del cálculo de caudales circulantes por línea se obtiene que la simultaneidad de funcionamiento máxima probable es de:

$$\text{SFMP} = 40.3\%$$

lo que supone un caudal en origen de 171.5 l/sg.

Efectuado el dimensionado mediante técnicas de optimización, la combinación de diámetros adoptada conduce a una altura manométrica requerida de:

$$H_m = 51.1 \text{ m}$$

A partir de los resultados del dimensionado se ha efectuado un análisis hidráulico de la red para determinar la curva de demanda de la misma. Se ha analizado la red bajo simultaneidades de funcionamiento entre el 5 y el 55%

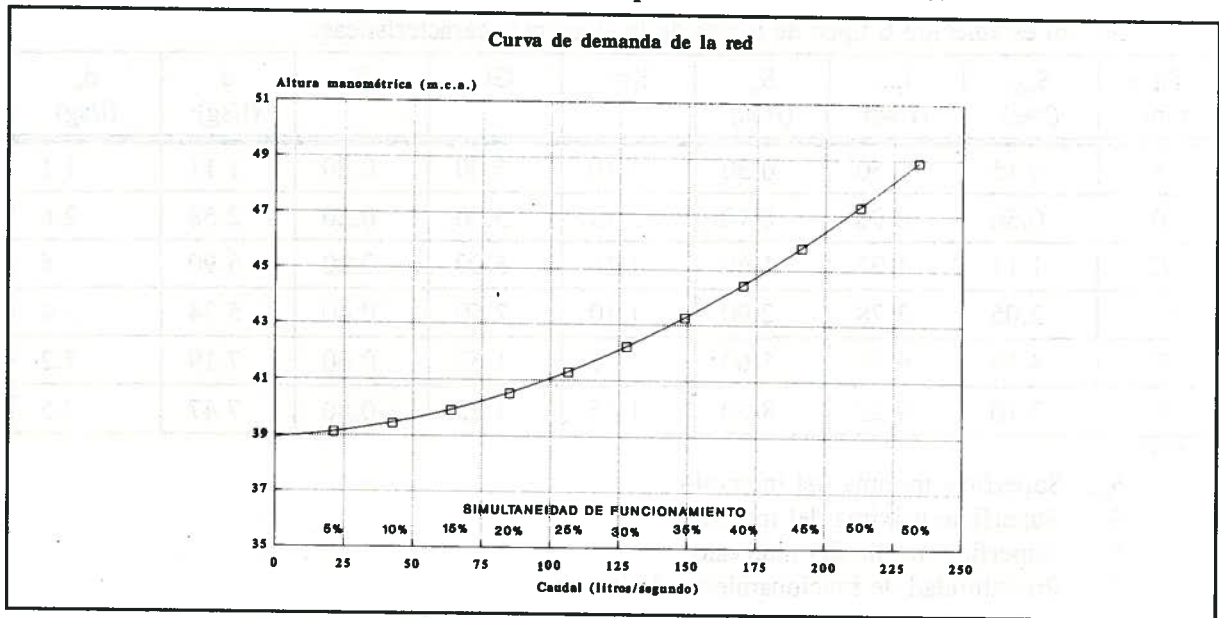
En la gráfica de la figura 1 se muestra la altura manométrica requerida para cada simultaneidad, así como la curva de ajuste obtenida. La ecuación de la curva de demanda de la red es:

$$H = 38.9259 + 0.005227 Q + 0.00016 Q^2$$

Con el caudal el litros/segundo. A partir de la ecuación anterior, la altura manométrica requerida para la SFMP resulta:

$$H_{md} = 44.53 \text{ m.c.a.}$$

Lo que supone un 13% inferior a la obtenida en el proceso de dimensionado.



El número de grupos y características de los mismos se determina en función de la H_{md} y en base a minimizar la función de costes dada por la ecu.13. La solución adoptada ha sido la siguiente:

- 5 grupos de bombeo idénticos asociados en paralelo de eje horizontal
- Diámetro del rodete: 200 mm.
- Velocidad nominal de giro: 2900 r.p.m.
- Potencia nominal motor de accionamiento: 40 CV

Adoptando la altura manométrica calculada en el dimensionado la selección de grupos conduce al mismo número de bombas, pero siendo el diámetro de rodete de 220 mm. y potencia del motor de accionamiento de 50 CV

Las ecuaciones de ajuste de las curvas características de la asociación de bombas son:

$$\begin{cases} H = 54.2 - 0.007588 \left(\frac{Q}{n}\right)^2 \\ H = 4.71 \left(\frac{Q}{n}\right) - 0.06908 \left(\frac{Q}{n}\right)^2 \end{cases}$$

Siendo n el número de bombas en funcionamiento.

A partir de la ecuación de la curva de demanda de la red y ecuaciones de las curvas características de la asociación de bombas se puede determinar el intervalo óptimo de funcionamiento de cada bomba o asociación, determinando la presión consigna a adoptar para la automatización del funcionamiento y su adecuación a los requerimientos bajo cada hipótesis de demanda.

4.- CONCLUSIONES

La metodología expuesta permite modelizar el comportamiento de la red bajo distintas hipótesis de funcionamiento, permitiendo por una parte realizar un dimensionado y selección de los grupos de elevación más ajustado a las condiciones reales de funcionamiento, por otra parte permite una vez seleccionados los grupos verificar su adecuación a las condiciones de funcionamiento de la red, ajustando los intervalos de funcionamiento y por tanto ajustando los costes energéticos durante la campaña de riego.

El desarrollo paralelo de un software específico de aplicación al problema planteado, permite a su vez estudiar distintas alternativas tanto en la fase de determinación de caudales, dimensionado de la red, como en la selección y dimensionado de grupos y su adecuación a condiciones de funcionamiento más cercanas a las reales.

Si bien la aplicación práctica de la metodología es inmediata, resulta necesario abordar la modelización de redes de riego con distribución a la demanda en funcionamiento, en orden a contrastar la bondad de los métodos de diseño de caudales basados en la aplicación de la fórmula de Clement.

5.- BIBLIOGRAFIA

Arviza, J. (1993) "Análisis hidráulico de redes. Aplicación de la formulación nodal a redes de riego a presión". Jornadas Técnicas de Riegos y Drenajes. Valladolid

Arviza, J et Al. (1993) "Curso de redes hidráulicas de riego a presión" Colegio oficial de Ingenieros Agrónomos de Aragón, La Rioja, Navarra y País Vasco. Zaragoza

Clement, R; Galand, A. (1986) "El riego por aspersión y las redes colectivas de distribución a presión". Ed. Técnicos Asociados. Barcelona.

Granados, A. (1990) "Infraestructura de regadíos: Redes colectivas de riego a presión". E.T.S.I.C.C.P. Universidad Politécnica de Madrid

Labye, Y et Al. (1988) "Design and optimization of irrigation distribution networks". FAO. Irrigation and drainage paper nº 44. Roma

López, R et Al. (1995) "Valoración energética y diseño óptimo de impulsiones con caudal variable". Ingeniería del Agua. Vol 2. Num.1. Abril 1995

U.D. Mecánica de Fluidos (1993) "Curso de Diseño Hidráulico de redes de riego". Universidad Politécnica de Valencia.

RIEGO POR INUNDACIÓN CON UN PUNTO DE DESAGÜE

Zapata Ruiz, N.¹ (P) y Playán Jubillar, E.²

Resumen:

El riego por inundación puede alcanzar una elevada uniformidad cuando se emplean caudales elevados. Sin embargo, esto puede dar lugar a dosis de riego muy superiores a la capacidad de retención del suelo, por lo que la eficiencia puede descender al aumentar el caudal. En este estudio se analiza la conveniencia de provocar un punto de desagüe una vez concluida la fase de avance. El objetivo de esta práctica es recuperar parte del exceso de agua que entra en la parcela. De esta manera se mantiene la uniformidad y se eleva la eficiencia. Se presentan los resultados de una serie de simulaciones realizadas con el modelo bidimensional B2D en una parcela de 1 ha. Cuando el caudal y/o la n de Manning son elevados, la apertura de un desagüe puede mejorar la eficiencia hasta en un 15%. La geometría y localización del desagüe influyen decisivamente en el volumen de agua recuperado.

Summary :

Level-basin irrigation systems can attain very high efficiencies if high inflow discharges are used. Under these circumstances, however, the resulting irrigation depth can be much larger than soil water retention. This can result in a decrease in irrigation efficiency as the discharge increases. In this work we analyze the convenience of opening an outflow gate once the advance phase is completed. The objective of such a practice is to recover part of the overland water volume, maintaining irrigation uniformity and potentially increasing the efficiency. We present simulation results obtained with the two-dimensional model B2D for a 1 ha level-basin. If the discharge and/or Manning n are large, the irrigation efficiency can be improved by up to a 15% due to the opening of an outflow gate. Location and geometry of the gate have a strong effect on the total outflow volume.

Introducción

Históricamente el riego por inundación es el riego de pequeñas áreas, de forma cuadrada o rectangular, con pendiente nula o despreciable y rodeadas totalmente por diques o caballones que controlan el volumen aplicado impidiendo la escorrentía. La utilización de caudales elevados es una práctica común en el riego por inundación. Su objetivo es provocar una rápida cobertura de toda la superficie y obtener una elevada uniformidad de distribución. La desventaja de esta práctica es que la lámina media infiltrada, en muchos casos, es muy superior a la retenida por el suelo, con lo que las pérdidas por percolación profunda son elevadas y la eficiencia de aplicación es baja.

1 Unidad de Suelos y Riegos (SIA)
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (CSIC-DGA)
Servicio de Investigación Agroalimentaria (DGA).
Apdo. 727, 50080 Zaragoza

2 Dpto. Genética y Producción Vegetal (EEAD)
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (CSIC-DGA)
Estación Experimental de Aula Dei (CSIC)
Apdo. 202, 50080 Zaragoza

Nuestra propuesta pretende, sin afectar a la uniformidad de distribución, disminuir la lámina media infiltrada, reduciendo las posibles pérdidas por percolación profunda. La alternativa consiste en, una vez concluida la fase de avance, abrir un punto de desagüe en el dique colindante con el tablar siguiente. De esta manera, el agua de desagüe puede aumentar la eficiencia de riego del tablar en el que se extrae y de aquel en que se aplica (aumentando el caudal de riego). Todos los experimentos numéricos llevados a cabo en este trabajo se han realizado con modelos de simulación bidimensionales.

Material y métodos

Los modelos de simulación son una herramienta que facilita la toma de decisiones en operaciones y evaluaciones de riego. Los modelos hidrodinámicos del riego por superficie simulan las distintas fases del riego utilizando las ecuaciones que describen el movimiento del agua sobre la superficie del suelo. Estas ecuaciones expresan dos principios físicos: conservación de la masa (mediante un balance de volúmenes de agua) y conservación del momento o cantidad de movimiento (Strelkoff, 1970).

La diferencia entre modelos unidimensionales y bidimensionales es que los primeros expresan el movimiento del agua en una sola dirección, la de las x , mientras que los segundos lo expresan en dos direcciones espaciales, x e y . En el caso estudiado se hace necesario el uso de un modelo en dos dimensiones, ya que al provocar una apertura del dique en un lateral de la parcela se produce un movimiento del agua que es claramente bidimensional. El flujo en la dirección y es el que produce la salida del agua a través del desagüe.

El modelo que hemos utilizado para simular el riego por inundación es el B2D (Playán *et al.* 1994). Este modelo resuelve las ecuaciones del flujo para obtener valores de las variables dependientes en distintos tiempos y en todos los nudos de una red regular. Estas variables dependientes son: p (caudal unitario en la dirección x , m^2s^{-1}), q (caudal unitario en la dirección y , m^2s^{-1}) y h (calado, m). Las ecuaciones se resuelven usando un método explícito del tipo *leapfrog*. Una vez concluida la fase de avance, se corta la entrada de agua. Cuando la lámina se estabiliza y la velocidad del agua en el dominio es despreciable, es la ecuación de infiltración del suelo la que determina las fases de vaciado y receso. Al haber un dique rodeando la parcela no hay posibilidad de escorrentía.

Para resolver el caso del desagüe se modificó el modelo B2D. El modelo resultante sigue los mismos pasos que el original hasta que se concluye el avance y se corta la entrada de agua. Para definir un punto de desagüe son necesarios dos nudos contiguos situados en el borde de la parcela, en los que se aplican las ecuaciones de vertedero. La configuración del desagüe se indica en la figura 1.

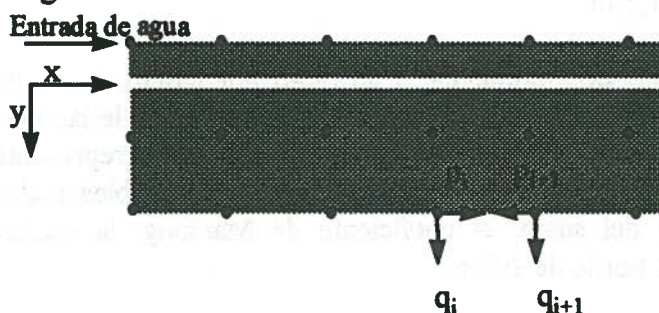


Figura 1. Configuración de un punto de desagüe en el modelo B2D. El desagüe afecta a los nudos i e $i+1$.

Concluida la fase de avance, los valores de p y q en los nudos afectados se calculan en los intervalos de tiempo impares según las siguientes ecuaciones de régimen crítico:

$$p[i] = + \frac{w\sqrt{h[i]^3 g}}{2\Delta x} \quad (1)$$

$$q[i] = - \frac{w\sqrt{h[i]^3 g}}{2\Delta x} \quad (2)$$

$$p[i + 1] = - \frac{w\sqrt{h[i + 1]^3 g}}{2\Delta x} \quad (3)$$

$$q[i + 1] = - \frac{w\sqrt{h[i + 1]^3 g}}{2\Delta x} \quad (4)$$

donde g es la aceleración de la gravedad ($m\ s^{-2}$), Δx es la distancia entre nudos en la dirección x (m), y w es la anchura de la sección crítica (m). En el resto de nudos p y q se calculan en base a las ecuaciones de conservación de momento. En los intervalos de tiempo pares se calcula h para todos los nudos utilizando la ecuación de continuidad. El caudal total desaguado (Q_D , $m^3\ s^{-1}$) se calcula según la expresión :

$$Q_D = -(q[i] + q[i + 1])\Delta x \quad (5)$$

La parcela elegida para el ensayo es de 1 ha, con unas dimensiones de 200 m de largo y 50 m de ancho. La cuadrícula en que se ha dividido el dominio es de 10 x 10 m. El número total de nudos es de 126. Se detallan a continuación otras características de la parcela de estudio. Éstas pueden ser modificadas en adelante para establecer la sensibilidad del volumen desaguado a las principales variables. El riego se efectúa desde una esquina con un caudal de $0,100\ m^3\ s^{-1}$. La infiltración se ha caracterizado con la ecuación de Kostiakov-Lewis, utilizándose por defecto la familia 0,50 (Gharbi, 1984). El coeficiente de Manning seleccionado fue de 0,15. El nudo desagüe se situó en el centro del borde opuesto al punto de riego y la anchura de éste es de 1,5 m.

El análisis de las dos modalidades de riego por inundación: sin desagüe (SD) y con desagüe (CD), se ha realizado representando la sensibilidad de la lámina media infiltrada a las distintas variables del riego. En algunos casos también se ha representado el porcentaje del volumen de agua evacuado respecto al total aplicado. Las variables analizadas son el caudal, la familia de infiltración del suelo, el coeficiente de Manning, la anchura del desagüe y su localización dentro del borde de 200 m.

Resultados y discusión

En primer lugar se presenta el análisis del efecto del caudal sobre el volumen de desagüe. Se realizaron simulaciones para valores de caudal en el intervalo de $0,025 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $0,300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (con incremento de $0,025 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Se utilizaron dos tipos de suelo con parámetros de infiltración extremos, representando un suelo arcilloso (familia 0,25) y otro arenoso (familia 0,70). La tabla 1 presenta algunos resultados de las simulaciones.

Tabla 1. *Volumen total de agua de riego y tiempo de avance para diferentes caudales y para dos tipos de suelo.*

Suelo arcilloso (familia 0,25 SCS)			Suelo arenoso (familia 0,70 SCS)		
q (m^3s^{-1})	Volumen total (m^3)	Tiempo de avance (min)	q (m^3s^{-1})	Volumen total (m^3)	Tiempo de avance (min)
0,050	736	245,6	0,050	1955	652,0
0,075	757	168,4	0,075	1220	271,4
0,100	796	132,8	0,100	1097	183,1
0,150	877	97,6	0,150	1062	118,1
0,175	917	87,4	0,175	1075	101,3
0,200	955	75,5	0,200	1097	79,7
0,250	1029	68,7	0,250	1143	76,3
0,275	1061	64,4	0,275	1168	70,9
0,300	1093	60,8	0,300	1192	66,3

La figura 2A presenta los resultados correspondientes al suelo arcilloso. En ausencia de desagüe, el aumento del caudal de riego se traduce en un incremento de la lámina media infiltrada. Esto es debido a que el volumen superficial de agua al final del avance aumenta sustancialmente con el caudal de riego. Consecuentemente, el volumen de riego es mayor cuando el caudal es elevado. Cuando se riega con desagüe, la lámina media infiltrada permanece insensible a la variación del caudal. El caudal desaguado es función de la lámina de agua en el punto de desagüe y ésta a su vez del caudal de riego. Por ello, un mayor caudal supone un mayor volumen evacuado. De esta manera se consigue que el volumen infiltrado permanezca constante.

En la figura 3A se presentan los resultados del suelo arenoso. La lámina media infiltrada sigue la misma tendencia en los casos CD y SD. Sin embargo, para un mismo caudal la lámina infiltrada es siempre menor en el caso CD. En ambos casos, aumentos del caudal hasta $0,100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ producen fuertes disminuciones de la lámina media infiltrada. En suelos arenosos regados con caudales pequeños la infiltración es el proceso dominante, por lo que el aumento del caudal disminuye la lámina infiltrada. Cuando el caudal es pequeño (menor de $0,100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), la diferencia entre CD y SD es mínima. Para caudales elevados, en el caso CD la lámina permanece estabilizada, tal como ocurría en el suelo arcilloso. Las figuras 2B y 3B representan las uniformidades de distribución (Merriam y Keller, 1978) para los dos tipos de suelos. En ambos casos el aumento del caudal mejora la uniformidad de distribución y no se aprecian grandes diferencias entre los casos CD y SD.

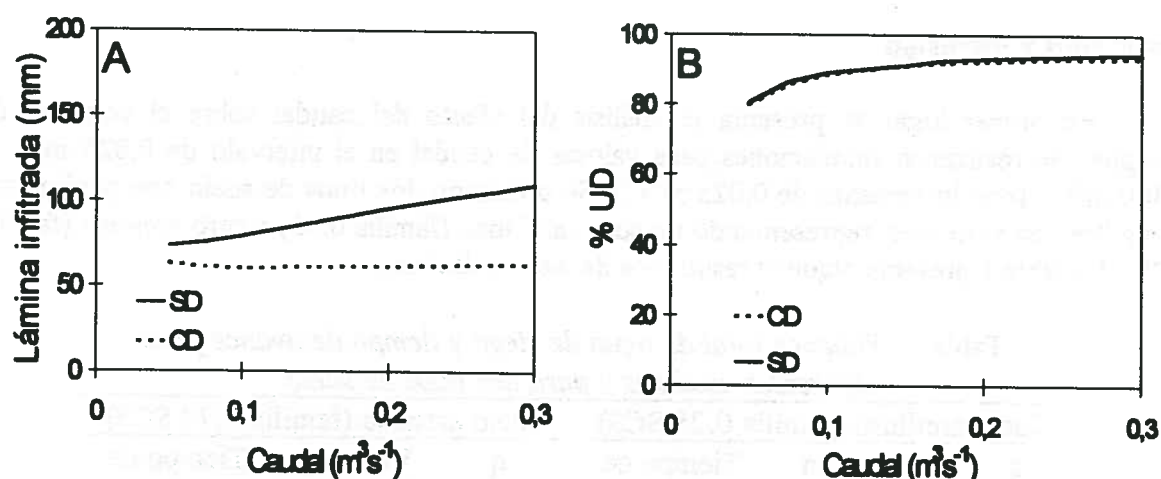


Figura 2. Suelo arcilloso (familia 0,25 SCS). Evolución de la lámina infiltrada (A) y de la uniformidad de distribución (B) al incrementar el caudal bajo dos formas de riego: sin desagüe (SD) y con desagüe (CD).

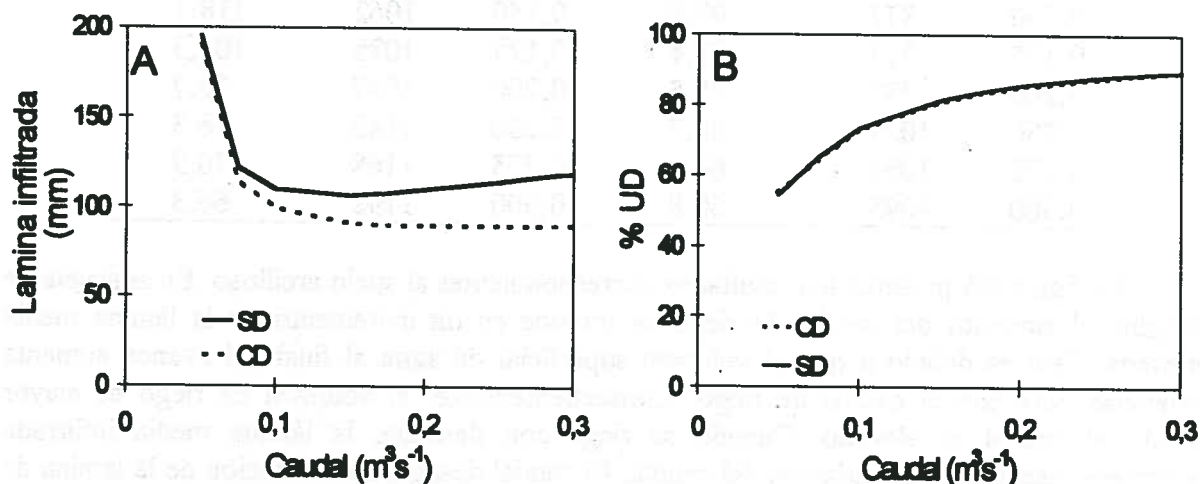


Figura 3. Suelo arenoso (familia 0,70 SCS). Evolución de la lámina infiltrada (A) y de la uniformidad de distribución (B) al incrementar el caudal bajo dos formas de riego: sin desagüe (SD) y con desagüe (CD).

La resistencia de la superficie del suelo y de la vegetación al avance del agua es un factor que determina el tiempo de avance y de receso del riego. Por lo tanto, el coeficiente n de Manning influye en los tiempos de oportunidad y en las láminas medias infiltradas. La figura 4A presenta la lámina media infiltrada resultante de valores de n desde 0,04 hasta 0,24, con incrementos de 0,02. De la figura se desprende que un aumento en la resistencia resulta en una mayor lámina infiltrada para ambas modalidades de riego. En el caso CD la lámina es siempre menor, y la pendiente resulta más suave que la del caso SD. La figura 4B representa el efecto del coeficiente n sobre el porcentaje de volumen evacuado por el desagüe respecto del volumen total aplicado. El volumen evacuado oscila desde el 8% ($n=0,04$, característico del maíz) hasta el 16% ($n=0,24$, característico de la alfalfa desarrollada). La tabla 2 recoge los resultados en cuanto a volúmenes totales de riego y tiempos de avance que, para diferentes valores del coeficiente de Manning, hemos obtenido de las simulaciones.

Tabla 2. Para los diferentes coeficientes de Manning se presentan los volúmenes totales de riego, así como el tiempo de duración de la fase de avance.

Coeficiente de Manning	Volumen total (m ³)	Tiempo de avance (min)
0,04	678	113,2
0,06	781	130,3
0,08	864	144,2
0,10	935	156,0
0,12	1002	167,1
0,14	1062	177,2
0,16	1116	186,1
0,18	1165	194,4
0,20	1211	201,8
0,22	1256	209,4
0,24	1299	216,6

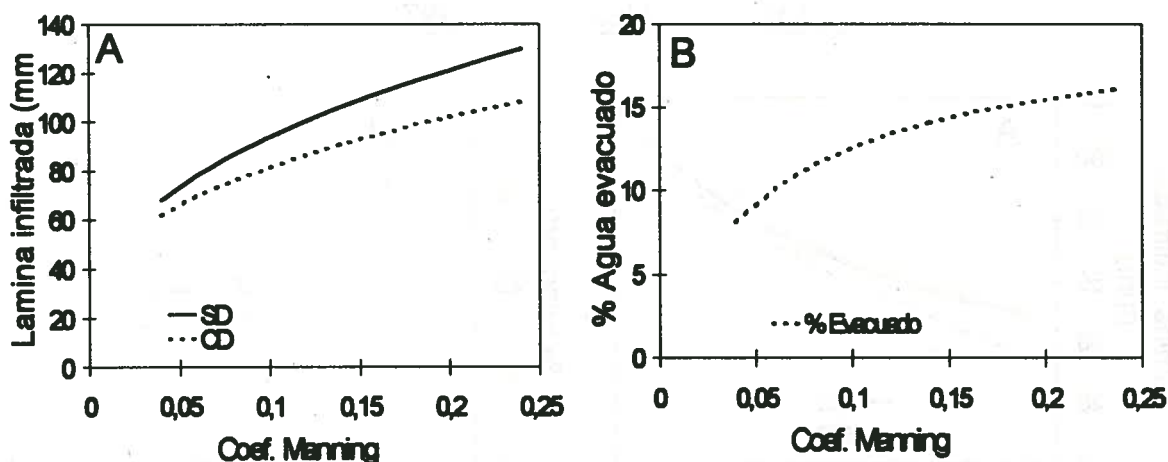


Figura 4. Evolución de la lámina infiltrada (A) y del porcentaje de agua evacuado (B) al incrementar el coeficiente de rugosidad de Manning al regar sin desagüe (SD), y con desagüe (CD).

Las características de infiltración del suelo se han expresado según la terminología del SCS, que numera las familias de infiltración desde las arcillosas (FAM 0,20), hasta las arenosas (FAM 1,00). En la transición de familias arcillosas a arenosas la lámina infiltrada se incrementa fuertemente (figura 5A). Esto es debido a que al incrementarse la infiltración se ralentiza el proceso de avance y el volumen de agua que entra en la parcela es muy elevado. Las mayores diferencias de la lámina infiltrada entre un riego CD y otro SD se dan en los suelos arcillosos. En éstos, la baja tasa de infiltración hace que el proceso de almacenamiento superficial domine sobre la infiltración. Esto hace que el volumen de agua evacuada sea mucho mayor en estos suelos, tal como se presenta en la figura 5B. La tabla 3 recoge los resultados de las simulaciones para distintas familias de infiltración.

Tabla 3. Volúmenes totales de riego y tiempos de avance para suelos con diferentes características de infiltración

Familia SCS	Volumen total (m ³)	Tiempo de avance (min)
0,05	482	80,5
0,10	505	84,4
0,15	524	87,4
0,20	542	90,4
0,25	563	94,0
0,30	582	97,1
0,35	606	101,1
0,40	623	104,0
0,45	651	108,6
0,50	678	113,2
0,60	739	123,4
0,70	815	135,9
0,80	910	151,8
0,90	1033	172,4
1,00	1185	197,7

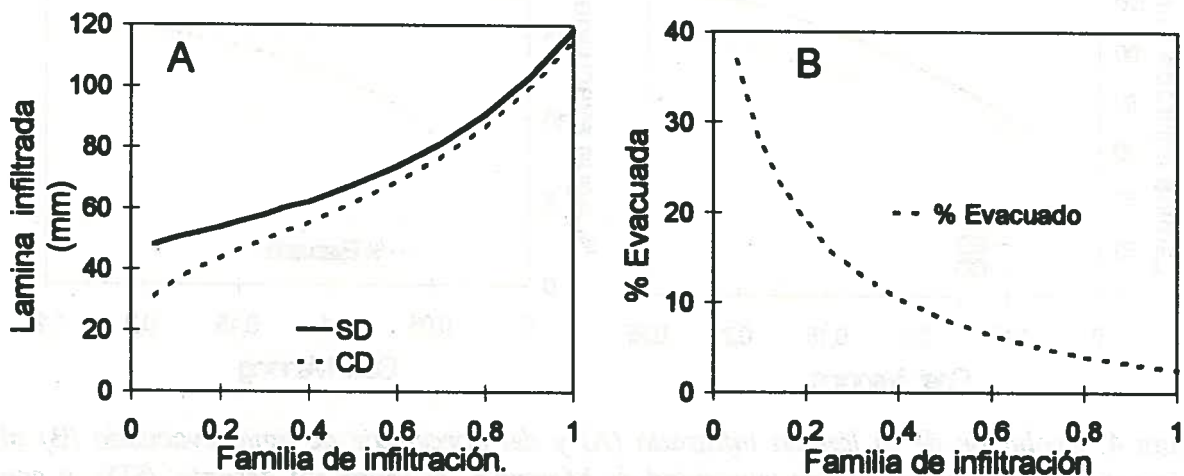


Figura 5. Evolución de la lámina infiltrada (A) y del volumen de agua evacuado (B) al modificar la familia de infiltración, para un riego sin desagüe (SD) y con desagüe (CD).

La geometría del desagüe influye decisivamente sobre el caudal evacuado. En este trabajo analizamos el efecto de la anchura del desagüe, variándola desde 0 hasta 2,5 m con incrementos de 0,25 m. Resulta evidente que esta variable no influye en el riego sin desagüe. A medida que aumenta la anchura aumenta el caudal evacuado (figura 6B). El resultado es que la lámina media infiltrada disminuye linealmente (figura 6A). Es necesario señalar que consideramos como anchura del desagüe la anchura de la sección crítica. La anchura de esta sección no coincide en la mayoría de los casos con la de la compuerta que se abre en el dique. El régimen crítico puede producirse aguas arriba de la compuerta si la cota de la zona de desagüe es inferior a la del tablar de riego. En este caso, la anchura de la sección crítica podría ser mayor que la de la apertura del dique.

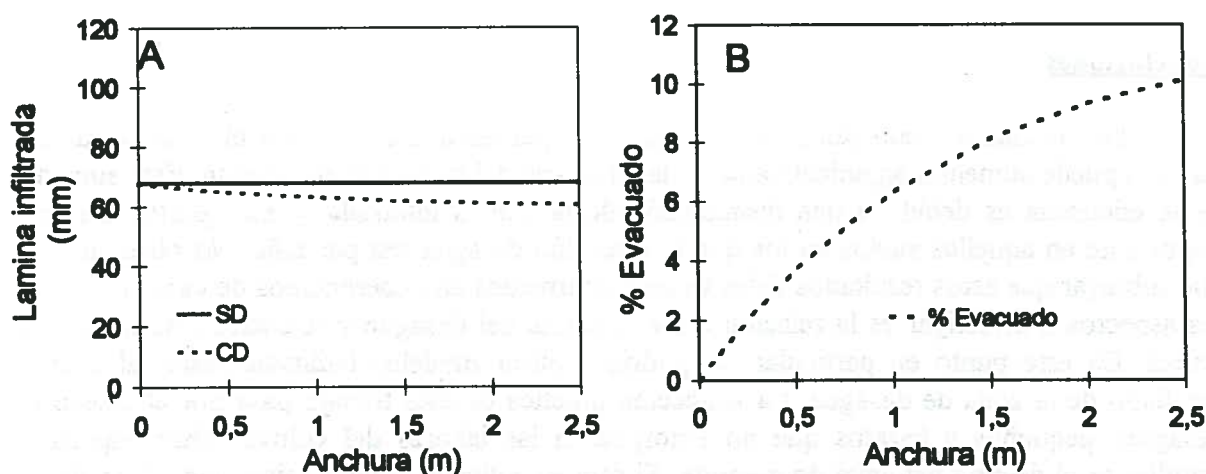


Figura 6. Evolución de la lámina infiltrada (A) y del volumen de agua evacuado (B) al aumentar la anchura de la sección crítica del desagüe, para un riego sin desagüe (SD) y con desagüe (CD).

Por último se presenta el efecto de la localización a lo largo del borde de 200 m del punto de desagüe sobre la lámina infiltrada y el porcentaje de agua evacuada. Se realizaron simulaciones localizando el desagüe a distancias de 20 a 180 m de la esquina simétrica a la de la entrada del agua. El incremento de la distancia fue de 20 m. En el riego con desagüe se aprecia un ligero descenso de la lámina al alejar el desagüe de la esquina inicial hasta los 80 m. A partir de este punto la lámina vuelve a aumentar (figura 7A). En la figura 7B se puede observar cómo el volumen evacuado aumenta al avanzar la localización del desagüe en el borde. El valor máximo aparece a una distancia de 80 m. A partir de este punto el volumen descende acusadamente.

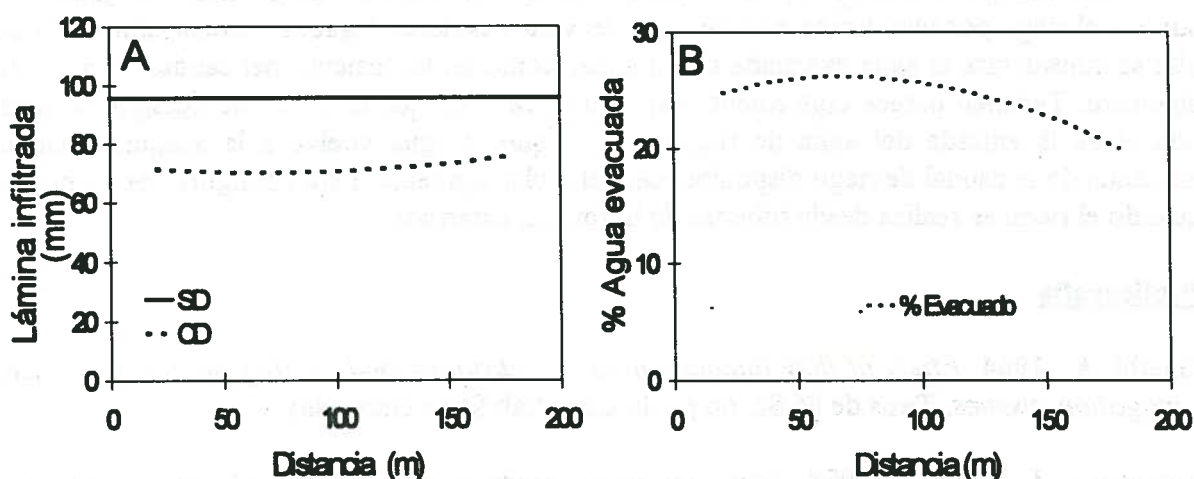


Figura 7. Evolución de la lámina infiltrada (A) y del volumen de agua evacuado (B) al modificar la localización del nudo desagüe a lo largo del borde de 200 m opuesto a la entrada de agua, para un riego sin desagüe (SD) y con desagüe (CD).

Conclusiones

Los resultados obtenidos de la simulación permiten concluir que el desagüe de los tablares puede aumentar significativamente la eficiencia del riego por inundación. Este aumento de la eficiencia es debido a una disminución de la lámina infiltrada, y será particularmente importante en aquellos suelos en los que la retención de agua sea pequeña. No obstante, hay que subrayar que estos resultados deberán ser confirmados en experimentos de campo. Uno de los aspectos a investigar es la relación entre la forma del desagüe y la anchura de la sección crítica. En este punto en particular, se podrían aplicar modelos bidimensionales al estudio detallado de la zona de desagüe. La aplicación práctica de este trabajo pasa por el diseño de desagües pequeños y baratos que no entorpezcan las labores del cultivo. Otro aspecto a estudiar es el destino del agua de desagüe. Si ésta es aplicada al tablar siguiente, el caudal se suma al de riego, y el efecto beneficioso del desagüe podría verse potenciado.

En las simulaciones realizadas, el riego por inundación con desagüe ha resultado beneficioso en los siguientes casos:

- Tablares de riego por inundación con caudal de riego elevado y con suelos pertenecientes al intervalo de familias de infiltración del 0,15 al 0,8 (textura franco-limosa o más fina).
- Cuando el cultivo presenta mucha resistencia al avance del agua (alto coeficiente de Manning), como es el caso del trigo encañado o la alfalfa.
- Una vez confirmada la conveniencia de realizar un riego con desagüe, los mejores resultados se obtienen con anchuras de sección crítica superiores a 1,5 m. El desagüe debe estar localizado próximo a la mitad, aguas arriba, del borde más largo del tablar.

En trabajos posteriores pretendemos analizar el incremento de la eficiencia global que supone el riego por inundación con desagüe de varios tablares regados secuencialmente. Para ello se considerará el agua evacuada de un tablar como un incremento del caudal de riego del siguiente. También parece conveniente explorar el caso en que el punto de desagüe coincide con el de la entrada del agua de riego, con lo que el agua vuelve a la acequia principal aumentando el caudal de riego disponible para el tablar siguiente. Esta configuración es posible cuando el riego se realiza desde tuberías de hormigón enterradas.

Bibliografía

- Gharbi, A., 1984. *Effect of flow fluctuation on free-draining and sloping furrow and border irrigation systems*. Tesis de M Sc. no publicada, Utah State University.
- Merriam, J. L., Keller, J., 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Utah State University, Logan, Utah. 271 pp.
- Playán, E., Walker, W. R., Merkley, G. P., 1994. *Two-dimensional simulation of basin irrigation. I: Theory*. ASCE J. Irrig. Drain. Div., 120(5), 837-856.
- Strelkoff, T., 1970. *Numerical solution of the Saint-Venant equations*. ASCE J. Hydr. Div., 96(1), 223-252.

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN RIEGO POR ASPERSIÓN CON EL MODELO "SIRIAS"

Tarjuelo J.M. , Carrión P., Montero J. y Valiente M.

Dpto. de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. E.T.S.I. Agrónomos. Campus Universitario s/n, Albacete. Universidad de Castilla-La Mancha. Tfno: 967-22.02.70. E-mail: tarjuelo@prov-ab.uclm.es

RESUMEN

Para facilitar el diseño de nuevas instalaciones de riego por aspersión e incluso para poder mejorar las existentes se ha desarrollado un modelo de simulación de riego por aspersión estacionario que evita tener que realizar los laboriosos ensayos de campo necesarios para conocer la distribución de agua por el sistema de riego. El modelo está basado en la aplicación de la teoría balística al movimiento de una gota en el aire contemplando la acción del viento. Los datos necesarios son prácticamente los correspondientes a la curva radial de distribución pluviométrica del aspersor. La precisión actual del modelo de simulación es suficiente para conocer la distribución de agua del aspersor bajo cualquier acción del viento, proporcionando así una información muy útil tanto para los ingenieros que han de hacer los proyectos como para los fabricantes de aspersores, e incluso para los propios agricultores, estando disponible para todos los usuarios que lo deseen sin más que ponerse en contacto con los autores.

1.- INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS

La uniformidad de distribución de agua es uno de los factores más importantes en el diseño de un sistema de riego ya que afecta a la producción del cultivo, a la eficiencia de utilización del agua y al lavado del suelo, con el consiguiente peligro de contaminación de acuíferos.

En riego por aspersión, el viento tiene una gran influencia sobre el modelo de distribución de agua. La forma en que normalmente se analiza el efecto del viento sobre la uniformidad de riego es mediante ensayos de campo. Desgraciadamente el número de posibles combinaciones de velocidades y direcciones de viento es muy elevado. Esto hace que a la hora de realizar ensayos de campo, se prefiera determinar el modelo de distribución de agua de un sólo aspersor, el cual puede después solaparse para cualquier espaciamiento, con distintos supuestos de dirección de viento.

Lo que pretende este trabajo es encontrar una ley de variación de los coeficientes correctores del coeficiente de resistencia aerodinámica (K_1 y K_2) con el viento, la presión, etc, y analizar la influencia que estos factores pueden tener en el proceso de distribución de agua utilizando el modelo SIRIAS (Simulación de Riego por ASpersión) (Tarjuelo *et al.* 1995).

2.- METODOLOGÍA

La metodología del modelo de simulación SIRIAS consiste básicamente en lo siguiente:

- 1) Partir de la curva radial de distribución pluviométrica del aspersor en ausencia de viento.
- 2) Utilizar el modelo de simulación, aplicando la teoría balística al movimiento de una gota sobre la que actúa además la velocidad del viento sobre un plano horizontal, hasta obtener el modelo de reparto de agua de un aspersor distorsionado por el viento sobre una red cuadrada y continua de pluviómetros de 0.5 m de lado.

ANALYSIS ON SPLINKLER WATER DISTRIBUTION WITH MODEL "SIRIAS"

Tarjuelo J.M.^p, Carrión P., Montero J. y Vallente M.

Dpto. de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. E.T.S.I. Agrónomos. Campus Universitario s/n, Albacete. Universidad de Castilla-La Mancha.

Tfno: 967-22.02.70

E-mail: tarjuelo@prov-ab.uclm.es

ABSTRACT

This simulated irrigation model for stationary sprinklers has been developed to aid in the design of new sprinkler installations and also to better existing ones, thus avoiding the time-consuming field tests needed to establish water distribution patterns for a given sprinkler system. The model is based on the application of ballistic theory to in-flight drops under outdoor conditions and the data needed corresponds closely to the radial water distribution curve of a sprinkler. The actual precision of the simulated model is sufficient to qualify water distribution under any wind conditions, resulting in information which is useful both to engineers designing irrigation projects and to sprinkler manufacturers, as well as to farmers. SIRIAS is available to potential users on request.

- 3) Solapar el modelo de distribución de agua de un solo aspersor para cualquier espaciado y determinar los parámetros que caracterizan la calidad del riego.

Para la metodología de los ensayos de campo se han seguido las normas ASAE.S.3301 (1993), ISO 7749-2 (1990) y UNE 68-072-86.

La obtención de los parámetros que caracterizan el reparto de agua para los distintos solapamientos se ha realizado utilizando el programa "CATCH 3D Sprinkler Overlap Program" de Allen (1992) u otro similar (Tarjuelo 1989).

3.- RESULTADOS

3.1.- Resultados de los ensayos de campo

Para calibrar el modelo SIRIAS y determinar los valores de los coeficientes K1 y K2 correctores del coeficiente de resistencia aerodinámica que producen mejor ajuste entre el modelo simulado y el medido en campo se han ensayado seis combinaciones de aspersor-boquilla-presión. En primer lugar se han obtenido sus curvas radiales de distribución pluviométrica en ausencia de viento y después las distribuciones de agua de un solo aspersor al aire libre bajo distintas condiciones de viento.

Las combinaciones de aspersor-boquilla-presión elegidas y las condiciones básicas de ensayo se muestran en la tabla 1. Se ha elegido un aspersor AGROS(1) fabricado en España con boquillas de orificio circular excepto en la combinación C6 que utiliza una boquilla especial (E) con orificio en forma de cerradura para trabajar a baja presión.

Tabla 1.- Combinaciones de aspersor-boquilla-presión ensayadas.

IDENTIF.	ASPELOR	BOQUILLAS (mm)	PRESIÓN (kPa)	CAUDAL (m ³ /h)	ALCANCE (m)	EFICIENCIA DE RECOGIDA
C1	A35-PS	4,4+2,4	300	1,69	14,2	90,0
C2	A35-PS	4,4+2,4 (VP)	300	1,66	15,0	85,0
C3	A46	4,4+2,4	350	1,85	15,3	100,0
C4	A35-PS	4,75	300	1,55	15,0	98,2
C5	A35-PS	4,75 (VP)	300	1,50	15,8	90,8
C6	A35	E1+2,4	200	1,71	14,0	99,3

En la figura 1 se han representado las curvas radiales de pluviometría agrupadas por presiones de trabajo donde pueden observarse que hay unas tipo "donut" (C5), otras tipo "elíptico o rectangular" (C2) y otras tipo "triangular" (C3). Estas últimas son las que producen normalmente mayor uniformidad de riego para los distintos espaciados (Tarjuelo *et al.* 1992) y las primeras son las que generalmente producen menor uniformidad.

Con las mismas seis combinaciones de aspersor-boquilla-presión se han realizado ensayos al aire libre bajo distintas condiciones de viento, calculándose los valores de CU para distintos marcos de riego. Estos datos constituyen la base para calibrar el modelo SIRIAS.

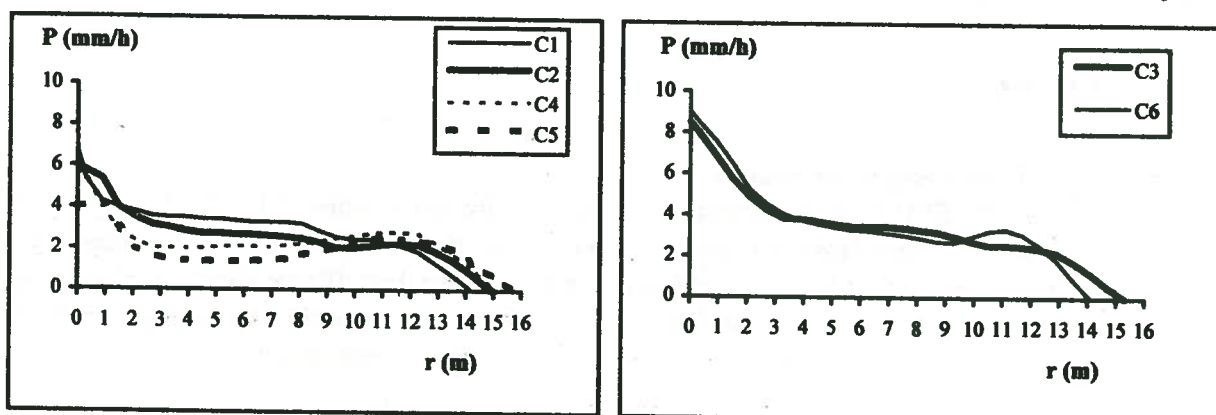
De estos resultados, se han representado gráficamente las variaciones del CU con la velocidad del viento (W), habiéndolos ajustado mediante una ecuación polinómica de tercer grado, al obtener mayor precisión que con ecuaciones de segundo grado (Tarjuelo *et al.* 1992) o de primer grado (Solomon

¹ La mención de la marca es por mera información, no debiendo entenderse como preferencia de ningún producto.

1979; von Bernuth y Seginer 1990), alcanzando unos coeficientes de determinación R^2 en torno a 0.98 frente a 0.94 que se obtienen con las ecuaciones de segundo grado.

Cabe destacar el efecto positivo de la VP (Vaina Prolongadora del chorro) sobre el CU, produciendo unos valores de CU más altos que sin VP para velocidades de viento superiores a unos 2 m/s, confirmando los resultados conseguidos por Tarjuelo *et al.* (1992).

Figura 1.- Curvas radiales de distribución pluviométrica para las diferentes combinaciones ensayadas



3.2.- Aplicación de la simulación con SIRIAS a los ensayos de campo

Para las seis combinaciones de aspersor-boquilla-presión y las distintas condiciones de viento de los ensayos de campo se ha realizado la simulación con el programa SIRIAS para distintas combinaciones de K_1 (con valores entre 0 y 4, a incrementos de 0.25) y K_2 (con valores de 0 a 0.4, con incrementos de 0.05). En ellas se han obtenido los parámetros de similitud ϵ , ϕ y δ (Tarjuelo *et al.* 1995), así como los valores de CU para distintos espaciamentos, y se ha calculado además la diferencia relativa (e) entre valores de CU medidos y simulados.

De las más de mil quinientas simulaciones realizadas puede deducirse lo siguiente:

- El valor de CU disminuye al aumentar los coeficientes K_1 y K_2 ya que se distorsiona más el modelo.
- El coeficiente K_1 tiene una mayor influencia que el K_2 sobre el modelo simulado.
- Con vientos débiles las variaciones de K_1 y K_2 influyen poco sobre el valor de CU, ocurriendo lo contrario con vientos medios o fuertes.
- El valor del parámetro ϕ , que mide el grado de solapamiento entre las áreas mojadas por la distribución de agua medida y simulada, es superior a 0.85 en la mayoría de los casos.
- El parámetro δ es el más importante, al comparar las pluviometrías simuladas y medidas en campo en cada uno de los puntos de la red cuadrada a equidistancia de 2 m. Los valores de este parámetro son algo distintos de unos ensayos de campo a otros ya que no suelen ser constantes las condiciones de viento, humedad, temperatura, evaporación, etc, durante el ensayo, al contrario de lo que ocurre en la simulación.

3.3.- Influencia de los coeficientes K_1 y K_2 en el modelo simulado

- Si no se aplica ningún coeficiente corrector ($K_1 = 0$, $K_2 = 0$) el perímetro mojado toma forma circular, obteniéndose una mala similitud con el ensayo de campo. Ésta se pone de manifiesto con unos valores muy bajos del parámetro ϕ y valores muy altos para el δ , así como un desplazamiento del centro de gravedad de la distribución de agua (c.d.g.) inferior a la real. En

este sentido cabe destacar que Seginer *et al.* (1991) obtuvieron que el desplazamiento del c.d.g. en ensayos de campo (medido en m) es aproximadamente $0.96 W$ (con W en m/s).

- Al aplicar un coeficiente corrector K_1 el modelo de distribución de agua se estrecha de forma simétrica según la dirección perpendicular a la del viento y en menor cuantía en la propia dirección del viento. Toma pues una forma elíptica y aumenta mucho el grado de similitud con el ensayo de campo.

El estrechamiento es mayor cuanto mayor es el valor de K_1 , produciendo además un mayor desplazamiento del c.d.g. y una disminución del valor de CU.

- Con el coeficiente K_2 el modelo simulado se traslada en la dirección del viento, acortándose en su parte anterior (a barlovento) y alargándose en mayor medida en su parte posterior (a sotavento), pero sin producir ningún efecto en la dirección perpendicular al viento.

Al aumentar K_2 el área mojada crece ligeramente al ser mayor el aumento a sotavento que la disminución a barlovento, desplazando ligeramente el c.d.g. en el sentido del viento.

La influencia de este coeficiente es mucho menor que la de K_1 .

- Combinando los coeficientes K_1 y K_2 se consigue el mejor ajuste entre el modelo simulado y el obtenido en los ensayos de campo.

3.4.- Determinación de valores óptimos de K_1 y K_2

Antes de pasar a identificar los valores de K_1 y K_2 que optimizan la simulación se han realizado simulaciones para vientos intermedios a los existentes en los ensayos de campo.

Para encontrar los valores de K_1 y K_2 más adecuados se han buscado las combinaciones de K_1 y K_2 que producen unas diferencias relativas entre valores de CU medidos y simulados (ϵ) menor del 5% para el conjunto de espaciamientos estudiados, al entender que con la simulación se obtiene un modelo de distribución de agua válido para cualquier espaciamiento entre aspersores.

En esta selección se han tenido en cuenta además aquellas combinaciones de K_1 y K_2 que daban mejores parámetros de similitud ϵ , ϕ y δ , que como ya se ha dicho antes suelen ir asociados a los menores valores de (ϵ).

De las simulaciones con vientos intermedios también se han tomado aquellas combinaciones que cumplen las condiciones anteriores respecto al valor de CU deducido de la curva de ajuste que representa la variación de CU con la velocidad del viento W en base a los ensayos de campo.

Para cada una de las combinaciones aspersor-boquilla-presión (C1 a C6) y para un mínimo de ocho condiciones de viento (entre 0 y 7 m/s) se han tomado entre cuatro y seis combinaciones de K_1 y K_2 que cumplieran las anteriores condiciones. Tratando de buscar alguna relación de K_1 y K_2 con los principales factores que condicionan la distribución de agua se han representado los valores de K_1 y K_2 seleccionados con la velocidad del viento al parecer éste uno de los factores más importantes, aunque no el único, obteniéndose los siguientes resultados:

- La recta que relaciona K_1 con W es descendente mientras que la relaciona K_2 con el viento es ascendente.

La influencia de la presión es el principal factor corrector del coeficiente de resistencia aerodinámica de la gota moviéndose en el aire (K_1), explicándose porque ésta condiciona la velocidad de salida de la gota desde la boquilla, y por tanto las condiciones de vuelos.

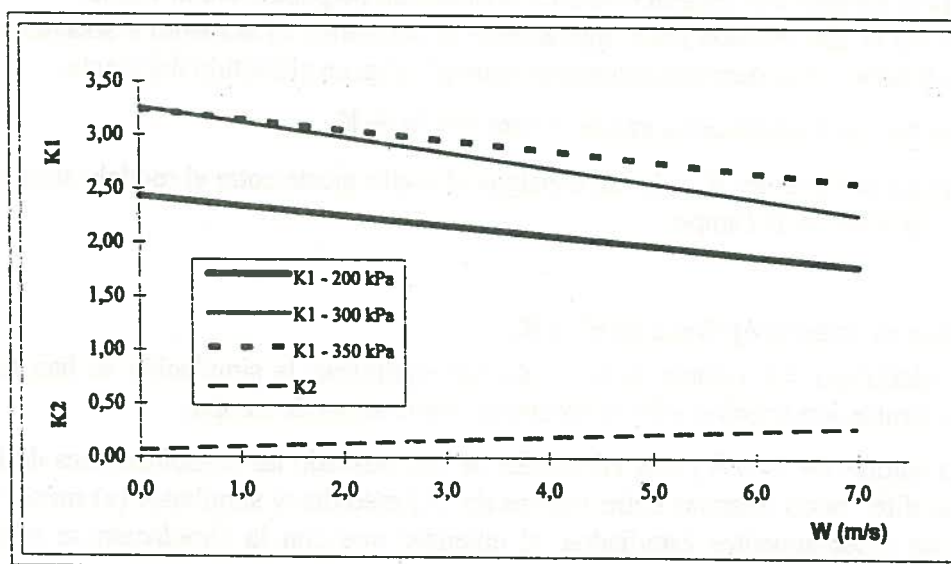
Los resultados definitivos que relacionan los coeficientes K_1 y K_2 con W se muestran en la fig. 2, correspondiendo a las siguientes ecuaciones, donde W viene expresada en m/s.

$$\begin{aligned} \text{A } 350 \text{ kPa} & \quad K_1 = 3.245 - 0.096 W \\ \text{A } 300 \text{ kPa} & \quad K_1 = 3.264 - 0.141 W \\ \text{A } 200 \text{ kPa} & \quad K_1 = 2.433 - 0.091 W \end{aligned}$$

$$K_2 = 0.065 + 0.032 W \text{ (independiente de la presión).}$$

Por último conviene recordar que así como las ecuaciones de K_1 para 300 y 350 kPa corresponden a boquillas con orificio circular, la de 200 kPa se ha deducido para una boquilla especial con orificio en forma de cerradura, no pudiendo por tanto generalizarse a priori.

Figura 2.- Relación entre los coeficientes correctores K_1 y K_2 con la velocidad del viento W .



3.5.- Influencia de las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento.

El programa SIRIAS contempla tres opciones para estimar estas pérdidas:

- Repartir las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento proporcionales a la pluviometría caída en cada punto.
- Repartir las pérdidas por arrastre como en la opción A y las pérdidas por evaporación en proporción inversa al tamaño de gota, y solo en la parte de la distribución de agua correspondiente a los diámetros de gota menores de 2 mm.
- Repartir las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento en proporción inversa al tamaño de gota como en la opción B.

Las pérdidas por evaporación y arrastre durante los ensayos de campo se han calculado como diferencia entre el volumen de agua descargada por el aspersor y la recogida por los pluviómetros.

Los resultados obtenidos muestran que las diferencias en el valor de CU estimado por los tres procedimientos es normalmente menor del 5 %, ajustándose mejor a los datos de campo con las opciones B y C, existiendo menores diferencias entre estas dos opciones que entre cualquiera de ellas y la A, lo que parece razonable teniendo en cuenta como se han generado.

En los resultados obtenidos han aparecido mayores diferencia entre los valores de CU simulados con las tres opciones cuando el aspersor funciona con una sola boquilla. La explicación de este hecho

puede estar en que con una sola boquilla hay siempre menor pluviometría con diámetro de gota menor de 2 mm que es donde concentran las pérdidas las opciones B y C.

3.6.- Comprobación del modelo resultante

Con el fin de comprobar la precisión conseguida con el modelo de simulación SIRIAS se ha aplicado el mismo a las seis combinaciones de aspersor-boquilla-presión (C1 a C6) para ocho intensidades de viento (entre 0 y 7 m/s) utilizando todas las recomendaciones deducidas antes para los distintos parámetros internos y coeficientes correctores K_1 y K_2 .

Tabla 2.- Errores diferenciales entre los valores de CU simulados y los deducidos en la curva CU-W para las diferentes combinaciones y espaciamentos entre aspersores.

	12x12	18x18	12x18	16x18	16x20	18x16 T	MEDIA
C1	5.3	2.5	3.9	1.7	2.0	2.9	3.0
C2	3.2	3.3	2.3	3.1	1.1	4.6	2.9
C3	3.1	2.0	3.2	2.2	3.8	1.9	2.7
C4	2.2	4.9	2.8	4.9	2.3	5.1	3.7
C5	3.1	3.3	1.7	4.2	2.9	2.9	3.0
C6	2.1	3.6	3.1	2.7	1.7	4.8	3.0
MEDIA	3.2	3.3	2.8	3.1	2.3	3.7	3.1

Del análisis de los resultados obtenidos cabe destacar que:

- La diferencia relativa entre valores de CU medidos y simulados (e) es del 3.1 % para el conjunto de las 6 combinaciones, las 8 velocidades de viento y los 6 espaciamentos entre aspersores (es decir un total de 288 casos), según puede verse en la tabla 2, donde se muestran los valores medios de (e) para cada una de las ocho velocidades de viento. De la tabla se deducen que, por espaciamentos entre aspersores, el mayor error está en el triangular y por combinaciones aspersor-boquilla-presión, el mayor error está en la C4.
- El valor de (e) es menor de 2.5 % en el 49 % de los casos, está comprendido entre 2.5 % y 5% en el 33 % de los casos y tan sólo ha llegado a valer 11 % en el 1 % de los casos.
- El hecho de que en más del 80% de los casos el valor de (e) sea menor del 5 % resulta, a nuestro juicio, satisfactorio si tenemos en cuenta que este error engloba diferente tipos y niveles de errores como son:
 - ◆ Los errores típicos de los ensayos de campo, que como ya se ha indicado en la metodología engloban tanto los típicos errores del método experimental en la medida del caudal, la presión, el volumen recogido en los pluviómetros, etc. como la variabilidad de las condiciones climáticas durante el ensayo y la diferente evaporación en los pluviómetros, dependiendo de que se encuentren en el centro o en los bordes de la zona mojada o del tiempo que transcurra hasta que se realiza su medida.
 - ◆ Errores cometidos en el ajuste de las curvas que relacionan CU con W al corresponder diferentes direcciones de viento.
 - ◆ Errores intrínsecos del modelo de simulación, tanto a nivel de fijar los parámetros internos de funcionamiento como los coeficientes conectores K_1 y K_2 , haciéndolos variar linealmente con la velocidad del viento.
 - ◆ Errores en la estimación del reparto de las pérdidas por evaporación y arrastre.

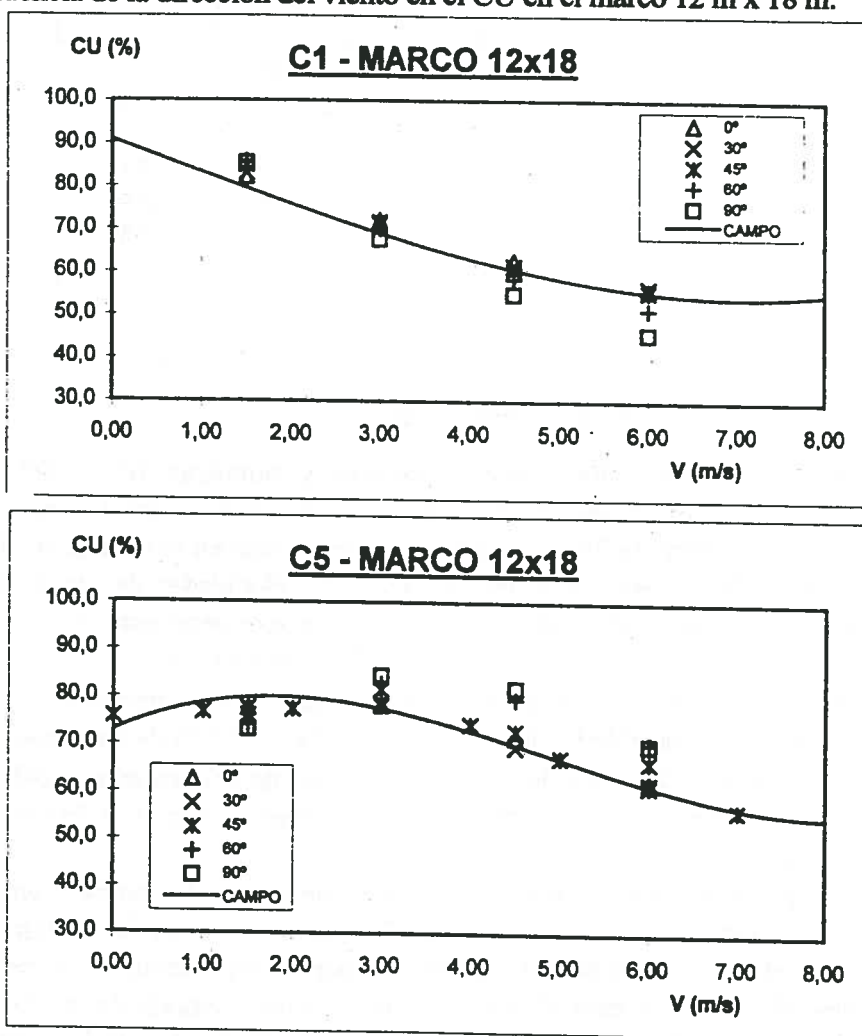
3.7.- Influencia de la dirección del viento

Una vez comprobado que el modelo SIRIAS tiene suficiente precisión para estimar la distribución de agua bajo la acción del viento se ha pasado a analizar la influencia de la dirección del viento sobre el CU con este modelo.

Para contemplar diferentes situaciones respecto al número y diseño de las boquillas y a la presión de trabajo se han analizado las diferentes combinaciones de la tabla 1 utilizando las cinco direcciones de viento : 0° , 30° , 45° , 60° y 90° .

En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos para el marco 12 m x 18 m al ser uno de los que presentan mayor sensibilidad a la dirección del viento dada la gran diferencia entre sus dos espaciamentos, para las combinaciones C1 (doble boquilla) y C5 (una sola boquilla).

Figura 3.- Influencia de la dirección del viento en el CU en el marco 12 m x 18 m.



De los resultados se deducen prácticamente las mismas conclusiones que se habían obtenido en estudios previos (Tarjuelo *et al.* 1992) con otros aspersores y otras boquillas, y que se pueden resumir en la siguiente:

- Cuando el aspersor funciona con dos boquillas se consigue un mayor valor de CU cuando el viento sopla en la dirección del mayor espaciamiento, ocurriendo justo lo contrario cuando el aspersor funciona con una sola boquilla.
- La influencia de la dirección del viento sobre el CU es mayor:

- ◆ Cuanto mayor es la diferencia entre espaciamentos en el marco, siendo muy pequeña en los marcos cuadrados y triangulares
- ◆ Cuando el aspersor trabaja con una sola boquilla que cuando lo hace con dos boquillas o con boquillas especiales de baja presión.

4.- CONCLUSIONES

- La variación del coeficiente de uniformidad (CU) con la velocidad del viento (W) deducida a partir de ensayos al aire libre con un solo aspersor se ajusta mejor a una ecuación polinómica de tercer grado que a una de segundo grado o lineal como proponen otros autores.
- En el modelo de simulación de riego por aspersión SIRIAS es muy importante introducir los coeficientes conectores del coeficiente de resistencia aerodinámica K_1 y K_2 para poder reproducir bien el modelo de distribución de agua de un aspersor distorsionado por el viento.
- La influencia de K_1 es mucho mayor que la de K_2 en el modelo simulado, existiendo una única combinación de ambos que produce un valor mínimo de parámetro de similitud δ que mide las diferencias de pluviometría entre el modelo simulado y el medido en campo.
- Se han determinado unas ecuaciones lineales que relacionan K_1 y K_2 con W, donde K_1 disminuye al aumentar W, y depende además de la presión de funcionamiento del aspersor, mientras que K_2 crece al hacerlo W, no dependiendo de otros factores adicionales.
- Para aspersores semejantes a los estudiados puede decirse que el error medio previsible al estimar el valor de CU para cualquier condición de viento y espaciamiento entre aspersores en el entorno de los estudiados será del orden del 3 % al 5 %. Este error parece razonable a nuestro juicio ya que engloba tanto los errores cometidos en los ensayos de campo como en el proceso de simulación.
- Se consigue un mejor ajuste entre los datos simulados y los de campo al estimar las pérdidas por evaporación y arrastre en proporción inversa al tamaño de gota, con diámetros de gotas menores de 2 mm, sobre todo en modelos radiales del tipo triangular.
- Cuando el aspersor funciona con dos boquillas se consigue un mayor valor de CU cuando el viento sopla en la dirección del mayor espaciamiento, ocurriendo justo lo contrario cuando el aspersor funciona con una sola boquilla. La influencia de la dirección del viento sobre el CU es mayor cuanto mayor es la diferencia entre espaciamentos en el marco, siendo muy pequeña en los marcos cuadrados y triangulares. Igual ocurre cuando el aspersor trabaja con una sola boquilla que cuando lo hace con dos boquillas o con boquillas especiales de baja presión.

En definitiva, el programa SIRIAS, disponible para todos los usuarios que lo deseen sin más que contactar con los autores, constituye una herramienta sencilla y útil para conocer el comportamiento de un aspersor para cualquier condición de viento y espaciamiento entre aspersores, lo que resulta muy interesante tanto para los Ingenieros que han de realizar un proyecto de riego por aspersión como para los fabricantes de aspersores e incluso para los propios agricultores.

5.- BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R.G. (1992). "CATCH3D. Sprinkler overlap program". Dept. Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State Univ., Logan, UT, 84322 - 4105.
- ASAE Standard: ASAE.S 330.1. (1993). Procedure for sprinkler distribution testing for research purposes.

- ISO 7749-2. Norme internationale (1990). Matériel d'irrigation - Asperseurs rotatifs - Parte 2. Uniformité de la distribution et méthodes d'essai.
- SEGNER, I., KANTZ, D. y NIR, D. (1991). The distortion by wind of the distribution patterns of single sprinklers. *Agricultural water management*, 19, 341-359.
- SOLOMON, K. (1979). Variability of sprinkler coefficient of uniformity- test results. *Transactions of ASAE*. 1078-1086.
- TARJUELO, J.M. (1989). Programa de solapamiento de riego por aspersión. Curso de informática y agricultura. Univ. Castilla-La Mancha. Albacete.
- TARJUELO, J.M., VALIENTE, M. y LOZOYA, J. (1992). Working conditions of a sprinkler to optimize the application of water. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol 118, Nº. 6, 895,913.
- TARJUELO, J.M., CARRIÓN, P., MONTERO, J. y VALIENTE, M. (1995). SIRIAS: un modelo de simulación de riego por aspersión. XIII Jornadas Técnicas sobre Riegos. Tenerife, 7-9 Junio 1995. pp.309-407.
- UNE. 68-072-86 Norma española (1986). "Aspersores rotativos. Requisitos generales y métodos de ensayo". AENOR, España.
- von BERNUTH, R.D. y SEGNER, I. (1990). Wind considerations in sprinkler system design. *Visions of the future*. ASAE. Third National Irrigation Symposium.

DISTRIBUCIÓN DEL RIEGO POR GOTEO EN GRUPOS DE INVERNADEROS

J. Martínez¹(p); A. Losada²; L. Juana²; J. Reca¹.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para el estudio de sectores de riego por goteo de invernadero, consistentes en varias unidades de riego de forma irregular unidas por un conducto principal al punto de control en cabeza. Se ha desarrollado un programa de ordenador que calcula todas las unidades de riego del sector y determina la función de distribución de caudales de éste como suma de las funciones de distribución de gastos de las diferentes unidades. A partir de ésta función de distribución es posible definir criterios racionales de operación en dichos sistemas de riego.

SUMMARY

In this work, a methodology for studying drip irrigation main units in greenhouses is presented. These main units are composed by several irregular shape subunits linked by a main pipe to the control point in head. A computer program has been developed in order to calculate the subunits and to derive the water flow distribution function of the main unit as a sum of the distribution function of the subunits. Rational operation criteria can be defined from this distribution function.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de riego por goteo se ha implantado en los cultivos bajo invernadero debido a que permite un incremento en la producción con un menor gasto en mano de obra, agua y fertilizantes. Además facilita las diversas labores de cultivo: control de malas hierbas, poda, recolección, etc.

El objetivo de conseguir uniformidad en la distribución del agua de riego obliga a un correcto dimensionamiento de la instalación. Además, se hace precisa una especialización por parte del regante, que debe realizar las operaciones de mantenimiento y limpieza adecuadas para evitar el envejecimiento prematuro de la instalación. También debe elegir las variables de operación del sistema (presión de trabajo y tiempo de riego) acordes con las necesidades del cultivo, para evitar el despilfarro de los recursos o la merma en la producción.

¹ Universidad de Almería.

² Universidad Politécnica de Madrid.

Los sistemas de riego por goteo en explotaciones típicas de invernadero se estructuran en uno o varios sectores de riego. Éstos están formados a su vez por varias unidades de riego, alimentadas desde un punto común en cabeza y unidas mediante la red terciaria de tuberías, que riegan simultáneamente un mismo cultivo. Por este motivo se aconseja el estudio del funcionamiento conjunto de todas las unidades que integran el sector de riego.

2. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Entre las técnicas que se han utilizado para el análisis hidráulico de unidades de riego por goteo destacan las desarrolladas por WU *et al.* (1975) y BRALTS *et al.* (1985). La primera es una técnica aproximada que supone la descarga uniforme a lo largo del ramal de riego y permite el cálculo directo de la presión en cualquier punto del ramal. La segunda utiliza el método de los elementos finitos. Mediante un proceso iterativo de cálculo se resuelve el sistema de ecuaciones de flujo linealizadas. Las principales ventajas de este método son la simplicidad de su aplicación a grandes unidades de riego y la rapidez de convergencia a la solución final.

El estudio de unidades de riego por goteo típicas de invernadero, dado su carácter reducido, aconseja considerar el coeficiente de variación de funcionamiento del gotero y permite un cálculo más minucioso. En este sentido LOSADA *et al.* (1995) proponen para el cálculo de unidades de riego con forma rectangular una metodología precisa que proporciona la distribución de caudales. Con ésta última es posible definir criterios racionales de operación a la hora de aplicar un riego.

La forma irregular de los invernaderos hace que las unidades de riego que los integran no sean siempre rectangulares. MARTÍNEZ *et al.* (1995) generalizan el uso de la metodología anterior a formas irregulares. Estudiaron una unidad de riego tipo compuesta por tres trapecios adyacentes. Modificando los valores de las variables que la definen es posible adaptar, sin demasiado error, dicha figura a contornos completamente irregulares.

Dado que el agricultor riega varias unidades a la vez desde un único punto de control en cabeza del sistema, el presente trabajo tiene por objetivo el estudio del funcionamiento conjunto de dichas unidades. Se aplicará por tanto la metodología anteriormente citada al cálculo de sectores de riego por goteo con unidades de forma irregular (ver figura 1). A tal efecto, se ha elaborado un programa de simulación para ordenador. Éste constituye una herramienta de utilidad tanto para comparar diferentes alternativas de diseño, como para determinar criterios de operación racionales a la hora de aplicar el agua al cultivo.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

En las instalaciones de riego por goteo típicas de invernadero, los dispositivos de control en cabeza de las unidades de riego son muy diversos: a) llave, b) doble llave, c) llave y manómetro, d) regulador de presión, e) ninguno, etc. Generalmente el control de la presión en dicho punto es poco preciso. Los desniveles topográficos y las pérdidas de presión por rozamiento en la red terciaria de tuberías pueden ocasionar diferencias de presión notables entre los puntos de cabeza de las unidades que componen el sector de riego.

La distribución del agua mediante unidades de riego por goteo depende de las presiones en sus orígenes y del tiempo de riego. La metodología utilizada para el cálculo de éstas es la propuesta por MARTÍNEZ *et al.*, 1995. En ella, el caudal Q de un gotero viene dado por:

$$Q = k(1+C_v Z) p^x$$

donde k y x son los parámetros característicos del gotero, C_v es el coeficiente de variación, Z es un número aleatorio perteneciente a la distribución $N(0,1)$ y p la presión del agua en su interior. Esta metodología utiliza para el cálculo de las pérdidas de carga en tubería la ecuación de BLASIUS, característica del régimen hidráulicamente liso. Las pérdidas de carga localizadas en puntos de inserción de goteros y en puntos de inserción de ramales se contabilizan aplicando el concepto de longitud equivalente, cuya determinación ha de hacerse experimentalmente. El procedimiento de cálculo tanto de ramales portagoteros como de tubería portarramales es análogo. Consiste en un proceso iterativo en el que se calculan la presión y el gasto en todos los puntos de salida para una presión establecida en cabeza.

En un sector de riego, la distribución del agua depende únicamente de las características geométricas de sus elementos y de las variables de operación del riego, que, según se indicó anteriormente, son la presión en cabeza y el tiempo de riego. La variabilidad de formas y tamaños dificulta, en gran medida, su estudio. Se ha modelado un sector de riego tipo que dispone de una red terciaria dotada de un único conducto principal del que derivan las diferentes unidades de riego, tal y como se representa, a modo de ejemplo, en el esquema de la figura siguiente:

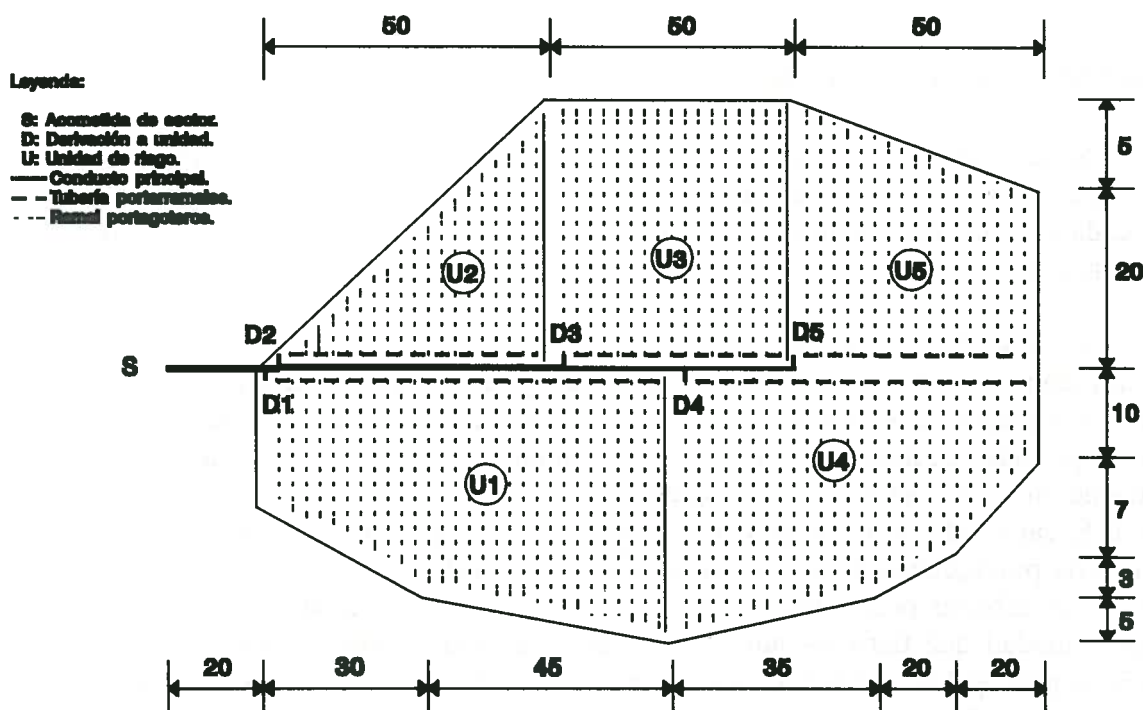


Figura 1: Sector de riego por goteo tipo.

Debido al tamaño reducido de las instalaciones de riego por goteo de los invernaderos, gran parte de los sectores existentes quedan perfectamente definidos con este planteamiento.

El conducto principal de la red terciaria se estudia como si se tratase de una tubería portarramales o como un ramal portagoteros, donde cada unidad es equiparable a un gotero con características propias y donde la distancia entre los orificios de desagüe no es uniforme. Conocidas las presiones en cabeza de todas las unidades de riego es posible encontrar sus funciones de distribución de caudales. La función de distribución del agua aplicada por el sector de riego resultará de integrar la distribución de caudales del conjunto de sus unidades.

Para caracterizar la función de distribución anterior se ha utilizado el coeficiente de uniformidad de CHRISTIANSEN:

$$Cu = 100 \left[1 - \frac{|\Delta \bar{Q}|}{\bar{Q}} \right]$$

donde \bar{Q} es el gasto medio de los goteros y $|\Delta \bar{Q}|$ es el valor medio de las desviaciones de los correspondientes gastos respecto a dicho valor medio.

Para conseguir un resultado óptimo del riego es necesario que el coeficiente anterior presente un valor elevado (próximo a 100). Pero, además, hay que considerar otros dos índices: el rendimiento de aplicación del agua y el coeficiente de déficit. Éstos son una medida de las fracciones de agua útil para el cultivo y del volumen deficitario, respectivamente. Uno y otro dependen del tiempo de riego (LOSADA *et al.*, 1990).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha usado el programa GOTINVER, para riego por GOTEo de INVERNADERO. Éste permite comparar diversas alternativas de diseño y conocer, *a priori*, los resultados esperados con cada una de ellas. Asimismo, facilita razonablemente la selección de las variables de operación al regante.

A modo de ejemplo, se ha estudiado un sector de riego, con cinco unidades, similar al representado en la figura 1. Como se puede apreciar, las unidades presentan diferentes formas y tamaños. Las dimensiones de éstas vienen reflejadas en la figura, donde las cotas están expresadas en metros y corresponden a un terreno prácticamente a nivel. El gotero es el mismo en todo el sector con un caudal nominal $Q_n = 3$ L/h, el exponente de descarga es $x = 0,5$, característico del régimen turbulento y su coeficiente de variación es $C_v = 0,05$. La tubería portagoteros es de 10 mm de diámetro interior y la separación entre goteros de 0,5 m. Las tuberías portarramales tienen todas un diámetro interior de 35,2 mm excepto la primera unidad que tiene 44 mm. Los ramales se unen a éstas equidistanciados 1 m. El conducto principal es una tubería telescópica con cuatro tramos bien diferenciados de 77,8, 55,4, 44, y 35,2 mm de diámetro interior respectivamente. La separación de estos tramos está delimitada por los puntos de derivación a las unidades de riego. La longitud equivalente de la inserción de cada gotero en la tubería portagoteros es de 1,5 m y la de la inserción del ramal en la tubería portarramales es de 0,1 m.

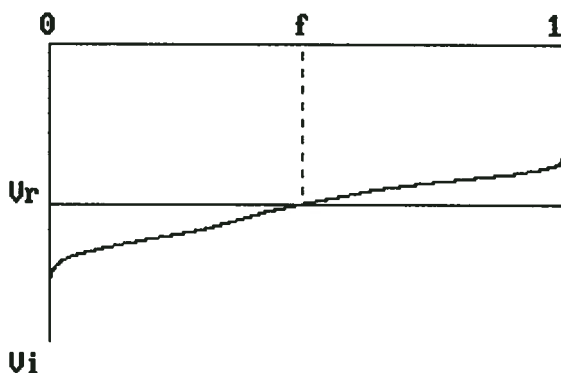
El programa solicita secuencialmente introducir los datos de todas y cada una de las unidades de riego que previamente han sido numeradas en orden creciente desde cabeza a cola siguiendo el conducto principal (ver figura 1). Introducido el valor P_0 de la presión en la acometida del sector, calcula las funciones de distribución de caudales de cada unidad y la función de distribución de caudales global del sector. Todas quedan caracterizadas por sus respectivos coeficientes de uniformidad. Posteriormente solicita introducir las necesidades hídricas del cultivo V_r expresadas en volumen de agua por gotero.

El resultado del riego dependerá directamente de su tiempo de aplicación tar . La distribución irregular del agua será motivo de pérdidas por filtración profunda y, al mismo tiempo de déficit. Estos resultados quedan descritos por el rendimiento de aplicación del agua R_a y el coeficiente de déficit C_d . En el intervalo racional de operación del regante ambos índices tienen resultados antagónicos, en el sentido de que al disminuir el valor de uno disminuye el del otro. El compromiso óptimo entre las dos tendencias determina el tiempo de riego ideal. En la figura 2 se muestra la pantalla resumen de resultados obtenida al ejecutar el programa con los datos indicados y para, $P_0 = 150$ kPa, $V_r = 3$ L/gotero y $tar = 68$ minutos.

Número de goteros: $N = 12127$
OBJETIVO: V_r (L) = 3.0

Variables de operación:
 P_0 (kPa) = 150
 tar (min) = 68

Distribuciones requerida y simulada:



¿Nuevo tiempo de riego, (s/n)? ■

RESULTADOS DEL RIEGO:

Fracción con exceso: $f = 0.49$

Volumen por gotero (L): Índices:
Aportado: $V_b = 3.08$ $C_u = 84.6$
Utilizado: $V_n = 2.80$ $R_a = 0.91$
Déficit: $V_d = 0.20$ $C_d = 0.07$
Perdido: $V_p = 0.27$ $C_p = 0.09$

Alternativas de operación:

tar	R_a	C_d	f
48.8	1.000	0.263	0.011
53.4	0.994	0.198	0.109
58.1	0.975	0.146	0.283
62.7	0.947	0.104	0.383
67.3	0.916	0.070	0.477
71.9	0.883	0.042	0.580
76.5	0.848	0.021	0.687
81.1	0.810	0.008	0.830
85.7	0.771	0.002	0.941

Figura 2: Pantalla resumen de resultados

En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos de presión en origen P_0 , caudales del gotero medio y coeficientes de uniformidad en las unidades y sector de riego:

	P_0 (kPa)	Q (L/h)	C_u
UNIDAD 1	142,3	3,2	94,8
UNIDAD 2	142,3	3,3	95,4
UNIDAD 3	106,8	2,7	94,9
UNIDAD 4	83,1	2,3	94,7
UNIDAD 5	67,6	2,2	95,2
SECTOR	150	2,7	84,6

Tabla 1: Coeficientes de uniformidad de unidades y sector.

Como se puede apreciar se ha producido una disminución considerable del C_u del sector por comparación con el de las unidades de riego, donde a pesar de las diferencias de formas y tamaños se mantiene prácticamente constante. Ésto es debido a las diferencias de presión entre los puntos de derivación de cada unidad de riego, lo que se traduce en distintas aportaciones de agua por gotero y unidad.

El equipo de filtración se va colmatando con el tiempo, lo que puede ocasionar variaciones de presión en el punto de acometida del sector. Además, cuando el suministro del agua se realiza mediante una red de presión a la demanda, las fluctuaciones de la función de demanda pueden también modificar dicha presión. Por consiguiente, interesa conocer el comportamiento del sistema frente a los cambios de presión en origen, P_0 . En la gráfica de la figura 3, se representan el coeficiente de uniformidad en el sector y el coeficiente de uniformidad medio de las unidades para diferentes P_0 . Se observa una ligera tendencia ascendente con valores crecientes de P_0 , en ambos casos, siendo el efecto en el caso del sector más acusado que en el caso de cada unidad.

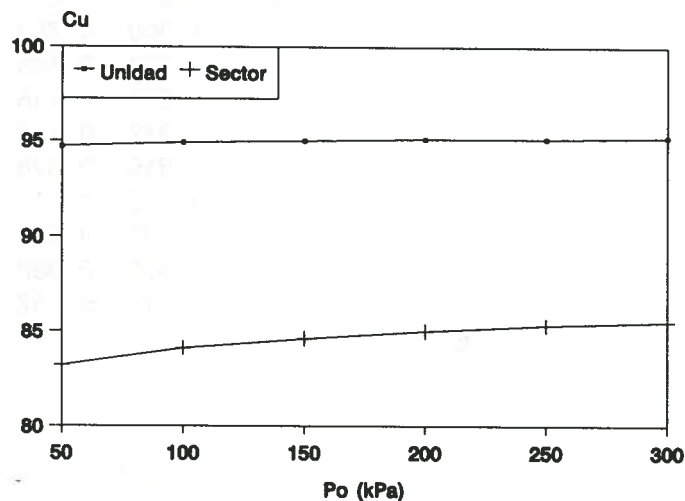


Figura 3: Sensibilidad de los índices a las variaciones de P_0 .

Debido a que, con el transcurso del tiempo, el coeficiente de variación del gotero va cambiando, parece interesante estudiar la sensibilidad del modelo a las variaciones de éste. El resultado se muestra en la gráfica de la figura 4, donde se representa el coeficiente de uniformidad medio de las unidades C_{uu} , el coeficiente de uniformidad del sector C_{us} , R_a y C_d , para varios valores del C_v .

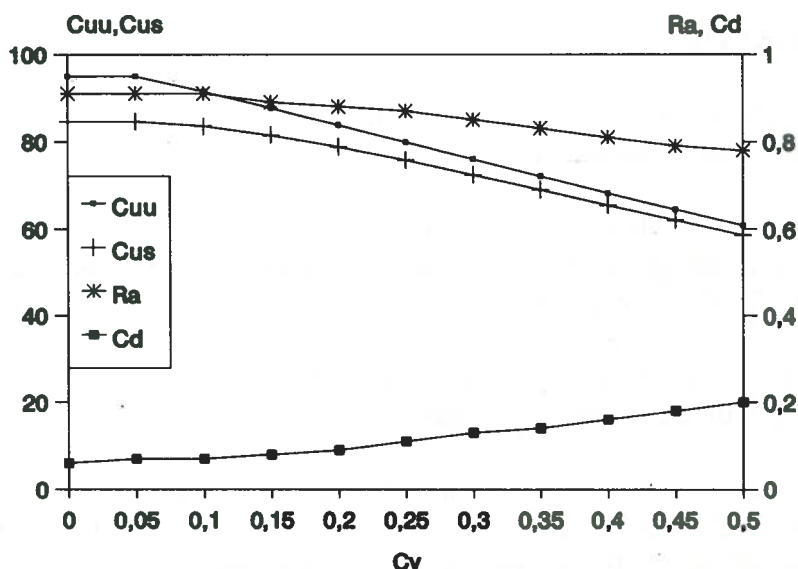


Figura 4: Sensibilidad de los índices a las variaciones de C_v .

Se observa la gran sensibilidad de los índices del riego a los cambios de C_v . Sin embargo, se aprecia que el descenso de C_{us} es menos pronunciado que el descenso del C_{uu} , lo que parece indicar que, cuando se incrementa el tamaño de la instalación, la sensibilidad del C_u a cambios del C_v disminuye.

5. CONCLUSIONES

Las variaciones de presión en los puntos de cabeza de la unidad de riego debidas a pérdidas por rozamiento y desniveles topográficos originan el descenso del C_u del sector con respecto al C_u de las unidades, debido a que el caudal medio por gotero difiere de unas unidades a otras. El descenso del C_u a escala del sector de riego puede llegar a ser inadmisibles, aún manteniendo valores aceptables a escala de unidad. La oportunidad de recurrir a reguladores de presión que subdividan el sector considerado puede merecer un análisis más detenido.

Las variaciones de presión en cabeza de las unidades de riego pequeñas típicas de invernadero no modifican sustancialmente el C_u . Sin embargo, dentro del sector de riego se aprecia un ligero incremento de este índice cuando aumenta la presión en el punto de acometida.

La sensibilidad a variaciones de C_v es elevada tanto en unidades como en sectores de riego. No obstante, los resultados de la figura 4 señalan que la sensibilidad del C_u del sector es algo inferior a la sensibilidad del C_u de la unidad. Esto puede deberse a que, con el incremento de tamaño del sistema, dicha fuente de variación del gasto se enmascara junto a otras fuentes no menos importantes, como pueden ser las variaciones de presión entre puntos del sistema.

6. BIBLIOGRAFÍA

BRALTS, V.F. and L.J. SEGERLIND. 1985. "Finite element analysis of drip irrigation submain units". Transactions ASAE 28, 809-814.

LOSADA, A., L. JUANA y J. MARTÍNEZ. 1995. "Distribución racional del agua con sistemas de riego por goteo en invernadero". Programa Nacional de Interés Comunitario Almería Levante. FIAPA e IFA. 49 pp.

LOSADA, A., L. JUANA y J. ROLDÁN. 1990. "Operation diagrams for irrigation management". Agricultural Water Management. 18: 289-300.

MARTÍNEZ, J., L. JUANA, F. BRETONES y A. LOSADA. 1994. "Modelación de la distribución del agua en unidades de riego por goteo en invernaderos de forma irregular". Actas de las XIII Jornadas técnicas sobre riegos, Santa Cruz de Tenerife, AERYD.

WU, I.P. and H.M. GITLIN. 1975. "Energy gradient line for drip irrigation laterals". Journal Irr. and Drain. Div., ASCE 10 (IR4), 321-326. Proc. Pap. 11750.

AGRADECIMIENTO:

Los autores desean agradecer a la CICYT el apoyo financiero que ha prestado para la realización de este trabajo, en el marco del proyecto AMB95-0909.

PERDIDAS PRODUCIDAS POR LA CONEXIÓN DE LATERALES EN TERCIARIAS

A. Royuela Tomás (P)¹, J. Arviza Valverde¹, T. Montalvo López¹

RESUMEN

La conexión de los laterales en una terciaria de riego localizado produce unas pérdidas singulares que deben tenerse en cuenta para la elección de los diámetros de la subunidad.

No se conocen trabajos específicos acerca de las variables que deben tenerse en cuenta para la estimación de estas pérdidas. Aquí se presenta un estudio experimental para estimarlas en función del número de Reynolds en la terciaria, Re , de la relación entre los caudales del lateral y terciaria, q y Q respectivamente, y de la relación entre el área obstruida por la conexión, s , y la sección de la tubería en que se inserta, S .

Se han ensayado dos tipos de conexión en tubería de 25 mm, una de estas conexiones se instaló en dos posiciones distintas, para tener otros tantos valores de s/S .

Se han alcanzado números de Reynolds de hasta 60000, relaciones de caudal entre 0 y 1 y relaciones de geometría entre 0.1774 y 0.4589.

Se proponen expresiones para el cálculo de las pérdidas introducidas por cada tipo de conexión y una expresión general para cualquier valor de s/S y de Re .

SUMMARY

The head losses caused by lateral connections to manifolds, should be considered when selecting subunit pipelines diameters of trickle irrigation system.

This work is an experimental study aimed to estimate head losses as a function of Reynolds number in the manifold, Re , ratio of lateral to manifold flow, q/Q , and ratio of cross section area occupied by lateral connection to manifold cross section area, s/S .

Two type of connection in 25 mm pipeline have been tested, one of which was fitted in two different positions, in order to obtain two respective s/S values.

Values for Re up to 60000, flow ratios between 0 and 1, and s/S values between 0.1774 and 0.4589, have been recorded.

Equations to estimate head losses due to each kind of connections, as well as an equation valid for any s/S and Re values, are proposed.

1.- INTRODUCCION. OBJETIVOS

Usualmente se estiman las pérdidas introducidas en una terciaria por la conexión de los laterales, utilizando un coeficiente mayorante función del espaciamento medio de laterales. Para espaciamientos del orden de 5 - 6 m se viene utilizando un coeficiente de 1.20 y mayores valores para menores espaciamientos. El valor adoptado, cuando se hace, depende de la experiencia del proyectista.

¹ Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universidad Politécnica de Valencia

Parece lógico que las pérdidas producidas por la conexión, h_s , dependan de la velocidad media en la tubería, V , del caudal derivado al lateral, q , del área de obstrucción de la conexión, s , de la sección de la terciaria, S , y de las propiedades del fluido.

Es decir, debe existir una ley tal como

$$\zeta(h_s, V, q, s, S, \mu, \rho) = 0$$

que ligue a todas las variables.

La aplicación del teorema de Π , con V , S , y ρ como variables comunes a todos los monomios, conduce a

$$h_s = D \cdot \varphi(Re, \frac{q}{Q}, \frac{s}{S}) \quad (1)$$

y para un tipo de conexión y tubería dados (s y S , constantes)

$$h_s = \varphi(Re, \frac{q}{Q}) \quad (2)$$

2.- MATERIAL Y METODOS

El equipo utilizado para el ensayo de estas pérdidas se esquematiza en la figura 1

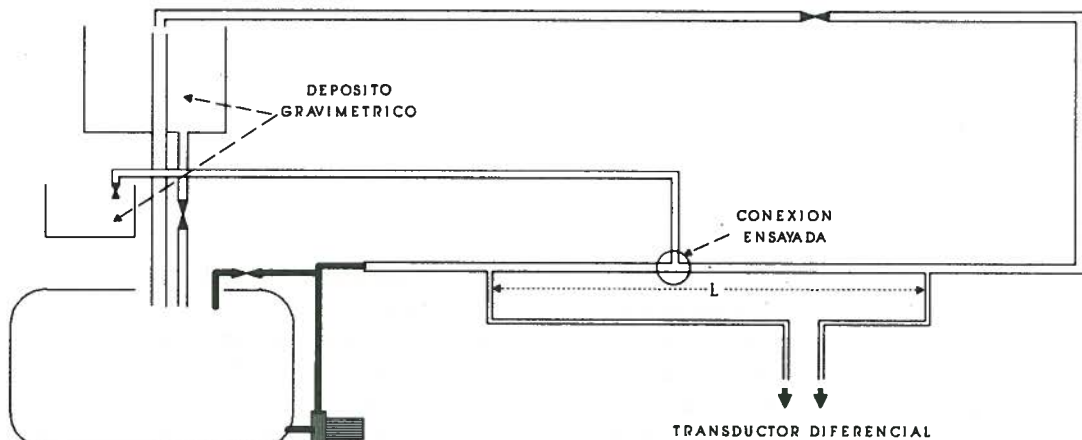


Figura 1.- Esquema de la instalación utilizada

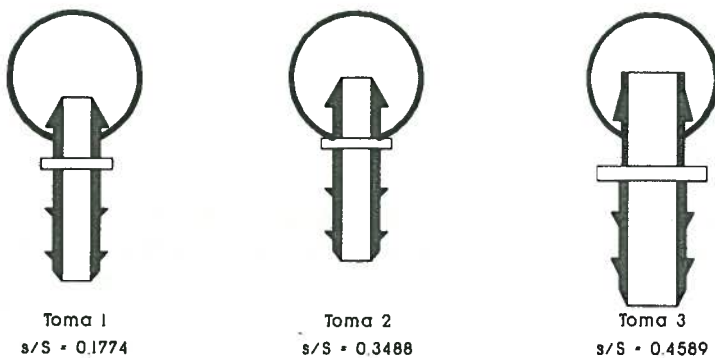


Figura 2.- Conexiones ensayadas

Se han analizado tres tomas en tubería de 25 mm., con geometrías de conexión de 0.1774, 0.3488 y 0.4589, representadas en la figura 2

En primer lugar se ensayó una longitud L de tubería sin conexión acoplada, para obtener la relación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds.

Posteriormente, con la conexión insertada, se determinaron las pérdidas totales en la misma longitud y los caudales aguas abajo

de la conexión y el derivado

Las pérdidas producidas por la toma se han determinado restando a las totales, las teóricamente producidas por rozamiento en los tramos aguas arriba y abajo de la conexión.

La diferencia de cotas piezométricas se obtuvo con un transductor diferencial con salida a indicador digital y precisión de ± 1 mm. Los caudales arrojados por la tubería terciaria y lateral, se midieron gravimétricamente utilizando un celula de carga a flexión, con precisión de ± 100 gr para los primeros y con balanza de precisión ± 1 gr para los segundos; los tiempos con ± 0.01 s. y la temperatura mediante termómetro digital con sonda de inmersión de ± 0.1 °C.

3.- RESULTADOS Y DISCUSION

Los ajustes obtenidos para cada conexión, con h_s en mm, son lo siguientes:

3.1.- Relación de geometría s/S = 0.1774

$$h_s = 6.548 \cdot 10^{-8} Re^{1.8328} \left(\frac{q}{Q}\right)^{0.1755}, \quad (r^2 = 0.9509) \quad (3)$$

	Estadístico t	Probabilidad
Coefficiente	- 25.09	$7.62 \cdot 10^{-34}$
Re	26.94	$1.43 \cdot 10^{-35}$
q/Q	3.61	0.0006

3.2.- Relación de geometría s/S = 0.3488

$$h_s = 1.5404 \cdot 10^{-6} Re^{1.8565} \left(\frac{q}{Q}\right)^{-0.0739}, \quad (r^2 = 0.9825) \quad (4)$$

	Estadístico t	Probabilidad
Coefficiente	-45.15	$1.10 \cdot 10^{-60}$
Re	54.06	$4.78 \cdot 10^{-67}$
q/Q	-3.61	0.0005

3.3.- Relación de geometría s/S = 0.4589

$$h_s = 2.7048 \cdot 10^{-7} Re^{1.8977} \left(\frac{q}{Q}\right)^{-0.1412}, \quad (r^2 = 0.9972) \quad (5)$$

	Estadístico t	Probabilidad
Coefficiente	- 66.97	$3.78 \cdot 10^{-55}$
Re	90.71	$1.84 \cdot 10^{-62}$
q/Q	12.66	$4.49 \cdot 10^{-18}$

Resultando significativo, en todas ellas, el efecto de la derivación de caudal sobre las pérdidas producidas en la conexión.

Analizando el conjunto de datos, tras introducir la relación de geometría como variable independiente, se obtiene

$$h_s = 1.9002 \cdot 10^{-5} Re^{1.7088} \left(\frac{q}{Q}\right)^{-0.0125} \left(\frac{s}{S}\right)^{2.7171}; \quad (r^2 = 0.9814) \quad (6)$$

	Estadístico t	Probabilidad
Coefficiente	- 35.55	$1.43 \cdot 10^{-83}$
Re	51.82	$1.63 \cdot 10^{-110}$
q/Q	- 0.56	0.58
s/S	81.54	$1.20 \cdot 10^{-144}$

pero en ella el efecto de la derivación de caudal no es significativo.

Realizando el análisis sin incluir los valores de q/Q, se obtiene:

$$h_s = 1.7363 \cdot 10^{-5} Re^{1.7183} \left(\frac{s}{S}\right)^{2.7227}; \quad (r^2 = 0.9814) \quad (7)$$

	Estadístico t	Probabilidad
Coefficiente	- 42.52	$1.82 \cdot 10^{-96}$
Re	67.81	$4.09 \cdot 10^{-131}$
s/S	85.81	$3.78 \cdot 10^{-149}$

Los estadísticos y la probabilidad de las relaciones (3), (4) y (5) demuestran que el caudal derivado influye tanto mas cuanto mayor es la sección obstruida por la conexión, aunque las pérdidas de carga dependen fundamentalmente del número de Reynolds.

4.- CONCLUSIONES

Las tres geometrías ensayadas en tubería de 25 mm. producen pérdidas localizadas que deben considerarse en el diseño.

Las ecuaciones (3), (4) y (5) estiman las pérdidas introducidas por una toma con geometrías de conexión de 0.1774, 0.3488 y 0.4589, respectivamente, en tubería de 25 mm.

Para cualquier otra geometría, comprendida entre las ensayadas, pueden estimarse estas pérdidas con la expresión (7), representada en la figura 3.

La influencia de la geometría de la toma, a partir de los resultados de estos ensayos, queda patente con los siguientes datos :

Las pérdidas totales debidas a la conexión de 6 laterales de 240 l/h en una terciaria de 25 mm y geometrías de 0.1774, 0.3488 y 0.4589, son de 0.03 m, 0.19 m y 0.40 m, respectivamente. Las pérdidas continuas en la terciaria, si los laterales estan espaciados 5 m, calculadas a partir de Blasius, son 1.11 m. Los coeficientes mayorantes a aplicar, serían, por tanto de

$$\frac{1.11 + 0.01}{1.11} = 1.01; \quad \frac{1.11 + 0.09}{1.11} = 1.08; \quad \frac{1.11 + 0.19}{1.11} = 1.17$$

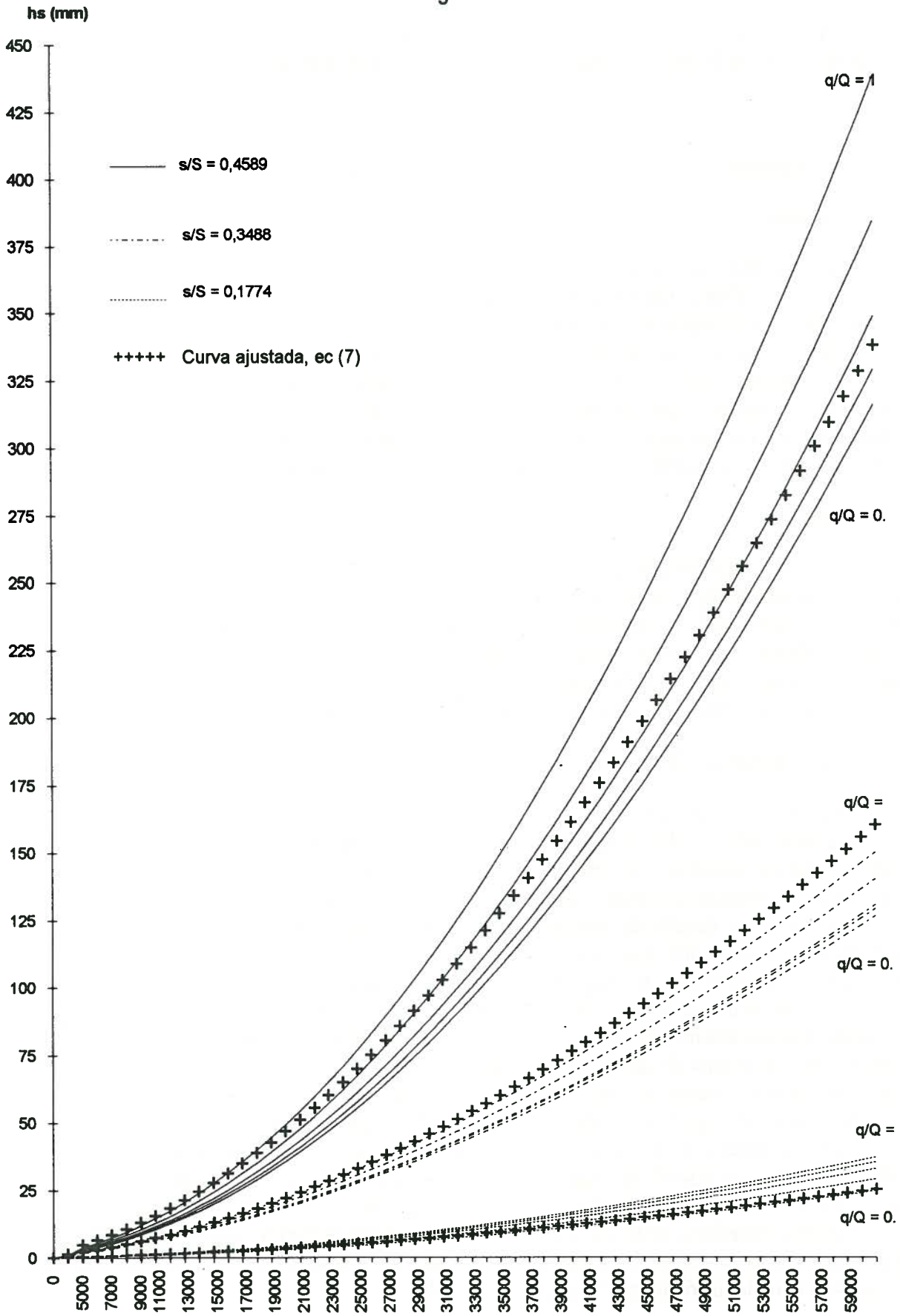


Figura 3.- Pérdida de una conexión, con geometrías de 0.1774, 0.3488 y 0.4589, para valores de q/Q de 0.1, 0.25, 0.50, 0.75 y 1

APLICACIÓN DE GESTAR, UN PAQUETE AVANZADO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA PARA EL PROYECTO Y GESTIÓN DE REGADÍOS A PRESIÓN.

por

Aliod Sebastián, R (P); Eizaguerri Bradineras, A.; Estrada Collado, C. y Ollés Grúas, J.*

Resumen:

Se describen las características generales de la versión preliminar 0.2 de *GESTAR*, paquete de simulación hidráulica avanzada específicamente concebido para el proyecto y gestión de redes de riego presurizadas en régimen estacionario, aplicable tanto en los niveles de red de distribución como en los niveles de parcela o en jardinería. Constituye una poderosa e innovadora herramienta de análisis cuyo empleo resulta sumamente cómodo y productivo gracias a un entorno gráfico de comunicación con el usuario. Se ilustran algunas de las capacidades del mismo mediante su aplicación a la verificación de las reformas habidas en el proyecto de la red de distribución de Bardenas II- S. XIII (Zaragoza).

Summary:

General characteristics of *GESTAR* 0.2, a preliminary version of an advanced software package specially looking on hydraulic engineering and management of any irrigation pressurized network, are presented. It constitutes a powerful and innovative tool for designers and system managers. Thanks to a friendly Graphical User Interface its resources can be exploited in a quite easy and efficient environment. In order to stand out some of its capabilities it has been applied to verify the reforms accomplished in the Bardenas II-S.XIII network.

1. INTRODUCCIÓN

Aunque no todos los futuros regadíos, ni la rehabilitación de los existentes, requieren necesariamente redes de distribución a presión, una parte significativa de ellos y muchos de los recientemente implantados o en fase de construcción trabajan ventajosamente con conducciones en media o baja presión conectadas según una topología ramificada.

La topología ramificada habitualmente comporta un menor coste de las inversiones en conducciones, aseveración que deja de ser cierta cuando existen restricciones en cuanto a la seguridad del suministro, en la orografía o en la disponibilidad de diámetros normalizados.

Una red se denomina *estrictamente ramificada*¹ si posee una topología ramificada en la que existe exclusivamente un único punto de altura piezométrica impuesta, que habitualmente corresponderá al punto de alimentación, mientras el resto de nodos de la red se asimilan a puntos de consumo conocido, esto es, nodos de bifurcación, con consumo nulo, o hidrantes regulados con caudal igual a la dotación. Es bien sabido que las redes en que la topología y las condiciones de contorno se implementan configurando una red *estrictamente ramificada*, es posible determinar "a priori" los caudales de línea, desacoplados de las ecuaciones hidráulicas, lo que posibilita, por un lado, establecer las metodologías de dimensionado óptimo económico de los diámetros y materiales de la red, y por otro lado, calcular posteriormente y de forma explícita las presiones en cada punto del sistema, una vez que los diámetros han sido fijados, para cada configuración de demanda instantánea que se formule.

* Escuela Universitaria Politécnica de Huesca. Ingeniería Técnica Agrícola en Explotaciones Agropecuarias. Carretera Zaragoza Km 65, 22071 Huesca.

No obstante, el alcance de esta metodología de análisis hidráulico, únicamente aplicable a las redes estrictamente ramificadas, es muy limitado, siendo cada vez mas necesario disponer de métodos generales y flexibles que permitan dar solución en situaciones tales como:

- Inclusión de dispositivos de regulación automática y control de presiones y caudales.
- Presencia de mallas en la red debidas a suministros redundantes en cabecera o interconexión de conducciones para remediar insuficiencia de presiones en puntos desfavorables.
- Existencia de más de un punto de altura piezométrica conocida en virtud de alimentaciones múltiples, presencia de depósitos reguladores y puntos de emisión con caudal dependiente de la presión local (por ejemplo: vertidos a lámina libre, hidrantes no regulados, emisores de riego, fugas y roturas).

Finalmente, la resolución de problemas de índole práctica tales como la simulación y localización de fugas, la detección y diagnóstico de disfunciones en la red, la predicción de caudales efectivamente suministrados en hidrantes carentes de reguladores de presión activos, la determinación de las curvas de consigna en estaciones de bombeo directo,... y otros muchos más, que hasta el momento no han sido abordados de manera sistemática ni satisfactoria, requiere la introducción de aproximaciones hidráulicas más completas como son los métodos generales de simulación y análisis de redes.

Entre las diversas metodologías de análisis disponibles para la simulación de redes en régimen estacionario², el *Análisis Nodal* presenta múltiples ventajas, por ser un procedimiento general, flexible y compacto, y un inconveniente, que se encuentra asociado a la presencia en la red de elementos de baja resistencia hidráulica (pequeña longitud o caudal nulo), hoy en día superado mediante diversas estrategias computacionales sumamente eficientes^{3,4}.

Se resumen a continuación las características generales de *GESTAR* un paquete de simulación hidráulica específicamente concebido para el proyecto, regulación y gestión de sistemas de riegos a presión, que aún estando bajo desarrollo, incorpora todo un conjunto de recursos avanzados e innovaciones que hacen del mismo una herramienta sumamente práctica y versátil, a la par que cómoda de usar. Las versiones preliminares de este paquete han sido aplicadas durante los últimos meses del año 1995 al análisis y comprobación de las reformas del proyecto inicial del Sector XIII de la Zona Regable de Bardenas II (Zaragoza) y han permitido proponer mejoras en el funcionamiento de la red y ahorro de costes en las conducciones. Actualmente se están aplicando diversos estudios y verificaciones de nuevas zonas regables.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES IMPLEMENTADAS EN GEAR 0.2

2.1 Entorno Gráfico.

Desarrollado sobre *VISUAL BASIC* se encuentra operativo, con diferentes restricciones, en entornos *WINDOWS* (3.1, 95, NT), permitiendo la creación de redes, especificación de condiciones de contorno y visualización de resultados de forma gráfica e interactiva.

La carga de redes, modificación de parámetros, manejo de opciones, presentación y análisis de resultados en *GESTAR* se realiza a través de iconos, barras de herramientas, ventanas de diálogo y menús desplegables, siendo fácil e intuitiva la explotación de todos sus recursos. Su manejo autoexplicativo no requiere de un estudio preliminar complejo, permitiendo a todo tipo de usuarios, desde proyectistas a regantes, familiarizarse rápidamente con él. No obstante, se prevé comenzar durante el próximo año la integración de los módulos de simulación hidráulica

de las redes colectivas en un sistema *CAD* estándar, con objeto de potenciar su capacidad para generar soluciones tecnológicas integradas en oficinas técnicas.

Se dispone actualmente de un abanico de utilidades y opciones para el manejo de objetos gráficos y visualización de datos suficiente como para realizar las operaciones más frecuentes. *GESTAR* comparte la filosofía y tendencias del software actual buscando una comunicación orientada a facilitar al usuario el manejo de la aplicación, incluyendo verificación exhaustiva de los datos de entrada, chequeo automático de la compatibilidad de las condiciones de contorno, utilidades auxiliares, ayudas y valores por defecto, ...

GESTAR contempla el refresco en tiempo real e interactivo de los datos y de los resultados visualizados gráficamente al alterar cualquier condición de contorno o componente. Está prevista la comunicación del programa con bases de datos de elementos normalizados o comerciales (conducciones y equipos de riego) que incorporen automáticamente sus parámetros característicos, dimensionales, hidráulicos y económicos.

2.2 Módulo de cálculo.

Por debajo del entorno gráfico de comunicación con el usuario, reside el programa de cálculo hidráulico *NETCAL*, programado en lenguaje *FORTRAN 90*. Es en este núcleo, integrado dentro del *GUI* de tal manera que pasa desapercibido al usuario, donde reside la potencia, flexibilidad y robustez de la aplicación. El núcleo de cálculo de *GESTAR* utiliza los métodos derivados del *Análisis Nodal* de redes, técnicas en las que el grupo viene desde hace cinco años y en las que se han introducido diversas mejoras. De acuerdo a esta metodología, la red se descompone en nodos y elementos. Cada nodo j posee dos variables escalares independientes, o grados de libertad, que son su altura piezométrica H_j y el consumo nodal C_j . Un elemento k de nodo inicial i y final j será todo dispositivo físico o conducción que una los nodos (i,j) y poseerá otras dos variables características: el caudal circulante Q_k y la pérdida de carga o salto energético entre los nodos, ΔH_k , vinculadas a través de una ecuación de comportamiento generalizada que habitualmente tendrá un carácter no lineal, expresada como:

$$\Delta H = f(Q) Q^2 \quad (1)$$

Estas relaciones pueden adoptar una estructura pseudolineal mediante la definición de los coeficientes de resistencia KR y de conducción KC del elemento correspondiente:

$$\Delta H = f(Q) Q^2 = KR Q \Rightarrow Q = KC \Delta H ; KC = KR^{-1} = \{f(Q) Q\}^{-1} = \{f(Q) \Delta H\}^{-1/2} \quad (2)$$

En la medida que el salto energético en el elemento, ΔH_k , se expresa como diferencia de alturas nodales, $H_i - H_j$, las variables ΔH_k desaparecerán como variables o grados de libertad del sistema. La aplicación de las ecuaciones de continuidad a los NN nodos del sistema, introduce NN ecuaciones independientes, que junto con las NL ecuaciones de comportamiento de tipo (1) de cada uno de los NL elementos suministra un sistema de $NN + NL$ ecuaciones insuficiente para determinar los $2NN + NL$ grados de libertad del sistema (un consumo C_i y una altura piezométrica H_i en cada nodo y un caudal circulante Q_k en cada elemento), siendo necesario fijar NN de estos grados de libertad mediante especificaciones que serán interpretadas como condiciones de contorno impuestas, entre las que debe figurar obligatoriamente una altura piezométrica, al menos.

La incorporación de las ecuaciones de comportamiento pseudolineales (2) en las ecuaciones de continuidad nodales, y la introducción de las NN condiciones de contorno

conocidas permite expresar el sistema de NN ecuaciones completo como un sistema pseudolineal que admite formulación matricial del tipo

$$\mathbf{K}(\mathbf{H}) \cdot \mathbf{H} = \mathbf{C}(\mathbf{H}) \quad (3)$$

donde \mathbf{H} es el vector de incógnitas, no necesariamente alturas nodales, $\mathbf{C}(\mathbf{H})$ es un vector de términos independientes, no necesariamente consumos nodales, y $\mathbf{K}(\mathbf{H})$ la matriz de coeficientes k_{ij} del sistema, construida según los coeficientes de conductividad KC (2) de los elementos y las modificaciones debidas a la implementación de las condiciones de contorno.

La presencia en la red de elementos de baja resistencia y/o de bajo caudal, KC elevado, incluso con caudal estrictamente nulo, KC infinito, en el mejor de los casos, empeora la convergencia del *Análisis Nodal* clásico, cuando no arruina por completo la estabilidad del proceso de cálculo provocando su fallo, como así ha venido sucediendo en diversos paquetes comerciales. Resulta imprescindible en la simulación de redes colectivas, dominadas por estructuras ramificadas, contemplar estas eventualidades puesto que las condiciones de caudal circulante nulo en algunas líneas se presentará frecuentemente, en cuanto se dé la coincidencia de tener en una ramal todos los hidrantes cerrados a partir de uno dado.

El programa resuelve estos casos rutinariamente, incorporando criterios de identificación y tratamiento de elementos de baja resistencia, incluso completamente descargados. Para ello se han implementado rutinas que desensamblan los componentes conflictivos del sistema general y operan de forma independiente su ecuación de comportamiento^{2,3} añadiéndola desacoplada al sistema (3), que gana una ecuación por cada elemento desensamblado.

El umbral de conductividad del elemento KC a partir del cual este se desensambla puede modificarse a voluntad, hasta llegar al caso límite de desensamblado de todos los elementos, obteniéndose del método *Todini -Pilati*³ que resuelve simultáneamente las ecuaciones nodales y las de comportamiento de todos los elementos.

La resolución del sistema final no lineal así obtenido se realiza mediante el tradicional procedimiento iterativo de *Newton-Raphson*, que ha sido sistematizado y refinado específicamente para todo tipo de elementos con ecuaciones de comportamiento no-lineales del tipo (1) mejorando apreciablemente² la tasa de convergencia, siendo precisas habitualmente entre cinco y ocho iteraciones para alcanzar soluciones precisas. La convergencia a la solución correcta se garantiza mediante la satisfacción de dos criterios redundantes que limitan el máximo error de caudales en los nodos y la máxima diferencia de caudales en las líneas, o alturas piezométricas en los nodos, entre dos iteraciones consecutivas. El proceso iterativo se inicializa automáticamente mediante diversas opciones, siendo la más sencilla, e igualmente eficiente, el suponer velocidades iniciales constantes en todos los elementos pasivos y caudales en las impulsiones dadas por el caudal medio.

Gracias al almacenamiento compactado de sólo los elementos no nulos de las matrices dispersas que aparecen en el proceso numérico así como al tratamiento optimizado de la inversión de la matriz tangente asociada al sistema, mediante técnicas especializadas de factorización LU para matrices generales dispersas, se consigue la minimización de las necesidades de memoria y la aceleración del cálculo obteniéndose refrescos casi instantáneos de los resultados en redes con centenares de componentes.

2.3 Tipos de elementos admitidos.

En GESTAR el cálculo de las pérdidas de carga en las conducciones en régimen turbulento puede ser evaluado mediante un amplio abanico de opciones: desde la formulación *Darcy-Weisbach* con coeficiente de fricción dado por la expresión de *Colebrook* hasta las

relaciones monómicas comúnmente aceptadas (*Hazen-Williams, Blasius, Manning, etc.*) pasando por otras definidas por el propio usuario. *GESTAR* discriminará automáticamente la existencia de condiciones de flujo laminar (N° de *Reynolds* < 3000) aplicándose entonces la formulación correspondiente en los conductos que se encuentren bajo dicho régimen. Opcionalmente se puede incluir el cómputo automático de las pérdidas de carga singulares en las bifurcaciones o intersecciones de conductos.

Dentro de cada elemento pasivo pueden asimismo añadirse elementos de control: válvulas cerradas y válvulas antirretorno y "fittings" de todo tipo, cuyas pérdidas singulares se calculan automáticamente mediante librerías indefinidamente ampliables una vez especificadas sus características dimensionales (y grado de cierre en el caso de las válvulas de cierre variable). El cómputo de todo tipo de pérdidas singulares que no estén disponibles en las librerías anteriores puede, en cualquier caso, ser contemplado dentro de un elemento pasivo especificando dentro de la caja de diálogo correspondiente la expresión del tipo $\Delta H = K_s Q^n$ acorde con el dispositivo que simule, donde el usuario introducirá directamente los valores de K_s y n , o procederá a ajustarlos en función de parejas de valores $\Delta H, Q$ empíricos o facilitados por el fabricante. Por otra parte, los elementos de impulsión se configuran independientemente, caracterizados mediante sus curvas características, como mínimo la de altura-caudal, implementadas mediante ajustes polinómicos.

GESTAR permite introducir en las redes un número arbitrario de válvulas reductoras de presión, sostenedoras de presión y válvulas limitadoras de caudal, discriminándose automáticamente los estados límite de apertura total cuando no se presentan las condiciones para comenzar su función reguladora.

Elementos sin características hidráulicas conocidas "a priori" pueden ser definidos entre todo tipo de nodos, suministrando *GESTAR* las dimensiones del conducto, el coeficiente de pérdidas en las válvulas de regulación, o el elemento impulsor necesario para alcanzar los valores de caudal y presión dados simultáneamente en ciertos nodos, especificados mediante los nodos de doble condición, según se describe en 2.5.

2.4 Tipos de nodos admitidos.

GESTAR admite una gran variedad de tipos de nodos. En primer lugar hallamos los habituales: *Altura Piezométrica Conocida*, correspondiente a puntos de alimentación desde balsas, depósitos, canales e hidrantes donde se conozca la cota y la presión; y los de *Consumo Conocido* asociados a hidrantes o puntos de demanda regulada. Como caso particular de estos últimos aparecen los *Nodos de Unión*, que corresponden a nodos de consumo conocido nulo.

Se dispone además en la barra de herramientas la posibilidad de configurar *Nodos Emisores*, definidos como nodos de altura piezométrica conocida igual a la cota del emisor, puesto que la presión de los puntos de emisión será atmosférica, conectados a otros nodos de la red, no emisores, mediante un conducto. Todo tipo de vertidos al exterior dependientes de la presión: placas orificio, aspersores, elementos de proyección, hidrantes y válvulas no reguladas abiertas, fugas, etc.. pueden ser correctamente implementados gracias a este tipo de nodo. La respuesta del caudal emitido respecto a la presión local de alimentación se simula mediante una ecuación de comportamiento del tipo $\Delta H = K_s Q^n$, que se ajusta en función de la característica de respuesta presión-caudal. A diferencia de otros tratamientos⁵, en el sistema (3) se incluyen las ecuaciones de comportamiento de los emisores y de los nodos en contacto con la atmósfera, lo que permite resolver acopladamente todo el conjunto de dispositivos y lograr la convergencia en un número muy reducido de iteraciones, siendo el aumento de tiempo de cálculo requerido por iteración y el consumo de memoria adicional irrelevante incluso en situaciones con gran número de emisores como las asociadas a riegos por aspersión con cobertura total.

Finalmente se pueden configurar nodos con *Doble Condición* (altura piezométrica y caudal conocido) y *Nodos Sin Condición*, donde no se especifica ligaduras de presión ni de caudal, cuyo empleo, en combinación con los *Elementos Sin Condición*, se ilustra en el siguiente párrafo.

2.5 Herramientas para el cálculo inverso.

El número de condiciones de contorno que pueden imponerse y el número de incógnitas hidráulicas, relativas a nodos y elementos, que pueden resolverse es igual al número de nodos de la red. En los problemas comunes de análisis de redes se establece una condición en cada nodo: en los nodos de demanda (o suministro) con caudal conocido se especifica una condición de caudal, mientras que en los nodos conectados a depósitos o descargando libremente se especifica la altura piezométrica. El cálculo devolverá el valor de la otra variable nodal, altura o caudal, respectivamente.

GESTAR sin embargo permite además una elección general y flexible del juego de datos e incógnitas, lo que resulta sumamente útil con propósitos de regulación, optimización y búsqueda de parámetros mediante diseño inverso de redes. Esto se materializa gracias a la posibilidad de definir nodos con *Doble Condición*, esto es, con caudal y altura piezométrica especificada "a priori".

Por cada nodo con condición duplicada, puesto que el número de condiciones a especificar en el sistema (3) es siempre igual al número de nodos, deberá liberarse de condición algún nodo o elemento, denominados *Nodos Sin Condición* y *Elementos Sin Condición*. Cuando se libera de condición un nodo *GESTAR* devuelve en el mismo, como resultado del cálculo, la altura piezométrica y caudal nodal, con lo que se determinará la cota de la lámina libre, o el punto de funcionamiento de la impulsión, necesarios para suministrar el servicio especificado en los nodos de *Doble Condición*. Cuando se libera de condición algún elemento, *GESTAR* permite determinar el caudal circulante y el salto de energía en dicho elemento necesario para suministrar el servicio especificado en los nodos de doble condición. En función de estos resultados se discrimina si dicho elemento se comporta como elemento pasivo o activo, suministrando en el primer caso su coeficiente de resistencia hidráulica $K_s = \Delta H / Q^2$ (siendo Q el caudal del elemento y ΔH la pérdida de altura en el mismo) o bien uno de estos tres parámetros: diámetro, longitud o rugosidad, si son especificados los otros dos. Si el elemento requerido resultase de tipo activo *GESTAR* suministra el punto de funcionamiento, altura de impulsión y caudal, del grupo de bombeo que es necesario intercalar entre los nodos del elemento inicialmente libre de condición. Gracias a la posibilidad de intercambiar el juego de datos e incógnitas, mediante la definición de *Nodos de Doble Condición*, y *Nodos y Elementos Sin Condición* *GESTAR* permite dar acceso a lo que se conoce como problemas de diseño inverso. La explotación imaginativa de la capacidad de que se dispone para intercambiar flexiblemente datos e incógnitas, permite encontrar respuestas inmediatas a muchos problemas de diseño, regulación y optimización que de otra manera requerirían un tedioso, o impracticable, proceso de prueba y error, y en el que no se insiste en esta comunicación por razones de espacio. En este frente permanece abierta una línea activa de investigación con objeto de poder predecir las condiciones de compatibilidad y establecer métodos robustos para encontrar las soluciones inversas físicamente correctas.

2.6 Otras herramientas.

Se dispone de toda una serie de recursos operativos, de utilidad tanto para la configuración de estados de la red, como para el análisis de resultados, sumamente eficaces de cara al dimensionado y gestión de redes colectivas. Entre ellos cabe destacar los procesos de

asignación determinista o aleatoria del estado de apertura/cierre de los hidrantes individuales de la red, según el grado de simultaneidad prefijado, que abarca el rango completo de estados posibles: desde situaciones con todos los hidrantes cerrados, y en consecuencia caudales nulos en todas las líneas (0% de simultaneidad) hasta condiciones de apertura de todos los hidrantes (100% de simultaneidad). Puede especificarse asimismo diversos niveles de alarma que verifican el ajuste de los parámetros hidráulicos calculados para un estado de la red con los prefijados dentro de ciertos intervalos, mostrando aviso en caso de no verificarse la restricciones impuestas. Se prevé implementar un conjunto extenso de nuevas utilidades operativas y opciones avanzadas de simulación surgidas del constante contacto del grupo de investigador con los oficinas de proyectos de la *Dirección General de Estructuras Agrarias del Gobierno de Aragón*, bajo cuyo patrocinio se desarrolla el programa, y que están aplicando y sometiendo a continuas y estrictas pruebas a *GESTAR* en el diseño y reforma de numerosos sectores de riego bajo su responsabilidad.

3. APLICACIÓN DE GESTAR A LA REFORMA DEL PROYECTO DE UN SISTEMA DE REGADÍO

Como ejemplo ilustrativo de la capacidad de análisis de *GESTAR* se presenta un caso que corresponde al Sector XIII de la Gran Zona Regable de Bardenas II, en la provincia de Zaragoza, que con 195 hidrantes abarca una extensión aproximadas de 3.000 ha., alimentada por presión natural desde la acequia de Sora, regulada por el embalse de Yesa (*Figura 1*).

Las diversas y complejas vicisitudes que atraviesa un proyecto de transformación en regadío desde la redacción del Plan Coordinado hasta la entrega de las instalaciones a los regantes, implican abundantes y constantes modificaciones sobre el proyecto inicial, muchas de ellas durante la propia ejecución, cuyo efecto conviene estudiar en previsión de disfunciones del sistema. Este es el caso del ejemplo referido, cuya ejecución es compartida por dos instituciones: el *Gobierno de Aragón* y la *Confederación Hidrográfica del Ebro*. El primero ha completado recientemente la construcción de los ramales de distribución, mientras que a la segunda, según el acuerdo del Plan Coordinado, le corresponde la construcción de las arterias principales, cuyas obras comenzarán próximamente. Tanto los trazados de los ramales secundarios, como la localización y dotación de los hidrantes respectivos han sufrido importantes modificaciones respecto al proyecto inicial, por lo que cabía la duda acerca de la adecuación de los dimensionados inicialmente previstos para las arterias respecto a la distribución final de hidrantes.

Esta red presenta además algunas peculiaridades cuyo estudio sólo pudo realizarse gracias a la flexibilidad y potencia de las herramientas e instrumentos de análisis implementados en *GESTAR*. Estas peculiaridades (*Figura 1*), nada excepcionales por otra parte, consisten en: 1) la presencia de dos puntos de emisión libre (dependientes de la presión, en los nodos 1150 y 1138 que son extremos de las arterias B1 y A6-4), a través de placas de orificio que vierten a sendas conducciones en lámina libre para riego de otros sectores; 2) la inclusión posterior de dos válvulas reductoras de presión en las arterias B y B1, y finalmente; 3) en la existencia de dos arterias principales, A y B, de diámetro 1000 mm que discurren paralelas hasta el nodo 3019, donde se unen mediante un "by-pass", y que configuran una malla de suministro redundante en cabecera. Junto a todo lo anterior la red presentaba una zona crítica próxima a la cabecera, A6, A8, A10, con desniveles respecto a la alimentación de apenas 30 m, encontrándose algún hidrante con sólo 21 m de desnivel, alimentado por una larga arteria, A6, de un diámetro relativamente importante con objeto de tener unas pérdidas de carga muy reducidas.

Las placas de orificio de vertido a la atmósfera, nodos 1138 y 1150, han sido configuradas como emisores con ecuación de comportamiento $\Delta H = 3441s^2/m^5Q^2$, deducida de

las características dimensionales de las placas orificio, haciendo aparecer tres puntos de altura piezométrica conocida: el canal de alimentación, y los dos vertidos a la atmósfera.

La red fue cargada inicialmente en *GESTAR* de acuerdo a la configuración compuesta por la distribución de ramales tal y como estaban construidos, distribución distinta de la proyectada, conectados a la red arterial configurada según el dimensionado y trazado original. Se realizaron simulaciones sistemáticas con grados de simultaneidad comprendidos entre el 0% hasta el 100% de hidrantes abiertos, estudiándose especialmente las simultaneidades del 70%, que correspondían al ratio de simultaneidad tomada para el diseño de las arterias de cabecera, y del 80% asimilables a un periodo punta donde se verificaba que las velocidades de circulación no excedieran los 2 m/s.

Se comprobó que la simbiosis de la red arterial, tal y como estaba proyectada, con la red de ramales, tal y como estaba construida, resultaba compatible, encontrándose además la posibilidad de reducir el diámetro de algunos tramos de las arterias principales A, B1 y A6 en función de los cambios habidos en el entronque de ramales y en la reducción de hectáreas regadas a presión, modificaciones que suponen un ahorro de 15,6 millones de pts. en conducciones. Se comprobó además que una de las válvulas de reducción de presión dejaba de actuar en condiciones de simultaneidad muy elevadas (85%), que la variación de caudal emitido por las placas orificio sin regulación rondaba el 15% del valor nominal y que el grado de influencia en los niveles de presión que presentaba la apertura o cierre de dichas emisiones era despreciable. Se encontraron diferencias significativas (40%) en los caudales trasegados por las dos arterias paralelas, A y B, entre los tramos limitados por los nodos 3022 y 3019, aún cuando se realizase un conexionado, aparentemente poco asimétrico, como el que aparece en la Figura 1, desequilibrio que puede resolverse con un nuevo "by-pass" en los nodos 3022 ó 3021.

Con el objeto de mejorar los niveles de presión en uno de los ramales de cabecera ya construidos, A8, que contaba con presiones inferiores a los 35 mca, se planteó la posibilidad de mejorar el servicio de los hidrantes procediendo a la interconexión del final de dicho ramal con la arteria A6, que contaba con altura piezométrica suficiente y cuya capacidad de trasiego se encuentra sobredimensionada en función de la limitación de pérdidas de carga señaladas. Para ello se hizo uso de las herramientas de diseño inverso de *GESTAR*. Limitando la reducción de presión por efecto del mallado en el nodo de conexión donante a 1 mca sobre el valor medio reinante en el mismo para un 70% de simultaneidad global (pero con todos los hidrantes de la arteria y ramal afectados abiertos), se configuró dicho nodo como un punto de *Doble Condición*: altura piezométrica deseada impuesta (valor mínimo admisible) y caudal dado, nulo en este caso, por ser un nodo de conexión. Se interrogó a *GESTAR* para que suministrara el diámetro que debería tener un conducto de *PVC*, de 300 m de longitud, para que el estado hidráulico final respetará las restricciones impuestas, siendo el resultado próximo a los 200 mm de diámetro interior y consiguiendo aumentos de presión en el ramal A8 comprendidos entre los 5 y 7 mca.. El coste asociado al conducto normalizado, a los necesarios movimientos de tierra y a las obras de instalación se estimó en 1,8 millones de pts valorándose como factible en función de los ahorros conseguidos en las otras arterias.

4. CONCLUSIONES

La versión preliminar *GESTAR* aplica las técnicas de análisis y simulación de redes presurizadas más potentes, generales y flexibles conocidas a la idiosincrasia de los sistemas de riego, mediante el desarrollo de herramientas específicamente concebidas para ello. El paquete incluye un "interface" gráfico que permite abordar de forma cómoda y sencilla su proyecto, modificación y posterior gestión, tanto por parte de la administración, ingenierías y constructoras, como por parte de los técnicos y supervisores de las comunidades de regantes.

Las mismas herramientas pueden emplearse en el análisis y dimensionado hidráulico de las unidades de riego y jardinería. Introduce además aproximaciones innovadoras que permiten resolver con seguridad una muy amplia gama de problemas prácticos que actualmente no se abordan o se analizan rudimentariamente. Gracias al conjunto de recursos ya implementados y a pesar de ser muchas todavía las capacidades que faltan por implementar en *GESTAR 0.2*, resulta una aplicación productiva y eficiente que ya está siendo utilizada en el proyecto y administración de diversos regadíos aragoneses. El ejemplo presentado, que corresponde al proyecto del Sector XIII de Bardenas II, ilustra algunas de las capacidades y usos potenciales de *GESTAR*, habiendo permitido verificar sobre la marcha la correcta operación de la red después de las múltiples modificaciones que el proyecto original ha sufrido, y a las que todavía se ve sometido, en función de propuestas de última hora, habiéndose sugerido además un conjunto de propuestas de modificaciones que comportan sensibles mejoras en el funcionamiento de la red y un ahorro neto estimado de 13,8 millones de pts., extremos que no hubieran podido formularse con seguridad sin el concurso de *GESTAR*.

5. AGRADECIMIENTOS

La investigación de aspectos computacionales y desarrollo de la aplicación *GESTAR* está siendo efectuada dentro del Convenio: "Modelización Avanzada y Evaluación de las Redes de Riego en Aragón" 95/0106, suscrito entre el *Departamento de Agricultura y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón* y la *Universidad de Zaragoza* en base a trabajos previos y el Proyecto "Desarrollo de una Herramienta de Análisis por Ordenador de Sistemas de Riego por Aspersión y Riego Localizado" 93/282-27, del *Programa de Investigación de la Universidad de Zaragoza*.

6. REFERENCIAS

1 Unidad Docente de Mecánica de Fluidos. "Curso de Diseño Hidráulico de Redes de Riego". UPV. Valencia, Dic. 1993.

2 Aliod, R.; Hernández, C.; Puicercús, A.: "Análisis nodal de los sistemas hidráulicos a presión en régimen permanente". Curso de Diseño, Análisis y Explotación de Redes de Riego a Presión. EUPH. Huesca, Dic. 1994.

3 Todini, E.; Pilati, S.: "A gradient method for the analysis of pipe networks" International Conference on Computer Application for Water Supply and Distribution. Leicester Polytechnic. U.K. Sep. 1987

4 Campos, A.: "Steady-state Fluid Network Analysis". Journal of Hydraulic Engineering, vol. 119, No3, March, 1993

5 Arviza, J.: "Análisis hidráulico de redes. Aplicación nodal a redes de riego a presión". Riegos y drenajes, Año X, Núm. 76, Abril/Mayo 1994.

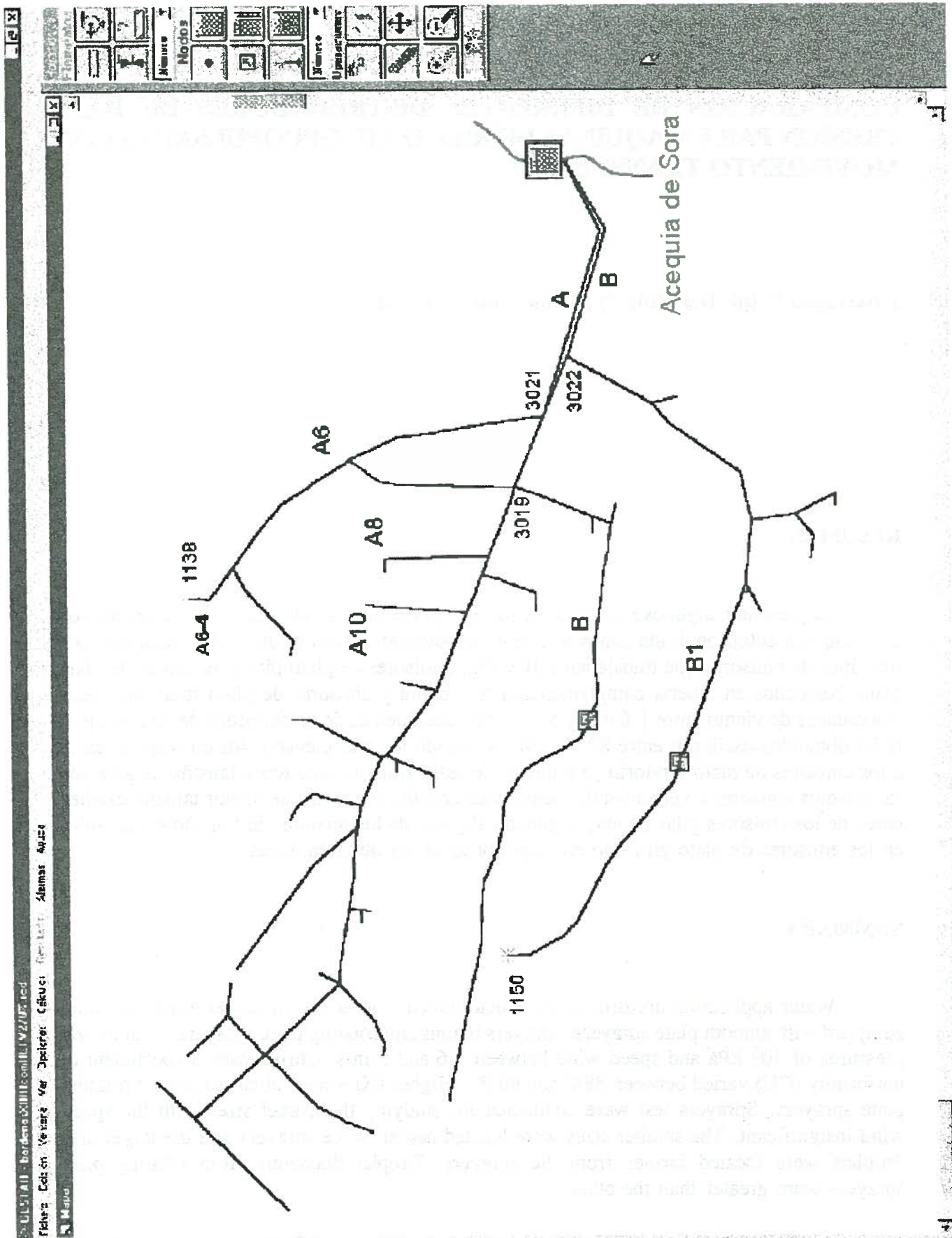


Figura 1: Pantalla de presentación en GESTAR del esquema de la red de distribución Bardenas II Sector XIII

COMPARACION DE DIFERENTES DISTRIBUIDORES DE BAJA PRESION PARA MAQUINAS DE RIEGO AUTOPROPULSADAS CON MOVIMIENTO TRANSVERSAL

J.Barragán ⁽¹⁾ (p); D.J.Hills ⁽²⁾; J.Monserrat ⁽¹⁾; L.Cots ⁽¹⁾

RESUMEN

Se presentan algunos resultados de los ensayos de uniformidad de riego realizados con una máquina autopropulsada con movimiento transversal de 150 m de larga y equipada con tres tipos de emisores que trabajaban a 103 kPa, (emisores de plato plano, emisores de plato plano colocados en tubería complementaria tipo boom y emisores de plato rotatorio), para velocidades de viento entre 1.6 m/s y 5 m/s. Los coeficientes de uniformidad de Christiansen (CU) obtenidos oscilaron entre 88 % y 96 %, siendo los mas elevados los correspondientes a los emisores de plato giratorio. Asi mismo se realizaron ensayos sobre tamaño de gota con los mismos emisores a velocidad de viento despreciable. Las gotas de menor tamaño estaban cerca de los emisores y las de mayor tamaño alejadas de los mismos. El tamaño de las gotas en los emisores de plato giratorio era superior al de los otros emisores.

SUMMARY

Water application uniformities were determined from a 150 m lateral move machine, equipped with smooth plate sprayers, sprayers booms and rotating plate sprayers, with nozzle pressures of 103 kPa and speed wind between 1.6 and 5 m/s. Christiansen's coefficient of uniformity (CU) varied between 88% and 96 %. Higher CU's were obtained for the rotating plate sprayers. Sprayers test were conducted for studying the droplet sizes with the speed wind insignificant. The smaller sizes were located nearer to the sprayers and the larger size droplets were located farther from the sprayers. Droplet diameters from rotating plate sprayers were greater than the others.

⁽¹⁾ Unidad de Ingeniería Hidráulica. ETSIA-Universidad de Lleida.

⁽²⁾ Department of Biological and Agricultural Engineering-Davis. University of California.

INTRODUCCION. OBJETIVOS

En la actualidad el agua escasea, lo mismo que los recursos energéticos, y ello aumenta su precio. Además la demanda creciente de alimentos obliga al incremento de la producción en los cultivos y a un mayor gasto energético. Todo ello hace que hoy en día la conservación del agua y de la energía se convierta en un objetivo fundamental al planificar nuevos regadíos. En los ya existentes deberán realizarse importantes esfuerzos por ahorrar energía mediante un adecuado manejo del agua.

Las máquinas automotrices de riego (bien sean pivots o con movimiento transversal) distribuyen el agua con alta uniformidad y eficiencia, por lo que se presentan dentro del contexto anterior como un buen sistema de riego. Sin embargo al utilizar en dichas máquinas emisores de baja presión se acentúan los riesgos de escorrentía y los de encostramiento superficial por mayor tamaño de gota, así como una mayor incidencia del viento en los patrones de reparto del agua, (Gilley, 1984; Chang y Hills, 1993).

Los objetivos que se plantearon en este trabajo fueron: (1º) Evaluar la influencia del viento en la uniformidad de riego de las máquinas automotrices de riego con movimiento transversal. (2º) Determinar el tamaño de las gotas de agua. (Todo ello planteado en tres tipos de emisores de baja presión).

Diversos autores han trabajado con máquinas de riego de movimiento transversal utilizando emisores de baja presión: Volman y Fangmeier (1983) encontraron coeficientes de uniformidad de Christiansen (CU) de 84 % a 95 % trabajando en diferentes condiciones con una máquina de 170 m de longitud.

Ayars et al. (1987) indican la importancia de un alto valor de CU para alcanzar eficiencias de riego elevadas, que a su vez está directamente relacionada con la producción del cultivo. Incrementos en la producción y bajos consumos de agua son elementos para hacer económicamente atractivo el uso de las máquinas de riego de movimiento transversal, (Wilson et al. 1987). Además el conseguir valores altos de CU para una adecuada aplicación de fertilizantes (Watts y Martín, 1981) y productos fitosanitarios (Silveira et al., 1987) destaca todavía más el interés de este tipo de máquinas.

Hills et al. (1988), trabajando con una de máquina de movimiento transversal de 150 m de longitud, con emisores de plato plano y con emisores tipo boom, obtuvieron valores de CU entre 92 % y 96 % para diversas velocidades de desplazamiento.

Todos estos ensayos fueron realizados con velocidades de viento inferiores a 1.3 m/s por lo que se asumía que su efecto sobre CU era insignificante, (Kinkaid, 1984).

De Boer y Monnens (1993) realizaron ensayos de laboratorio con emisores de plato rotatorio, para diferentes presiones de trabajo y separación entre emisores, obteniendo valores de hasta 96 % para CU.

MATERIALES Y METODOS

La máquina utilizada en este estudio tenía cinco torres con cuatro vanos de 38 m de anchura cada uno. La longitud aproximada total era de 150 m. La alineación ortogonal se conseguía con dos torres guías colocadas en los extremos de la máquina, junto con un cable situado a unos 80 cm de altura sobre el suelo y que permanecía paralelo al canal alimentador de agua situado en uno de sus extremos.

La longitud total se dividía aproximadamente en tres partes iguales colocándose en la primera emisores de plato plano con portaemisores (I); en la segunda emisores con plato plano sobre tuberías complementarias tipo booms (II); y en la tercera emisores de plato rotatorio (III). El espaciamiento entre los diferentes emisores (I), (II) y (III) era de 2 m, 7.6 m y 4 m respectivamente.

Los emisores tipo (I) estaban colocados 2.5 m por encima del suelo, utilizaban boquillas de 4.8 mm y mediante un regulador se las hacía trabajar a 103 kPa. Los emisores tipo (II) tenían la misma configuración que los (I) pero con boquillas de 4.4 mm, estaban colocados a 2.5 m sobre el suelo y tenían regulada su presión a 103 kPa. Cinco emisores estaban montados sobre cada una de las seis pequeñas tuberías (booms) de 15 m de longitud. Estas tuberías estaban instaladas formando un ángulo de 66° con la máquina. Los emisores tipo (III) estaban equipados con un plato con seis canales en los que al incidir el agua proveniente de la boquilla (6.4 mm) provocaban el giro del plato a una velocidad aproximada de 2 rpm. Estaban colocados 2.5 m por encima del suelo, con una separación de 4 m entre ellos y regulada su presión a 103 kPa.

Uniformidad

Las pruebas de uniformidad fueron realizadas durante el verano de 1995, por la mañana o por la tarde, buscando diferentes condiciones de viento. Los resultados parciales que se presentan se realizaron con velocidades de viento desde 1.6 a 5 m/s y velocidades de la máquina del 10 %, 20 % y 40 %, pues siguiendo la normativa ASAE para este tipo de máquinas los ensayos deben realizarse con dosis de agua superiores a 12.5 mm, condición que según Hills et al. (1988) necesita esas velocidades de la máquina para conseguirla.

La uniformidad de distribución era determinada según normas ASAE-S436 (Sep92). Los botes utilizados para recoger el agua tenían 80 mm de diámetro y 110 mm de altura. Eran metálicos, de bordes afilados e iban colocados sobre plataformas individuales de aproximadamente 200 mm de altura. La separación entre ellos era de 1 m y se dispusieron tres líneas paralelas a la dirección de la máquina con un total de 63 botes. Las líneas correspondientes a los emisores tipo (I) estaban colocadas en el vano 1º de la máquina, los del tipo (II) entre los vanos 2º y 3º, y los del tipo (III) en el vano 4º.

La velocidad del viento se determinaba mediante un anemómetro modelo Robinson (o de cazoleta) provisto de veleta para la dirección. Estaba situado a 2 m de altura y a menos de 200 m de la zona de los pluviómetros. Se tomaban medidas cada diez minutos aproximadamente durante el tiempo de la evaluación y después se calculaba el valor medio.

Tamaño de gota

Se realizaron ensayos para determinar la distribución del tamaño de gota en los tres tipos de emisores trabajando a 103 kPa. Se utilizó el método de la harina siguiendo la metodología descrita por Eigel y Moore (1983).

Se llenaban de harina hasta el borde unos recipientes metálicos cuadrados de 25 cm de lado y 2 cm de profundidad. A continuación se exponían en el campo a la acción de los emisores durante unos segundos para recoger un número suficiente de gotas. Los recipientes se colocaban a distancias de 2 m uno de otro en los emisores del tipo (II) y (III) y a 1 m en los del tipo (I), en dirección perpendicular a la máquina. Después de secados a 38° durante 24 h se extraía una muestra del centro del recipiente mediante un cilindro metálico de borde afilado de 20 cm de diámetro. De este modo se se evitaba analizar las gotas deformadas por el efecto borde. Las bolas (de harina y agua) formadas, una vez secas, eran separadas de la harina y clasificadas mediante un juego de cribas de aberturas 1; 1.18; 1.40; 2; 2.36; 3.327 mm. La relación entre la masa de las bolas de harina en gramos (M) y el diámetro de las gotas de agua en milímetros (d) se determinó siguiendo la expresión de Hills y Gu (1988): $d = 12.84 * M^{.336}$.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores del CU en función de la velocidad del viento se representan en la figura N° 1 para cada uno de los emisores ensayados. Se observa como el emisor de plato giratorio presenta una mejor uniformidad en la mayoría de los casos respecto de los otros emisores. El mayor solapamiento por parte de los emisores adyacentes puede ser una de las causas de dicha mejora. Además la mayor superficie mojada, por ser mayor el radio de alcance, reduce los riesgos de escorrentía.

La tendencia a la disminución del CU es ligera en el caso del emisor tipo (I), salvo para la velocidad del viento de 5 m/s que desciende por debajo del 90 %. En el caso del emisor tipo (II) los valores muestran un comportamiento más errático, y sensiblemente inferiores a los obtenidos por Hills et al. (1988) con el mismo tipo de emisores pero en ausencia de viento.

Los emisores tipo (III), dan valores bastante más altos que los obtenidos por De Boer y Monnens (1993), que para separaciones entre emisores de 4 m y trabajando a 100 kPa de presión, obtuvieron CU del 88 %. En este caso la acción del viento tiende a mejorar sensiblemente la distribución del agua.

En cuanto al tamaño de gota en la figura N°2 se presenta la relación entre el diámetro de la gota media y la distancia al emisor para cada uno de los tipos ensayados. Se observa una clara tendencia a aumentar el diámetro de gota con la distancia en los tres casos, salvo para la distancia 0 m, en los emisores (II) y (III), donde se obtuvieron valores mayores al caer agua acumulada en la tubería y producir gotas mayores. Las tendencias concuerdan con los resultados obtenidos por Hills y Gu (1988) y por Dadio y Wallender (1985). Los emisores de plato rotativo (tipo III) producen las las gotas de mayor tamaño en todos los casos.

FIGURA N° 1

ACCION DEL VIENTO

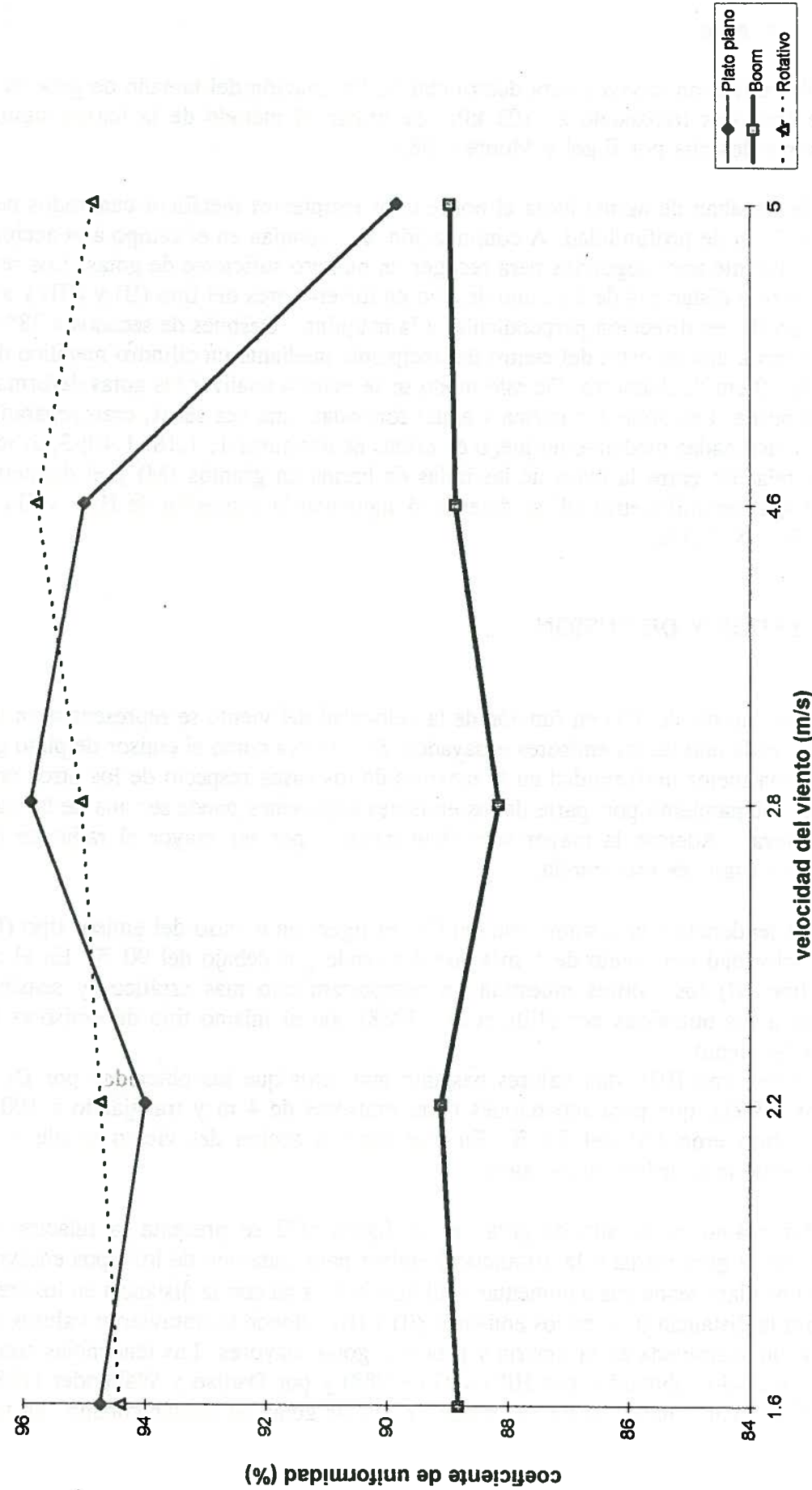
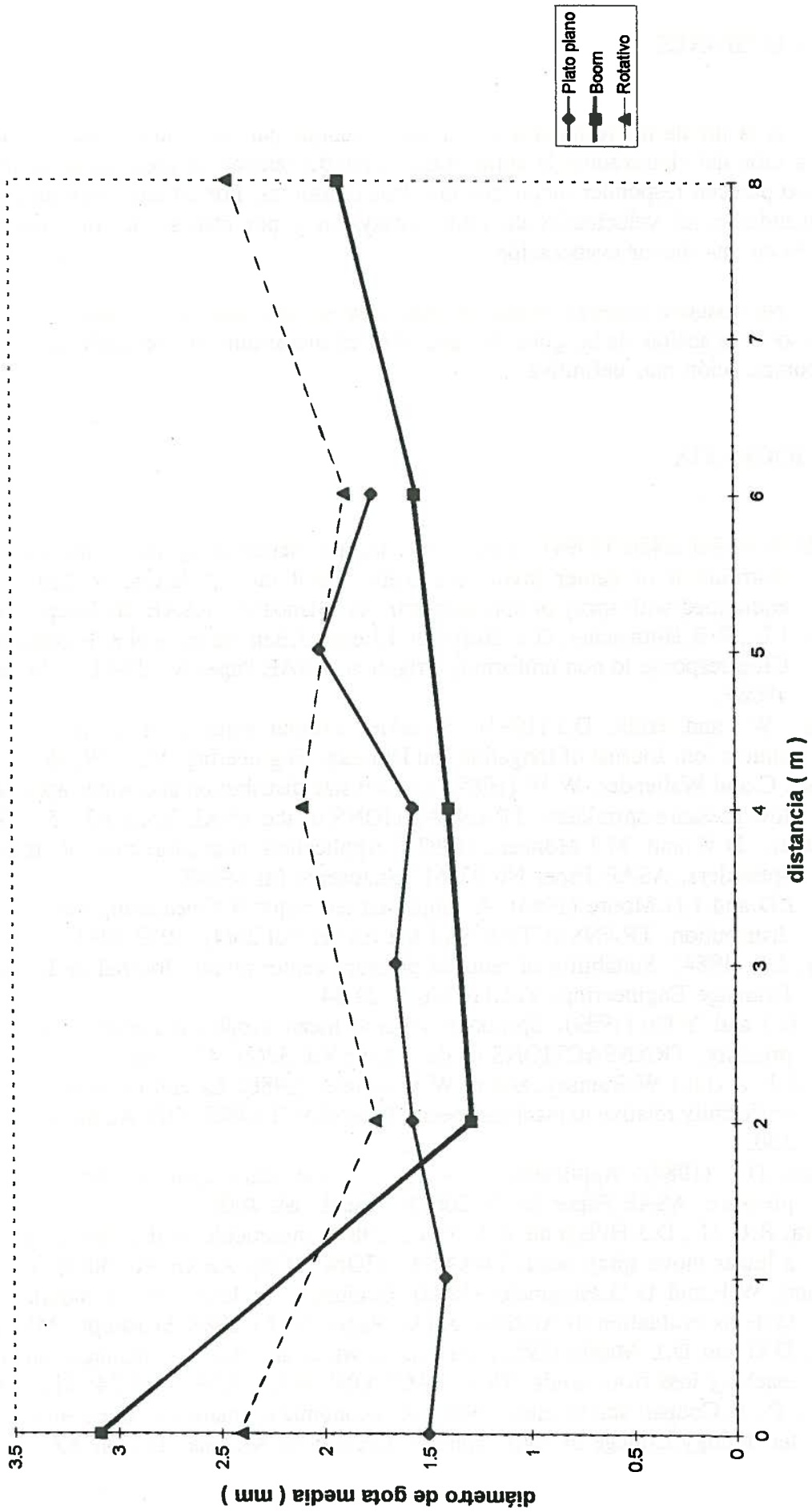


FIGURA N° 2

TAMAÑO DE GOTA



CONCLUSIONES

A la luz de los resultados presentados, aunque parciales, tanto desde la perspectiva de la acción del viento sobre la uniformidad como del tamaño de gota, los emisores de plato rotativo parecen responder mejor que los otros emisores: Por un lado presentan una mejor uniformidad a las velocidades de viento ensayadas y por otro su mayor tamaño de gota incidirá en una menor evaporación.

No obstante deberán realizarse más ensayos con nuevas velocidades de viento así como sobre la acción de las gotas de agua sobre el encostramiento del suelo para poder tener una comparación más definitiva .

BIBLIOGRAFIA

- ASAE Standard S436 (1994). Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot, cornerpivot, and moving lateral irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. Standards, ASAE, St.Joseph, MI 49085.
- Ayars, J.E.; R.B.Hutmacher; G.L.Hoffman; J.Letey; J.Ben-Asher; and K.H.Solomon.(1987) Crop response to non-uniformity irrigation. ASAE Paper No.87-2110, St.Joseph, MI 49085.
- Chang, W.J.and Hills, D.J.(1993). Sprinkler droplet effects on infiltration. I:Impact simulation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.119, No.1: 142-156.
- Dadio, C.and Wallender, W.W.(1985). Droplet size distribution and water application with low-pressure sprinklers. TRANSACTIONS of the ASAE Vol.28(2): 511-516.
- De Boer, D.W.and M.J.Monnens.(1993). Application characteristics of rotating-plate sprinklers. ASAE Paper No.932612,St.Joseph; MI 49085.
- Eigel, J.D.and I.D.Moore.(1983). A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. TRANSACTIONS of the ASAE Vol.26(4): 1079-1084.
- Gilley, J.R.(1984). Suitability of reduced pressure center-pivots. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.110 No.1: 22-34.
- Hills, D.J.and Y.Gu.(1989). Sprinkler Volume mean droplet diameter as a function of pressure. TRANSACTIONS of the ASAE Vol.32(2): 471-476.
- Hills, D.J; Y.Gu; J.W.Rumsey; and W.W.Wallender.(1988). Lateral move water application uniformity relative to machine speed. TRANSACTIONS of the ASAE Vol.31(2):527-530.
- Kinkaid, D.C.(1984). Application uniformity of stationary sprinkler laterals at reduced pressure. ASAE Paper No.84-206, St.Joseph, MI 49085.
- Silveira, R.C.M.; D.J.Hills; and W.E.Yates.(1987). Insecticide oil distribution pattern from a linear move spray head. TRANSACTIONS of the ASAE Vol.30(2): 438-441.
- Voltman, W.F.and D.D.Fangmeier.(1983). Evaluation of low-pressure moving irrigation systems evaluation in Arizona. ASAE Paper No.83-2022, St.Joseph, MI 49085.
- Watts, D.G.and D.L.Martin.(1981). Effects of water and nitrogen management on nitrate leaching loss from sands. TRANSACTIONS of the ASAE Vol.24: 911-916.
- Wilson, P.; R.Coupal; and W.Hart.(1987). An economic evaluation of linear-move irrigation technology.College of Agriculture, University of Arizona, Tucson AZ 85721.

APLICACION DE TECNICAS DE ANALISIS HIDRAULICO EN PERIODO EXTENDIDO A LA REGULACION DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION DE AGUA

C. de Miguel Espejo ^{1(p)}, M^a P. Montesinos Barrios ²,
J. L. Ayuso Muñoz ¹

RESUMEN

Las técnicas de simulación hidráulica en periodo extendido son idóneas para el estudio del funcionamiento de sistemas de distribución de agua (SDA) durante sucesivos periodos de tiempo. El empleo de métodos de análisis hidráulico en condiciones de operación restringidas, permite determinar los valores de diversos parámetros de operación de los SDA, tales como niveles del agua en los depósitos y presiones en determinados nudos del sistema. En la presente comunicación se describe un procedimiento para la determinación del nivel mínimo requerido en dos depósitos que abastecen una red ramificada de uso agrícola.

ABSTRACT

Extended period simulation technics are applied to describe water distribution systems (WDS) operation through consecutive time steps. These technics are combined with the reformulated steady-state network equilibrium equations in terms of specified pipe-system parameters (storage level, flow or pressure specifications). In this paper a procedure is developed for determining the minimum storage level needed in two tanks of a branched irrigation network.

1. INTRODUCCION

La correcta regulación de un sistema de distribución de agua (SDA), es un problema de suma importancia debido a su influencia en los costes energéticos de una red. Así, la determinación del volumen de agua requerido en los depósitos es el dato fundamental para la determinación de la duración del bombeo, dimensionamiento de las tuberías de llenado de depósitos, etc.

En la presente comunicación se aborda el estudio del funcionamiento de una red de riego y su posible regulación mediante dos depósitos de distribución. El objetivo del trabajo es la determinación de los niveles mínimos del agua en los depósitos, con el fin de que queden aseguradas las presiones mínimas en los nudos de suministro para una sucesión de esquemas de demanda. Para ello se simula el funcionamiento del sistema durante sucesivos intervalos de tiempo, utilizando técnicas de análisis en período extendido combinadas con procedimientos de análisis de redes malladas en condiciones de operación restringidas, al ser una red ramificada con más de un punto de abastecimiento.

(1) Area de Proyectos de Ingeniería, E.T.S.I.A.M. Univ. Córdoba

(2) Area de Ingeniería Hidráulica, E.T.S.I.A.M. Univ. de Córdoba.

2. MATERIAL Y METODOS

El análisis estático de SDA consiste en determinar la distribución de caudales y presiones para unas condiciones de carga determinadas, es decir, para el estado del sistema en un cierto momento (demandas en nudos, niveles de depósitos, etc.). La información proporcionada por este análisis queda limitada al instante considerado, resultando insuficiente para el estudio del funcionamiento global de una red, de ahí la necesidad del desarrollo de técnicas que permitan el análisis de los sistemas de distribución bajo distintas condiciones de operación durante determinados períodos de tiempo.

Análisis en período extendido

La consideración de la variabilidad temporal de las condiciones de carga (demandas y presiones nodales) implica la definición del *análisis en período extendido*, en el cual se simula el funcionamiento de un SDA a lo largo de un determinado intervalo de tiempo. Para ello, se realizan análisis de la red en distintos instantes, considerando en cada uno la hipótesis de régimen permanente y siguiendo una secuencia de patrones de demanda. Algunos autores emplean como método de análisis el de Newton-Raphson para las ecuaciones de nudo (Rao y Bree, 1977) y otros, como Wood (1980, tomado de Lansey y Mays, 1989), utilizan métodos lineales. Así, el sistema queda *fotografiado* cada cierto intervalo de tiempo y su funcionamiento caracterizado a lo largo del mismo. De esta forma se obtienen, además de la distribución de caudales, las variaciones en los niveles de los depósitos y su efecto sobre las presiones en los nudos del sistema.

En el presente trabajo se ha optado por realizar los sucesivos análisis hidráulicos mediante el método lineal modificado (Montesinos y Ayuso, 1992), que considera simultáneamente las ecuaciones de continuidad y de conservación de la energía que definen la red, obteniéndose así las distribuciones de presión y caudal para el instante considerado y para unas condiciones dadas.

El cálculo de las variaciones de nivel del agua en los depósitos se realiza considerando que las tuberías los conectan al sistema, aportan o extraen de los mismos, durante cada intervalo de tiempo, los caudal obtenidos del análisis hidráulico, los cuales están relacionados con la variación de volumen:

$$Q_{\Delta t} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

donde $Q_{\Delta t}$ es el caudal consumido en el intervalo Δt y ΔV representa la variación del volumen del depósito durante dicho intervalo. La variación del nivel del depósito, Δh , al final del intervalo queda definida, en función de la sección de la planta del mismo, S , considerada prismática regular, por la expresión:

$$\Delta h = \frac{Q_{\Delta t} \cdot \Delta t}{S} \quad (2)$$

En el siguiente intervalo de tiempo se actualizan los niveles de los depósitos con los valores calculados de Δh , se introducen las nuevas demandas y se asume asimismo un régimen uniforme para el análisis de esta nueva situación.

Análisis hidráulico restringido. Determinación de parámetros de operación

Las ecuaciones que describen el sistema (ecuaciones de continuidad y de conservación de la energía) pueden reformularse en función de los parámetros que caracterizan a los componentes del mismo (Shamir y Howard, 1968) y resolverlas empleando una modificación de los métodos clásicos de análisis. Este planteamiento se conoce con el nombre de *problema inverso* y permite el cálculo de los parámetros de algunos elementos de la red bajo distintas condiciones de operación (Gofman y Rodeh, 1981; Ormsbee y Wood, 1986b; Boulos y Wood, 1990; Altman y Boulos, 1995).

Una restricción en el funcionamiento de un SDA de agua supone especificar el valor de la presión (o la altura piezométrica) en un nudo, o fijar el caudal en una tubería de la red. El nudo o la tubería adquiere así la denominación de *crítico*, pues la operación de todo el sistema queda condicionada por el cumplimiento de esa limitación. En el contexto de la gestión de una red de distribución de agua, pueden existir diferentes requerimientos de presión en los nudos para una serie de situaciones concretas; por ejemplo, en ocasiones es necesario asegurar una presión mínima en determinados puntos y en otros casos se debe imponer un valor máximo para evitar sobrepresiones. Las limitaciones de caudal en una conducción, por su parte, se establecen para controlar el caudal que entra o sale de un depósito en determinadas situaciones.

Cualquier restricción implica la adición de una nueva ecuación al sistema de ecuaciones que caracteriza la red. El fijar la presión en un nudo significa incorporar una ecuación de energía. En el caso de una restricción de caudal, se añade una ecuación de continuidad, en la que se especifique el valor fijado para el caudal en la tubería crítica.

Por cada ecuación adicional, hay que incorporar una nueva variable de modo que el número de incógnitas sea igual al de ecuaciones y el sistema tenga solución única. Este problema se puede resolver mediante la inclusión de los parámetros de la red en el vector de las incógnitas del sistema de ecuaciones. Los distintos parámetros a considerar según Boulos y Wood (1990) son: de diseño (diámetro, longitud), de operación (tarado de válvulas reguladoras de presión (VRP), niveles de los depósitos, velocidades de bombeo) y de calibración (rugosidad de las tuberías) y es posible obtener valores para todos ellos, realizando las oportunas modificaciones en el procedimiento de cálculo. Así mismo, la flexibilidad de este método permite tanto la determinación del valor de un parámetro o grupo de parámetros, como el cálculo de un factor multiplicador para un cierto número de variables.

Para resolver el sistema de ecuaciones ampliado, empleando el método lineal modificado, es necesario linealizar las ecuaciones de energía, expresadas en función de los caudales y los parámetros:

$$F_e(Q, P) = \sum_{l \in (k)}^{N_k} h_{t_l}(Q, P) + \sum_{l \in (k)}^{N_k} h_{s_l}(Q, P) + \sum_{l \in (k)}^{N_k} H_{b_l}(Q, P) - \Delta E_k = 0 \quad (3)$$

siendo $F_e(Q, P)$ la ecuación conservación de la energía entre dos nudos de altura piezométrica fija, expresada en función de los caudales circulantes, Q y de los parámetros seleccionados, P ; h_{t_l} identifica las pérdidas de carga del conjunto de tuberías, k , que unen los dos nudos de altura piezométrica fija; h_{s_l} representa las pérdidas en singularidades; H_{b_l} es la energía aportada por las bombas; ΔE_k diferencia de alturas piezométricas entre los nudos extremos del conjunto de tuberías k y N_k número total de tuberías que componen el conjunto k .

La linealización se realiza del mismo modo que en el caso que no existieran restricciones (Montesinos y Ayuso, 1992) es decir, por medio de un desarrollo en serie de Taylor

truncado tras el término correspondiente a la primera derivada. Reordenando términos:

$$\left. \frac{\partial F_e}{\partial Q} \right|_{Q_i} \cdot Q_{i+1} + \left. \frac{\partial F_e}{\partial P} \right|_{P_i} \cdot P_{i+1} = \left. \frac{\partial F_e}{\partial Q} \right|_{Q_i} \cdot Q_i + \left. \frac{\partial F_e}{\partial P} \right|_{P_i} \cdot P_i - F_e(Q_i, P_i) + \Delta E_k \quad (4)$$

donde P_{i+1} y Q_{i+1} representan los nuevos valores de los parámetros y de los caudales circulantes en la iteración actual, obtenidos a partir de P_i y Q_i , que son los valores de los parámetros y caudales en la iteración previa.

Determinación del nivel de un depósito como parámetro de operación del sistema:

Un depósito se define como un nudo de altura piezométrica fija, H_d , la cual equivale al nivel del agua en dicho depósito. Cuando se considera tal altura piezométrica como incógnita, es decir, como parámetro, la ecuación de conservación de la energía a lo largo del conjunto de tuberías que conectan el depósito con cualquier otro nudo de altura piezométrica fija del sistema, H_m , queda como:

$$F_e(Q, H_d) = \sum_{i \in \bar{a}(k)}^{N_k} h_{t_i} + \sum_{i \in \bar{s}(k)}^{N_k} h_{s_i} - \sum_{i \in \bar{b}(k)}^{N_k} H_{b_i} \mp (H_d - H_m) = 0 \quad (5)$$

en la que el término $\hat{\Delta E}_k$, se expresa en función del parámetro H_d .

La ecuación 5 es lineal con respecto a H_d , por lo que no es preciso realizar ninguna linealización.

Otra manera de considerar el nivel de un depósito como variable es mediante la inclusión de un factor multiplicador, α , del valor de partida de H_d . En ese caso, la expresión anterior queda:

$$F_e(Q, \alpha) = \sum_{i \in \bar{a}(k)}^{N_k} h_{t_i} + \sum_{i \in \bar{s}(k)}^{N_k} h_{s_i} - \sum_{i \in \bar{b}(k)}^{N_k} H_{b_i} \mp (\alpha \cdot H_d - H_m) = 0 \quad (6)$$

Determinación del nivel de agua mínimo requerido en dos depósitos de suministro

La determinación del nivel mínimo requerido en dos depósitos (generalizable a n depósitos) que suministran agua a una red de riego, no es un problema trivial, pues el análisis de redes ramificadas con más de un punto de abastecimiento implica el empleo de la metodología propia de las redes malladas, mucho más compleja.

A continuación se presenta un procedimiento para el cálculo de tales niveles mínimos, resultado de la combinación de las metodologías anteriormente expuestas. La figura 1 representa el diagrama de flujos del procedimiento.

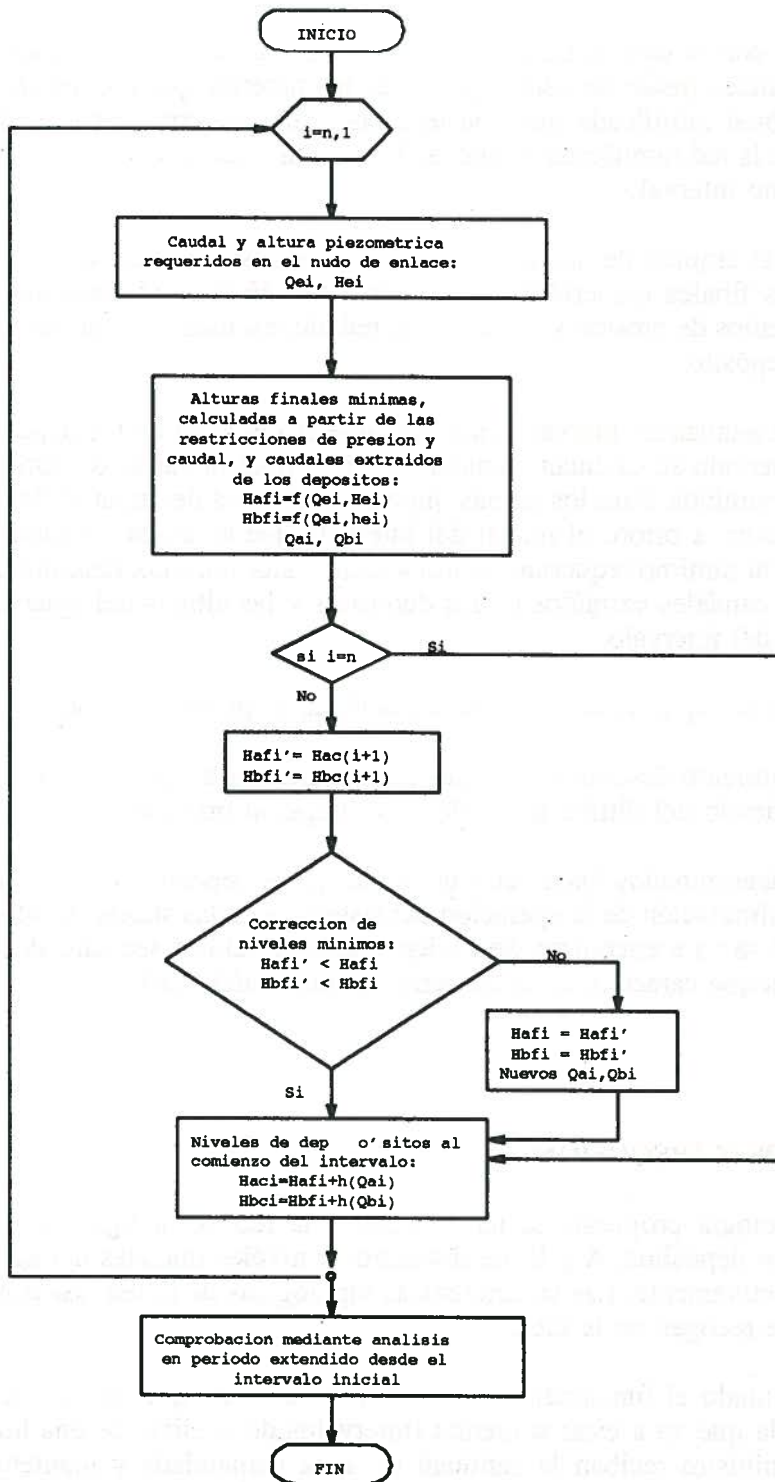


Figura 1. Diagrama de flujos del procedimiento propuesto.

Procedimiento de cálculo:

Comienza con la determinación de la altura piezométrica y el caudal de salida en el nudo de enlace (nudo de convergencia de las tuberías que provienen de los depósitos con la subred ramificada que abastece las tomas de consumo), mediante el análisis estático de la red ramificada, fijándose la presión mínima en el nudo más desfavorable, en el último intervalo.

Mediante el empleo del análisis hidráulico con restricciones (ecuación 6) se calculan los niveles finales requeridos en los depósitos *H_{afi}*, *H_{bfi}*, para que se cumplan los requerimientos de presión y caudal en la red, determinándose así los caudales extraídos de cada depósito.

Cuando se analiza el intervalo final, los niveles del agua en los depósitos al comienzo de este intervalo se calculan sumando al nivel final la variación correspondiente a los caudales extraídos. Para los demás intervalos, el nivel del agua al final de cada uno de ellos, se toma, a priori, el inicial del intervalo que se acaba de analizar. Si este valor es inferior al mínimo requerido, se toma dicho valor mínimo, determinándose posteriormente los caudales extraídos de los depósitos y las alturas del agua en los mismos al comienzo del intervalo.

El proceso se repite iterativamente hasta llegar al primer intervalo.

El procedimiento descrito no es más que un análisis en período extendido inverso, es decir, partiendo del último intervalo hasta llegar al primero.

Una vez determinados los niveles del agua en los depósitos en el momento inicial, se realiza la simulación de la operación del sistema para las sucesivas situaciones de carga en las que se va a encontrar. Se obtienen así los valores secuenciales de las variables hidráulicas que caracterizan el esquema operativo del SDA.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

La metodología propuesta se ha aplicado a la red de la figura 2, cuyas fuentes de suministro son dos depósitos, A y B, de diámetros y niveles iniciales del agua 15 m, 49 m y 10 m, 50 m respectivamente. Las características topológicas de la red, así como las demandas nodales básicas se recogen en la tabla 1.

Se ha simulado el funcionamiento de la red de modo que, en las tres situaciones de carga distintas a la que va a estar sometida (intervalos de análisis de una hora de duración), los nudos de suministro reciban la cantidad de agua demandada y mantengan una presión mínima de 35 mca (supongamos que se trata de una red de riego por aspersión). Los tres esquemas de demanda bajo los que debe operar la red se han determinado a partir de las demandas nodales básicas, multiplicadas por 0.75, 1.5 y 1.0.

En la tabla 2 se resumen los resultados de análisis del sistema, una vez determinados los niveles de partida del agua en los depósitos para que bajo las tres condiciones de carga que debe operar el sistema, éste suministre los caudales demandados y se cumplan los requerimien-

tos de presión. Las presiones nodales se dan al inicio y al final de cada intervalo, teniendo en cuenta que en cada uno de ellos se dan distintas demandas, de ahí la discontinuidad entre los valores de presiones correspondientes al final de un intervalo y al principio del siguiente.

La tabla 3 recoge la evaluación de los niveles del agua en los depósitos en los distintos intervalos de análisis.

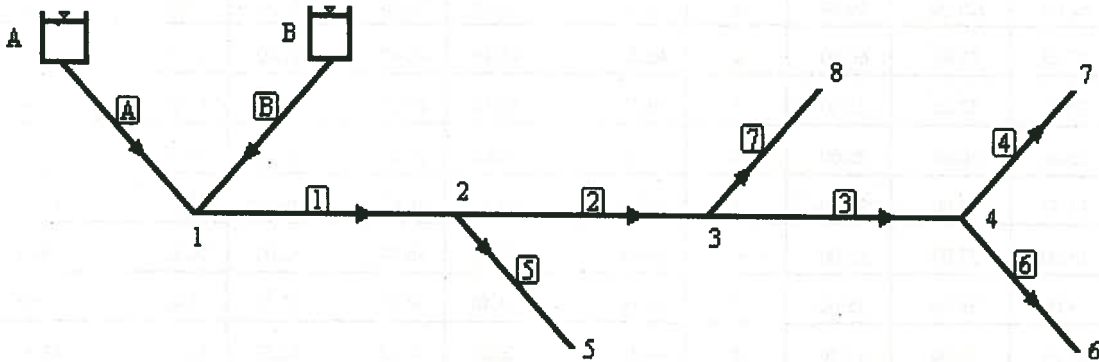


Figura 2 Esquema topológico de la red ejemplo

Tabla 1. Datos de la red ejemplo

Tub.	Long. (m)	Diam. (mm)	C	Nudo	Cota (m)	Dem (l/s)
1	100	300	130	1	20	0
2	100	250	130	2	10	0
3	100	200	130	3	5	0
4	100	175	130	4	12	0
5	100	150	130	5	10	20
6	100	150	130	6	12	15
7	100	150	130	7	10	20
A	100	200	130	8	8	25
B	100	150	130	A	49	0
				B	50	0

Tabla 2. Resultados del análisis en período extendido (tres intervalos de tiempo)

Tab	Caudal (l/s)			Nudo	Presión (mca)					
	Intervalo				Intervalo					
	1	2	3		I ₁ F ₁	I ₂ F ₂	I ₃ F ₃			
1	62.00	121.00	80.00	1	36.46 35.75	33.58 31.93	33.60 33.05			
2	47.00	91.00	60.00	2	46.20 45.49	42.67 41.02	43.18 42.63			
3	28.00	53.00	35.00	3	50.81 50.10	46.36 44.21	47.57 47.02			
4	15.00	30.00	20.00	4	43.37 42.66	37.93 36.28	39.91 39.36			
5	15.00	30.00	20.00	5	45.64 44.93	40.65 39.00	42.22 41.67			
6	13.00	23.00	15.00	6	42.94 42.23	36.69 35.04	39.35 38.8			
7	19.00	38.00	25.00	7	45.11 44.40	38.97 37.32	41.46 40.91			
A	22.23	75.00	47.56	8	46.94 46.23	40.23 38.58	43.13 42.58			
B	39.77	46.00	32.44							

Tabla 3. Niveles en los depósitos tras el análisis de los tres intervalos de tiempo

Depósito	Niveles (m)					
	Intervalos					
	I ₁ F ₁	I ₂ F ₂	I ₃ F ₃			
A	56.75 56.30	56.30 54.77	54.77 53.80			
B	59.87 58.05	58.05 55.94	55.94 54.45			

Del análisis de la tabla 2 se desprende que la segunda condición de carga es la más restrictiva (mayores caudales), siendo crítico el nudo 6, ya que al final del segundo intervalo de análisis la presión mínima alcanza el valor límite.

El resultado del análisis en período extendido efectuado sobre el sistema de la figura 2, muestra que los niveles mínimos de agua requeridos en el depósito A fluctúan entre 56.75 m y 53.80 m, equivalente a un volumen de 521.31 m³, lo que supone situar la solera del depósito a 53.80 m y que la altura mínima sea de 2.95 m; en el caso del depósito B, los niveles de agua fluctúan entre 59.87 m y 54.45 m que equivalen a un volumen demandado de 425.69 m³, el nivel de la solera debe situarse a 54.45 m y la altura mínima del depósito debe ser de 5.42 m. La suma de los volúmenes almacenados en ambos depósitos es equivalente a la suma de las demandas de la red en las tres horas de operación del sistema. Los niveles mínimos del agua en los depósitos obtenidos permiten que el sistema funcione correctamente en las tres situaciones operacionales impuestas.

4. CONCLUSIONES

La combinación de técnicas de análisis en período extendido y de análisis con restricciones de operación ha resultado ser una herramienta útil para la regulación de un SDA ramificado abastecido por dos depósitos. La metodología propuesta permite la determinación del nivel de agua requerido en los depósitos (sin tener en cuenta volúmenes de reserva en caso de avería), es decir el dimensionamiento de los mismos, de modo que en cualquiera de las situaciones que definen el patrón de operación del sistema (demandas y presiones nodales), se cumplan los requerimientos funcionales impuestos. La información obtenida del análisis hidráulico en período extendido es fundamental para la determinación de los períodos de llenado de los depósitos, es decir la operación de los equipos de bombeo, la cual puede regularse de modo que suponga el mínimo coste de energía.

5. BIBLIOGRAFIA

- ALTMAN, T. y BOULOS, P. F., 1995. *Solving Flow-Constrained Networks: Inverse Problem*. J. Hydr. Engrg., ASCE, 121(5), 427-431.
- BOULOS, P. F. y WOOD, D. J., 1990. *Explicit Calculation of Pipe Networks Parameters*. J. Hydr. Engrg., ASCE, 116(11), 1329-1344.
- GOFMAN, E. y RODEH, M., 1981. *Loop Equations with Unknown Pipe Characteristics*. J. Hydr. Engrg., ASCE, 107(9), 1047-1060.
- LANSEY, K. y L. MAYS, 1989. *Simulation Models*. Cap. 2. Reliability Analysis of Water Distribution Systems. ASCE.
- MONTESINOS, M^a P., AYUSO, J. L., 1992. *Modelos de simulación de sistemas de distribución de agua*. Actas del VIII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, 439-452.
- ORMSBEE, L. F. y WOOD, D. J., 1986a. *Hydraulic Design Algorithms for Pipe Networks*. J. Hydr. Engrg., ASCE, 112(12), 1195-1207.
- ORMSBEE, L. F. y WOOD, D. J., 1986b. *Explicit Pipe Network Calibration*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, 112(2), 166-182.
- RAO, H. S. y BREE, D. W., 1977. *Extended Period Simulation of Water Systems - Part A*. J. Hydr. Div., ASCE, 103(2), 97-108.
- SHAMIR, U. y HOWARD, C. D. D., 1968. *Water Distribution Systems Analysis*. J. Hydr. Div., ASCE, 94(1), 219-234.

SISTEMA DE CONTROL Y GESTIÓN DE RECURSOS HIDRÁULICOS EN LA CUENCA DEL DUERO

por

Eustorgio Briso-Montiano de Alvaro*

RESUMEN:

El control y gestión de las aguas reguladas destinadas al riego de 61 zonas regables, que suman unas 300.000 Has., en una cuenca hidrográfica como la del río Duero, caracterizada por tener prácticamente comprometidos todos sus recursos hidráulicos regulados con los regadíos, adquiere primordial importancia, sobre todo, en periodos de sequía.

El establecimiento de un sistema que permite conocer en tiempo real y de forma continua los caudales derivados a cada zona regable, de fonía que mejora la operación, juntamente con un mejor conocimiento de los mapas de cultivo, vienen a conformar el marco adecuado de la explotación de un gran número de zonas regables dependientes de recursos hidráulicos regulados en cabecera de los ríos.

SUMMARY:

The management and control of regulated waters for irrigation of 61 areas over some 300.000 hectares, in a basin such as that of the Duero river, which has almost all its regulated resources bound to irrigation, is of paramount importance, particularly during drought periods.

The setting up of a system which allows a continuous and in real time knowledge of the flows drawn to each of the irrigated areas, in order to improve the operation, along with a better knowledge of the crop patterns, perform the adequate framework for the right exploitation of a vast number of irrigated areas, depending on the water resources regulated at the river's head.

1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Duero está bordeada por cordilleras que forman casi un anillo envolvente, a modo de cingulo montañoso de complicada articulación y morfología, elevándose por encima de los 2.000 m., especialmente en la línea divisoria con las cuencas hidrográficas limítrofes.

El 66,5% de la superficie de la Cuenca se encuentra topográficamente entre 601-1.000 m. de altitud sobre el nivel del mar, pudiéndose afirmar que es la tierra llana y elevada la que configura la zona central e interior de la Región Castellano-Leonesa (altitud media de 900 m.)

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, M.B.A. por ESADE y Jefe del Área de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Duero - Valladolid

En la Cuenca del Duero predomina el clima Mediterráneo Templado Fresco, si bien, es igualmente extenso el tipo Mediterráneo Semiárido Continental. Dos hechos fundamentales se señalan tradicionalmente como condicionantes del clima de la Cuenca del Duero: La elevada altitud media y el aislamiento de las influencias marítimas y la consiguiente continentalidad, las cuales dan lugar a unas temperaturas rigurosas y a precipitaciones escasas. La precipitación media anual en la Cuenca es de 615 mm. Las menores precipitaciones se encuentran en las proximidades del Duero, mientras que los valores más elevados se producen en el anillo montañoso periférico superándose los 800 mm. de media, una parte importante en forma de nieve que, por las características climatológicas antes expuestas, suele permanecer hasta bien entrada la primavera.

En el año 1927 nace la Confederación Hidrográfica del Duero con el objetivo de ejecutar una adecuada política hidráulica en la Cuenca de este río, construyendo y gestionando entre otras, una infraestructura compuesta, actualmente, por 21 embalses cuya capacidad total es de 2.683 Hm³. y 61 Zonas Regables con una superficie total de riego que se aproxima a 300.000 Has.

Los consumos para el regadío representan el 93% del total de recursos disponibles en los embalses, lo que hace que su gestión sea tarea primordial para el Área de Explotación de la Confederación Hidrográfica del Duero; por lo que ha llevado a cabo la implantación de una potente red de radio para fonía y datos en la Cuenca, denominada Red Hidroduero, que es el soporte actual del control y gestión de los recursos hídricos destinados al riego.

La información en tiempo real y continúa de estos recursos, juntamente con un mejor conocimiento de los mapas de cultivos, ha permitido optimizar la explotación.

2.- RED HIDRODUERO

La Red Hidroduero ha sido construida por la Confederación, durante los últimos años, bajo los auspicios de planificación del Sistema Automático de Información Hidrológica, SAIH, siendo el resultado final fundamentalmente un sistema de control y gestión de los recursos hidráulicos de la Cuenca del Duero durante la campaña de riego.

Con motivo de la extremada sequía padecida en la Cuenca, durante el año hidrológico 90-91 se inició el **Proyecto de Establecimiento y Modernización de Compuertas y Sistemas de Medición de Caudales en las Tomas de los Canales del Estado de las Juntas de Explotación de la Cuenca del Duero**, persiguiendo el control de los recursos hídricos destinados al riego, así como el conocimiento de los sistemas que facilitasen una mejor explotación de los mismos. Las obras se iniciaron el 7 de Diciembre de 1992 y el sistema empezó a ser operativo en Abril de 1994, coincidiendo con el inicio de la campaña de riego.

La Red Hidroduero y su Sistema facilitan, localmente o a distancia y en tiempo real, el conocimiento de los parámetros necesarios para la correcta explotación de los canales del Estado administrados por esta Confederación, teniendo como objetivos fundamentales:

- El establecimiento de la infraestructura básica del SAIH.
- El establecimiento de redes de fonía y datos.
- El control del caudal circulante por los canales.

- Disponer, en el futuro, de telemandos en las instalaciones con el fin de efectuar aperturas y cierres de mecanismos, desde el Centro de Control.

Con las obras e instalaciones ejecutadas hasta el momento, la RED HIDRODUERO, controla y gestiona en la actualidad los caudales circulantes, exclusivamente, en los canales del Estado con el único fin de ampliar el conocimiento que mejore la gestión y optimice los recursos hidráulicos disponibles.

El funcionamiento de la Red se inicia a partir de un azud que deriva las aguas a la toma del canal de cada zona regable, donde se encuentran unas compuertas planas de superficie, motorizadas, dispuestas para ser telemandadas, que sin esfuerzo personal permiten dotar al canal del caudal necesario. Aguas abajo, se ha construido una sección de control para crear un resalto hidráulico, a través de un vertedero sumergido, en el que un sensor, mide la altura de la lámina de agua desde la cresta del vertedero, enviándola a un caudalímetro interactivo. Este muestra los datos y medidas al explotador, de forma local, facilitándole la toma de decisiones o actuaciones.

El dato "Caudal" que es necesario para poder efectuar una correcta gestión del recurso hidráulico, se obtiene recogiendo los datos automáticamente, mediante sensores y transmitiéndolos, en tiempo real, al Centro de Control de Recursos Hidráulicos de "La 42", situado junto al Canal de Castilla, a la entrada de Valladolid.

El sistema de transmisión permite la comunicación de fonía fija y móvil, además de la transmisión de los datos, entre los puntos remotos de control y el Centro de Procesos de Datos de Recursos Hidráulicos.

La Red Troncal consta de cinco terminales y trece repetidores que confluyen en la estación de radio de Renedo (Valladolid), que enlaza, a su vez, con el Centro de Control.

3. FUNDAMENTOS Y ESPECIALIDADES APLICADAS EN LAS OBRAS E INSTALACIONES

Ingeniería Civil: Ejecución de casetas para protección de los mecanismos de maniobra y compuertas de las tomas de los canales. Adaptación de las tomas a las nuevas secciones de control y accesos. Ejecución de casetas para repetidores radio.

Ingeniería Hidráulica: Ejecución de sección de control e instalaciones de caudalímetros interactivos en todas las tomas, siendo neumáticos en los canales por gravedad y electromagnéticos en las elevaciones. Limnímetros en las dársenas del Canal de Castilla.

Ingeniería Electromecánica: Instalación de compuertas y motores de accionamiento, ejecución de líneas eléctricas de B.T., M.T. y A.T., protecciones y cuadros de maniobra.

Ingeniería de las Telecomunicaciones: Ejecución de una red de radio para fonía y datos, con terminales en embalses y en las tomas de los canales.

Ingeniería Electrónica: Instalación de microprocesadores, terminales radio y móviles, telemandos y alarmas.

Ingeniería Informática: Arquitectura del sistema basada en el diseño e instalación de un sistema SCADA y terminales informáticos.

Arquitectura: Recuperación del Centro de Gestión y Control en la esclusa 42 del Canal de Castilla.

4.- UNIDADES DE OBRAS EJECUTADAS

OBRA CIVIL

Construcción de 47 casetas antivandálicas para compuertas en las tomas de canales.

Construcción de 19 casetas para equipoa de transmisión de la Red Principal de Comunicaciones.

Instalación de 50 casetas prefabricadas de la Red Secundaria de Comunicaciones.

Ejecución de 47 secciones de control.

INSTALACIONES DE HIDROMETRÍA

Instalación de 64 Compuertas.

Ejecución de 77 Motorizaciones en compuertas.

Ejecución de 47 Resaltos Hidráulicos con vertedero sumergido y 3 del tipo Venturi.

Instalación de 47 Caudalímetros neumáticos y 24 electromagnéticos.

Instalación de 3 limnímetros.

EQUIPOS DE LA RED DE TRANSMISIÓN DE FONÍA Y DATOS

200 Canales Múltiplex Digital.

74 Terminales de Datos y más de 60 Km. de cable instalado.

58 Equipos de Supervisión.

12 Emisores receptores VHF de la Red Troncal.

4 Emisores receptores UHF en la Red Secundaria.

8 Emisores receptores VHF/UHF en la Red Secundaria.

20 Terminales portátiles y móviles.

35 Antenas parabólicas, 24 antenas de tipo omnidireccional, 85 antenas Yagui y más de 3 Km. de cable de guía onda instalada.

CENTRO DE CONTROL

Está constituido por un Procesador Central y Unidades Periféricas asociadas, un soporte o Sistema de Adquisición de Datos (SCADA) y como terminales se han instalado 14 PC en las oficinas de Valladolid, 5 en León y 4 en Salamanca, de las siguientes características:

Hewlett Packard	VECTRA PC
Video:	Super VGA
Procesador:	486SX2 50Mhz
Memoria:	4MB
Unidad de Disco:	1,44MB
Disco Duro:	214 MB

El Sistema de Adquisición de datos se encarga de:

- Adquirir medidas recogiendo los datos tomados por todos los sensores y alarmas de los puntos de control.
- Enviar y remitir órdenes a los actuadores de los puntos de control y supervisar su cumplimiento.
- Procesar la información. Los datos pueden ser procesados a través de cálculos, comparaciones, etc. que se precisen.
- Almacenamiento temporal de la información.
- Transmisión de la información. Elabora mensajes para transmitirlos según un protocolo predeterminado.

CENTRO DE PROCESO DE DATOS

La obra ha sido completada con la instalación de un Centro de proceso de Datos en el edificio conocido como "La 42", una antigua fábrica de luz del Canal de Castilla, habiendo sido este edificio totalmente reconstruido y rehabilitado, en el que se alojan despachos, sala de exposiciones, sala de reuniones y centro de proceso de datos.

En el exterior se ha construido la correspondiente urbanización y jardines con diferentes especies arbóreas.

Está en proceso de ejecución de proyecto la instalación de una fuente-mural, en la que se relacionan, el agua y la historia de las comunicaciones.

**MANTENIMIENTO DE LOS ELEMENTOS METÁLICOS
EN LA ZONA REGABLE DEL CANAL DE ORELLANA
(BADAJOZ)**

JIMENO RAMÍREZ, A.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA

En esta ponencia se pretende plasmar de una manera escueta la experiencia tenida a lo largo de veinticuatro años en la explotación y mantenimiento de los elementos metálicos en la Zona Regable del Canal de Orellana con una superficie afectada de 56.000 hectáreas, donde la puesta en riego se produjo de manera escalonada desde el año 1.960 al 1.971, y por la diversidad de mecanismos justifica un conocimiento de su problemática que consideramos muy completa, pues afecta a conceptos distintos de proyectar una zona de riego y los cambios que han sido necesarios de introducir para mejorar los sistemas de medida y regulación.

In this report it seek to shape of a manner disengaged the experience had to him long of twenty-eight years in the explotation and maintenance of the elements metalicos in the Zona Regable of the Canal of Orellana with an affected surface of 56.000 hectareas where the setting in water it produced of manner spaced out from the 1.960 year to 1.971, and by the diversity of mechanisms justifies a knowledge of his problematical that we consider very it complete, since fond of conceptos distinct of to hurl a zone of water, and the changes that they have been necessary of showing to improve the measure systems and regulation.

INTRODUCCIÓN

En una zona regable, para que la función del reparto de caudales destinados al riego se realice de acuerdo con los planes previstos, es fundamental que los mecanismos encargados de realizar la función, tanto de regulación como de medición, se encuentren en las mejores condiciones de servicio posible. Este es el caso de las compuertas, aforadores y medidores, elementos que generalmente son metálicos, con las consiguientes dificultades para su mantenimiento por la rapidez con que se produce su deterioro al ser construidos principalmente de hierro en contacto frecuente con el agua, y en relación con la agresividad de los componentes químicos de este, así es más o menos rápido y violento el deterioro de estos mecanismos.

Como objetivo de esta exposición, solamente se pretende el poner a disposición de futuros proyectistas de zonas de regadío, la modesta experiencia obtenida en la explotación del Canal de Orellana desde el año 1.968 al momento actual, referida al mantenimiento de los elementos metálicos y las dificultades que entraña el manejo de estos elementos para su conservación "in situ", pues la mayoría de los mecanismos, una vez instalados sobre el hormigón no admiten el ser desmontados para su reparación en talleres.

Sin embargo esta operación que podría parecer muy costosa económicamente, por lo que pudiera suponer el desplazamiento de personal y medios a la zona de reparación, se encuentra compensada con el empleo de la mano de obra encargada del reparto de agua durante la campaña de riego, en el mantenimiento de estos elementos y de las pequeñas reparaciones durante los meses en que no se riega.

DETERIOROS QUE ENCONTRAMOS EN LOS MECANISMOS

En primer lugar citaremos, no por frecuentes pero sí porque se producen, los ocasionados por el mal uso o por actos vandálicos de personas ajenas a la guardería o a los acequeros. Estos deterioros suelen ser la rotura de volantes o el doblar los husillos de las compuertas, la deformación de las mismas al ser golpeadas con piedra o azadones para incrementar la entrada de agua, etc. Estos hechos son imprevisibles y pueden ser de lo más diferentes, así como la sustracción de los mecanismos por parte de personas que posteriormente los venden a los chatarreros.

Dependiendo del tratamiento de protección que el fabricante dé a los mecanismos antes de su colocación en la obra, así será su duración. Antes de tener que actuar en la conservación de los mismos, el máximo de duración puede oscilar entre los ocho y quince años como máximo y dos años como tiempo mínimo. Se ha de resaltar que aunque el aspecto exterior del mecanismo sea de buena conservación, la pintura de protección y el mantenimiento empieza a desaparecer antes por las guiaderas o zonas de mayor roce entre las partes fijas y móviles.

Cuando el desgaste y oxidación se produce en las partes móviles y desmontables, dependiendo de su estado de conservación se puede proceder a su limpieza y posterior pintado en el taller o bien a su sustitución por otra pieza nueva.

El principal problema lo encontramos en la conservación de los elementos fijos, sujetos al hormigón de los canales y acequias, donde las condiciones de trabajo tienen la incomodidad de tener que actuar en zonas muy ajustadas de espacio, tanto para el operario como por lo angosto de separación entre las diferentes partes de los medidores y mecanismos.

El proceso de realizar el trabajo de mantenimiento es como sigue:

En primer término se procede al calentamiento de la zona de limpieza con lamparillas o sopletes de butano, golpeando con las piquetas o raspando con barra de uña donde no sea posible el golpear la parte calentada, con lo cual se consigue el desprendimiento de los caspones de chapa de hierro oxidadas, o de las partes más fuertes de oxidación.

A continuación se procede a un cepillado enérgico de la parte a tratar, con cepillo de alambre, dejando el mecanismo lo más limpio posible de polvo de óxido; posteriormente se aplica un tratamiento con productos anti-oxidantes de los que reaccionan con el óxido de hierro, formando una película impermeable al agua y al aire. A continuación pintamos con una mano de pintura de cubrición y otra de acabado con el color habitual. Estas dos últimas manos de pintura son de composición con resinas EPOXI.

Con este proceso de conservación de los mecanismos hemos conseguido desde su aplicación hace cinco años el no tener que reparar ninguno de los mecanismos tratados, a excepción de una suave capa exterior de pintura para mejorar su aspecto, dado que las pinturas Expoxi se decoloran rápidamente con los rayos del sol, aplicando a los tres años el tratamiento.

La importancia que ha tenido el encontrar un buen tratamiento para los elementos metálicos, de manera que se pueda aumentar la vida útil de los mismos se debe a que en cada operación de mantenimiento va perdiendo el mecanismo el espesor de chapa, llegando a desaparecer las guideras de las tajaderas y creándose unas separaciones entre los elementos que deberían ajustar para impedir el paso del agua, que hace imposible el control de los caudales a distribuir; hecho que suele suceder después de haberse realizado tres o cuatro operaciones de mantenimiento de la forma antes descrita.

Uno de los problemas más importantes que hemos tenido se ha producido en las compuertas de desagüe de fondo de los aliviaderos, debido a dos motivos principales, en primer lugar que al ser compuertas de tamaño intermedio los rodamientos de ajuste trasero y lateral normalmente carecen de engrasadores, con lo cual en unos tres años quedan bloqueadas por la oxidación en el momento de su uso, debiéndose sustituir parte de los rodamientos con relativa frecuencia, operación muy costosa dada la dificultad de los lugares en que se encuentran situados, que no hacen fácil la ubicación de una grúa para su extracción y posterior

colocación. Otro de los inconvenientes en este tipo de compuerta son los ajustes de guideras de bronce en lugar de las juntas de goma. El bronce, que en principio parece óptimo por su facilidad de deslizamiento y de ajuste, tiene el inconveniente de ir sujeto en la compuerta de hierro, con lo cual en el momento de iniciarse el proceso de oxidación en la misma, produce un regresamiento en el espesor de la compuerta que la bloquea, sin posibilidad de ninguna apertura, no pudiendo realizar en dicha guidera ninguna reparación, pues de intentarse ésta sería tan costosa como la adquisición de un mecanismo nuevo, por tener que sanear y complementar con aporte de material la falta del mismo por oxidación para que el ajuste fuese de nuevo realmente eficaz.

Esto en lo referente a los que pudiéramos considerar pequeños mecanismo factibles de alguna conservación con los medios disponibles por el Servicio de Explotación del Canal de Orellana y referidos a las obras propiedad del Estado.

Las obras compuestas por elementos metálicos tales como sifones, acueducto o compuertas de regulación del canal principal se contrata su conservación en el momento que se estima preciso por deficiencias en la pintura o en las juntas de dilatación.

Para dar una idea de la importancia que en una zona regable tiene el costo de mantenimiento en los elementos metálicos pasaremos a resumir los costos de los Proyectos presupuestados en los últimos quince años. En estos gastos no están incluidos los jornales ni la herramienta, junto con los medios del Servicio, como el coche taller y otros destinados al mantenimiento de los mecanismos:

AÑO	PROYECTOS PRESUPUESTADOS (Importe Pesetas)
1.981	1.978.300
1.982	14.907.351
1.983	6.565.106
1.984	0
1.985	2.994.882
1.996	88.338.114
1.987	26.477.434
1.988	2.919.566
1.989	114.814.458
1.990	0
1.991	0
1.992	117.222.554
1.993	113.605.373
1.994	44.196.032
1.995	14.490.545

Lo que supone una inversión contratada en 15 años de 548.509.715 pesetas, siendo la media anual 36.567.314 pesetas, lo cual supone un costo anual por Ha. de 653 pesetas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

Consideramos que estos costos son elevados para el mantenimiento de una zona regable, además del condicionamiento que supone el destinar un número elevado en jornales de nuestro propio personal a este mantenimiento, considerando su bajo rendimiento teniendo en cuenta que estas operaciones se efectúan en invierno y sus meses próximos, con las dificultades de lluvia y rocío que dificultan notablemente este tipo de actuaciones en campo abierto.

Como recomendaciones prácticas y que actualmente estamos llevando a efecto, se encuentran el sustituir el mayor número posible de medidores y compuertas por otras construidas en acero inoxidable, el cambio de las compuertas de aliviaderos en desagües de fondo por válvulas, la transformación, en los sitios que lo permitan, de las acequias de los desagües automáticos por los de labio fijo.

Así mismo encontramos más útil en la explotación de una zona regable para la regulación de las cotas en acequias y canales secundarios, los conocidos como picos de pato o picos de flauta construidos en hormigón, que las compuertas metálicas de regulación, tanto automáticas como manuales, al ser estas más fáciles de manipular por los regantes para cubrir la lámina de agua en detrimento de la regulación hecha por acequeros o guarda-canales.

De igual manera encontramos más prácticos los medidores Parshall que cualquiera de los otros aforadores que sean metálicos para el control de caudales en acequias y canales.

DISEÑO Y MANEJO DEL RIEGO POR SURCOS

E. Camacho¹, C. Pérez¹, J. Roldán¹, M. Alcaide¹ y J. Reza²

¹ *Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba*

² *Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería*

Resumen

Tradicionalmente el diseño de un sistema de riego por surcos se ha realizado aplicando los criterios empíricos del Soil Conservation Service (S.C.S.) de EE.UU. Posteriormente y con la ayuda de los ordenadores, se pudieron resolver de forma numérica las ecuaciones de Saint-Venant. Los modelos de onda cinemática resuelven dichas ecuaciones con una serie de simplificaciones, y son útiles de cara al diseño previo de un riego por surcos. Pero estos métodos de diseño no permiten un manejo en tiempo real que simplifique y mejore el rendimiento de aplicación del riego. En esta comunicación se presenta un nuevo modelo que trabaja en tiempo real. La metodología desarrollada se aplica a un caso práctico y se compara con métodos de diseño anteriores.

Abstract

Empirical criteria of Soil Conservation Service (S.C.S.) have been traditionally used for the design of a furrow irrigation system. Later, Saint-Venant equations have been solved numerically with the help of computers. Kinematic wave models solve these equations with some simplifications, and they are very useful for the previous design of furrow irrigation. However, they don't allow an irrigation management in real time which simplifies and improves the irrigation efficiency. In this paper, we present a model that carries out an irrigation management in real time. An application to a practical case and a comparison with other design methods are also done with our methodology.

1. INTRODUCCIÓN

Un primer intento de mejorar el rendimiento de aplicación del riego por surcos fue propuesto por el S.C.S. (1974) que estableció una serie de ecuaciones empíricas que facilitaban su diseño de una forma fácil y simple conociendo determinadas variables.

El estudio hidráulico del movimiento variable y variado que tiene lugar en un surco permitió definir las ecuaciones de Saint-Venant (1887). Pero si bien dichas ecuaciones eran conocidas, su resolución analítica no fue posible hasta hace algunos años cuando se desarrollaron los métodos de cálculo por ordenador. Entre los primeros trabajos de este tipo se puede destacar el de Strelkoff (1977).

Dichas ecuaciones pueden ser resueltas según diversas simplificaciones pero, en cualquier caso, constituyen a priori, por su propia naturaleza racional, un mejor método

de diseño y simulación de un riego por surcos que el método empírico propuesto por el S.C.S. (Losada, 1992).

No obstante, ambos métodos si bien permiten diseñar y simular un riego por surcos, no permiten su manejo en tiempo real. Dado este inconveniente se ha estimado muy interesante desarrollar un modelo que sirva de diseño pero que actúe a su vez en campo manejando durante la propia operación del riego según se esté desarrollando ésta (Pérez, 1995). De esta forma se consigue una mejora en el rendimiento de aplicación y, lo que es más importante, un adecuado manejo del riego sin necesidad de calcular variables complejas que son necesarias para realizar el diseño con los métodos tradicionales.

En efecto, una de las variables más difíciles de determinar en el riego por superficie por su carácter variable en el tiempo y variado a lo largo de la superficie es la infiltración. Esta incertidumbre en la determinación de las características de infiltración es eliminada con el modelo que se propone, pues dicho modelo determina durante la propia operación del riego los parámetros de infiltración (Pérez y col., 1995). Una vez determinados los parámetros de infiltración, el modelo determina los recortes de caudal a aplicar y el tiempo de corte para conseguir la lámina de agua requerida.

2. METODOLOGÍA

2.1. Criterios del Soil Conservation Service (S.C.S.)

Todas las relaciones propuestas por el S.C.S. tienen justificación sobre bases hidráulicas de apoyo experimental como pueden ser la ecuación de infiltración y la fórmula de Manning. La ecuación de infiltración con la que el S.C.S. trabaja es⁽¹⁾:

$$Z = k t^a + C \quad (1)$$

donde: k, a = constantes empíricas. Dependen de la familia de infiltración del S.C.S.
 $C = 6'985 \cdot 10^{-3}$.
 Z = lámina infiltrada.
 t = tiempo de contacto.

Para definir el perímetro mojado, P , el cual tendrá en cuenta la infiltración horizontal, el S.C.S. propone la siguiente ecuación empírica:

$$P = 4'9745 \left(\frac{q_0 n}{I_0^{0'5}} \right)^{0'4247} + 0'2274 \quad (2)$$

donde: q_0 = caudal de entrada al surco.
 n = coeficiente de aspereza de Manning.
 I_0 = pendiente topográfica.

⁽¹⁾ Todas las unidades están referidas en el S.I.

El tiempo de contacto necesario para que se infiltre la lámina requerida puede ser calculado a partir de la ecuación (1) y teniendo en cuenta la separación entre surcos S y el perímetro mojado, dado por la ecuación (2).

$$t_{cr} = \left[\left(\frac{H_r S}{P} - C \right) \frac{1}{k} \right]^{1/a} \quad (3)$$

donde H_r es la lámina requerida.

La curva de avance que propone el S.C.S. viene dada por la siguiente relación empírica:

$$t = \frac{x}{c} e^{\frac{d x}{b_0^{1/2}}} \quad (4)$$

donde: $c = 1'179 \cdot 10^{-1} + 2'979 \cdot 10^{-2} I_F$
 $d = 9'249 \cdot 10^{-8} + 3'263 \cdot 10^{-7} I_F$

Si consideramos que en el extremo final del surco debemos tener el tiempo de contacto necesario para que se infiltre la lámina requerida (ecuación 3) y no se produzca de esta forma déficit, y teniendo en cuenta que el receso es simultáneo en todo el surco (figura 1), el tiempo de aplicación del riego será:

$$t_{ar} = t_{aL} + t_{cr}$$

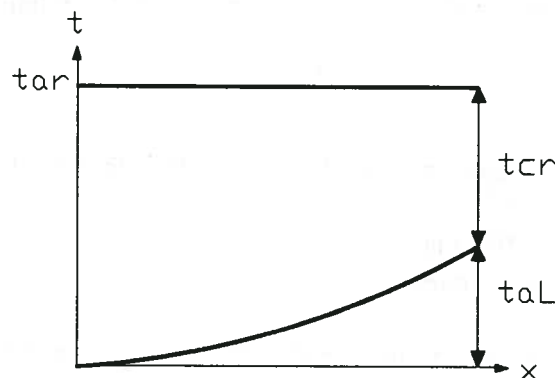


FIGURA 1. Avance y receso según S.C.S.

Con objeto de reducir el volumen de escorrentía, es una práctica aconsejable la de aplicar recortes de caudal una vez que el agua llega al final del surco. Si se modifica el caudal se modifica el perímetro mojado según la ecuación (2) y, por tanto, el tiempo de contacto requerido (ecuación 3).

La lámina de agua aplicada en el riego incluyendo los recortes es:

$$H_b = \frac{q_0 t_{aL} + q_0 r t_{cr}}{S L} \quad (5)$$

donde: $r =$ relación de recorte: $r = q_{cb}/q_0$.
 $q_{cb} =$ caudal recortado.

El rendimiento de aplicación en este caso, considerando que no hay déficit será:

$$R_a = \frac{H_r}{H_b} \quad (6)$$

Calculando la lámina media infiltrada puede calcularse las láminas de escorrentía y de percolación profunda, y, por tanto, los coeficientes de pérdidas correspondientes.

2.2. Modelos de onda cinemática

El fundamento teórico del modelo de onda cinemática que se usa en el riego por superficie se basa en el uso de las ecuaciones de conservación de la masa, ecuación de continuidad y de la cantidad de movimiento (ecuaciones de Saint-Venant). Despreciando en dichas ecuaciones los términos inerciales y los gradientes de presión, las ecuaciones se convierten en (Walker y col., 1987):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$I = I_0 \quad (8)$$

La resolución de estas ecuaciones se puede realizar por el método de las características o mediante la aproximación del volumen de control deformable. Se ha utilizado este último método ya que tiene una serie de ventajas respecto a la solución que emplea el método de las características. La estabilidad numérica está mejor garantizada para las condiciones iniciales y para los casos donde el avance sea muy lento o la pendiente y las condiciones del suelo varíen a lo largo del surco.

Para el estudio de la fase de avance se representa el volumen de agua en superficie e infiltrado en el suelo mediante una celdilla de control deformable. Existen tres casos típicos, que se representan en la figura 2:

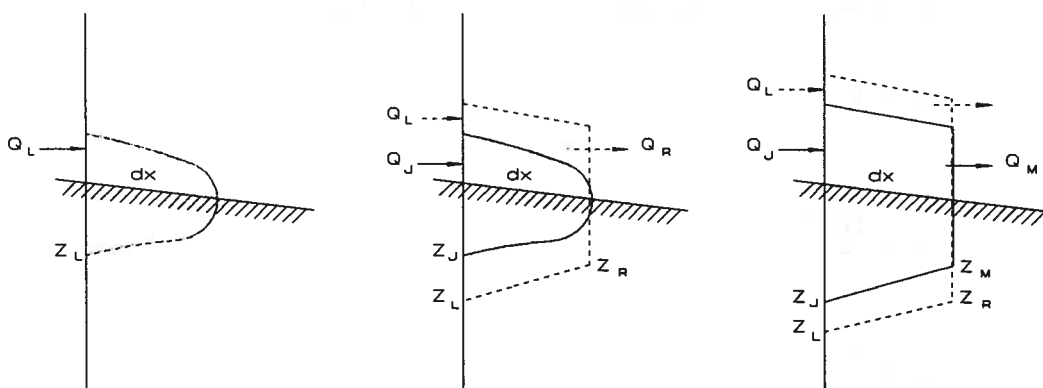


FIGURA 2. Tipos de celdilla en un volumen de control.

La primera celdilla es la extrema e inicial del análisis y contiene el frente de avance. La segunda es de transición ya que en el tiempo (i-1) es extrema. La tercera es la típica de cualquier posición que esté detrás de las dos anteriores. Se considera cada celdilla simultáneamente y se realiza un cálculo enmallado en el plano x-t (figura 3).

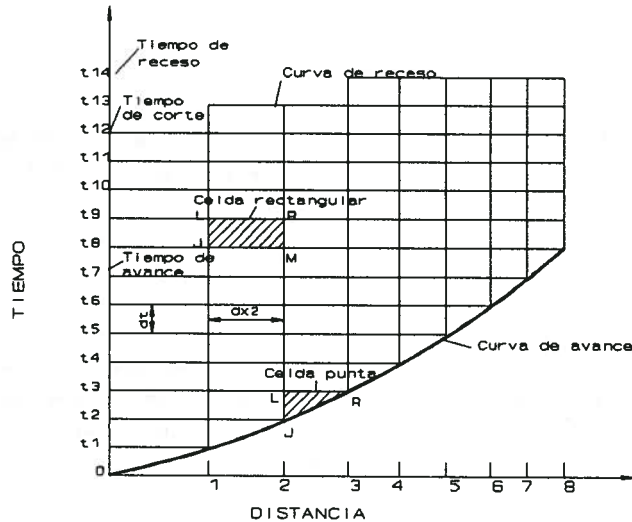


FIGURA 3. Enmallado Euleriano x-t para el modelo de onda cinemática.

La ecuación general que se aplica a una celdilla intermedia general será (Walker y col., 1987):

$$[\theta (Q_L - Q_R) + (1 - \theta) (Q_J - Q_M)] \delta t - [\phi (A_L + Z_L - A_J - Z_J) + (1 - \phi) (A_R + Z_R - A_M - Z_M)] \delta x_{k-1} = 0 \quad (9)$$

donde: θ = coeficiente que tiene en cuenta la variación no lineal del perfil del flujo con el tiempo.
 ϕ = coeficiente que tiene en cuenta la variación no lineal del perfil del flujo con el espacio.

Modelos como el SIRMOD (1989) resuelven dicho enmallado.

El caudal puede expresarse en función del área:

$$Q = \alpha_1 A^{\alpha_2} \quad (10)$$

donde:

$$\alpha_1 = \frac{(\rho_1 I_0)^{0.5}}{n} \quad (11)$$

$$\alpha_2 = \frac{\rho_2}{2} \quad (12)$$

en la que hemos usado una relación empírica propuesta por Elliot y col. (1982):

$$A^2 R^{4/3} = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (13)$$

siendo ρ_1 y ρ_2 constantes empíricas dadas por:

$$\rho_1 = \frac{\sigma_1^{10/3 - \rho_2}}{\gamma_1^{4/3}} \quad (14)$$

$$\rho_2 = \frac{10}{3} - \frac{4}{3} \frac{\gamma_2}{\sigma_2} \quad (15)$$

donde σ_1 , σ_2 , γ_1 y γ_2 son constantes empíricas que relacionan el área y el perímetro mojado con el calado:

$$A = \sigma_1 y^{\sigma_2} \quad (16)$$

$$WP = \gamma_1 y^{\gamma_2} \quad (17)$$

Por tanto, la ecuación (9) queda en función de A_R y es resuelta explícitamente para cada nudo k ($1 \leq k \leq N-1$), usando el método de Newton-Raphson. La condición límite por la izquierda define Q_J y Q_L y por tanto la ecuación (9) se simplifica a:

$$\theta Q_L \delta t - \phi A_L \delta x_N - \phi Z_L \delta x_N = 0 \quad (18)$$

A_L puede ser conocido de la celda previa y Z_L es función del tiempo de contacto, por lo que se puede despejar δx_N , resultando:

$$\delta x_N = \frac{\theta \alpha_1 A_L^{\sigma_2} \delta t}{\phi A_L + \phi Z_L} \quad (19)$$

Las condiciones límites son:

$$\left. \begin{array}{ll} Q(t, 0) = 0 & t \leq 0 \\ Q(t, 0) = Q_0 & 0 < t < t_{co} \\ Q(t, 0) = 0 & t > t_{co} \\ Q(0, x) = 0 & x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (20)$$

siendo t_{co} = tiempo de corte, que en este caso coincide con t_{ar} .

Cuando el flujo de entrada se corta se supone que el área de la sección transversal en el límite izquierdo de la primera celdilla, A_L , se hace cero inmediatamente.

En cualquier celdilla, si el área de la sección transversal se hace igual o inferior al 5% del área original que existía al suministrar agua al surco, los cálculos saltan a la siguiente, y así, sucesivamente, hasta que el receso sea completado.

2.3. Modelo MEPI

El modelo MEPI simula el riego mediante el modelo de onda cinemática descrito anteriormente, de manera que va buscando aquellos parámetros de infiltración que simulen un avance que se ajuste lo más posible al que hemos medido en campo. Para la búsqueda de estos parámetros de infiltración se utiliza el método de optimización simplex (Nelder y Mead, 1965), que permitirá obtener los parámetros de infiltración del riego. El modelo estima los parámetros k y a de la ecuación de Kostiakov-Lewis ($Z = k t^a + f_0 t$), mientras que el parámetro f_0 se fija inicialmente, ya que se puede medir por otros métodos indirectos. Una vez conocidos estos parámetros de infiltración, se simula todo el riego mediante el modelo de onda cinemática.

2.3.1. Cálculo de los parámetros de infiltración

Como ya se ha comentado, la estimación de los parámetros de infiltración k y a de la ecuación de Kostiakov-Lewis se realiza mediante el método de optimización simplex. Este método va buscando unos valores de k y a que optimicen una función objetivo Y . En nuestro caso se busca minimizar las diferencias entre los tiempos de avance medidos en campo y los simulados por el modelo de onda cinemática. Por tanto, la función es:

$$Y = \sum_{i=1}^n (t_{med_i} - t_{sim_i})^2 \quad (21)$$

donde: t_{med_i} = tiempos de avance medidos.
 t_{sim_i} = tiempos de avance simulados.
 n = número de puntos comparados.

Este método de optimización necesita unos valores iniciales de k y a . Para partir de unos valores aproximados a los que buscamos, aplicamos un simple método de balance de volumen con los datos de avance medidos y así obtenemos de una forma fácil y rápida (Blair y Smerdon, 1988; Camacho y col., 1993) unos valores de k y a que nos servirán para inicializar el método simplex.

En la resolución de este enmallado Euleriano se ha tenido en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la infiltración. En este caso, la ecuación de infiltración tiene en cuenta la variabilidad espacial y temporal del calado y, por tanto, del perímetro mojado. Strelkoff y Souza (1984) consideraron la infiltración en función del perímetro mojado, WP :

$$Z = (k t^a + f_0 t) WP \quad (22)$$

En este trabajo también consideramos una dependencia lineal, de manera que introducimos en la ecuación de infiltración unos parámetros variables de k y f_0 :

$$k_i = k_{i-1} \frac{WP_i}{WP_{i-1}} \quad (23)$$

$$f_{0_i} = f_{0_{i-1}} \frac{WP_i}{WP_{i-1}} \quad (24)$$

De esta manera podemos dejar la ecuación (9) en función del área A , ya que el perímetro mojado se puede expresar en función del área mediante la siguiente ecuación:

$$WP = \gamma_1 \left(\frac{A}{\sigma_1} \right)^{\gamma_2/\sigma_2} \quad (25)$$

2.3.2. Consideraciones del modelo para realizar un buen manejo del riego

Para la realización de un buen manejo del riego, el modelo tiene en cuenta una serie de aspectos como son la realización de varios recortes de caudal para disminuir la escorrentía, y la determinación del tiempo de corte. Una vez finalizada la simulación del riego, el modelo nos da una evaluación del mismo.

2.3.2.1. Recorte de caudal

Uno de los aspectos importantes en el manejo del riego por superficie es el recorte de caudal. Mediante esta práctica conseguimos reducir la escorrentía con lo que hacemos un mejor uso del agua teniendo menos pérdidas en este sentido.

Al igual que Reddell (1986), asumimos que el recorte de caudal es igual, despreciando el almacenamiento superficial, a la velocidad de infiltración a lo largo de todo el surco durante un intervalo de tiempo:

$$Q_{cb} = \frac{Z_2 - Z_1}{60 \Delta t} \quad (26)$$

donde:

$$Z_1 = \sum_{i=1}^n \left[k (T_1 - t_i)^a + f_0 (T_1 - t_i) \right] dx_i \quad (27)$$

$$Z_2 = \sum_{i=1}^n \left[k (T_2 - t_i)^a + f_0 (T_2 - t_i) \right] dx_i$$

siendo: Q_{cb} = caudal de recorte (m^3/s).
 T_1 = tiempo al comienzo del intervalo (min).
 T_2 = tiempo al final del intervalo (min).

- t_i = tiempo de avance hasta el punto i (min).
- dx_i = distancia entre dos puntos (m).
- Z_1 = infiltración en todo el surco al comienzo del intervalo (m^3).
- Z_2 = infiltración en todo el surco al final del intervalo (m^3).

El primer recorte se realiza una vez completada la fase de avance. Posteriormente se van dando sucesivos recortes hasta que la reducción del caudal entre recortes es despreciable.

2.3.2.2. Tiempo de corte

El modelo considera que no va a haber déficit en ningún punto de la parcela. Por tanto, calcula el tiempo de corte para que se consiga la lámina requerida en toda la parcela.

3. RESULTADOS

Se compararon los diferentes diseños y manejos obtenidos por diferentes métodos (S.C.S., SIRMOD y MEPI) para un riego realizado en la campaña de riegos de 1995 en un suelo franco y con sorgo como cultivo. Los datos de este riego medidos en campo fueron los siguientes:

Tabla 1. Datos de avance.

Distancia (m)	Tiempo (min)
0	0'0
50	10'5
100	23'0
150	35'0
200	50'0

Tabla 2. Datos de diseño.

Q_0 (l/s)	1'500
f_0 ($m^3/m/min$)	$12 \cdot 10^{-4}$
Z_r (m)	0'030
I_0 (m/m)	0'003
S (m)	0'750
n	0'040

Tabla 3. Datos de la geometría del surco.

σ_1	1'0409
σ_2	1'6383
γ_1	2'0573
γ_2	0'6618
ρ_1	0'3910
ρ_2	2'7950

Este riego se realizó en campo utilizando el modelo MEPI para poder hacer, de este modo, un manejo en tiempo real del mismo. Aplicando este modelo se obtuvieron los siguientes parámetros de infiltración:

$$k = 0'00745 \text{ m}^3/\text{m}/\text{min}^a$$

$$a = 0'1418$$

Con estos parámetros de infiltración obtenidos con el modelo MEPI para este ensayo de campo, se realizó el diseño con los criterios del S.C.S. y una simulación con el modelo de onda cinemática del programa SIRMOD. La familia de infiltración correspondiente a los datos de infiltración, obtenidos por el modelo MEPI, según el S.C.S. es $I_F = 0'8$. En la siguiente tabla se comparan los parámetros de calidad del riego según manejo realizado por los tres modelos:

Tabla 4. Parámetros de calidad.

	S.C.S.	SIRMOD	MEPI
R_a (%)	53'00	58'50	63'62
C_e (%)	26'90	28'21	29'54
C_p (%)	20'12	13'28	6'84

donde: R_a = rendimiento de aplicación.
 C_e = coeficiente de pérdidas de escorrentía.
 C_p = coeficiente de pérdidas de percolación profunda.

La alta escorrentía alcanzada en el MEPI se debe a que la infiltración se ha calculado como variable. De esta forma la escorrentía es mayor y la infiltración es menor que la calculada con otros procedimientos.

Hay que reseñar que en el manejo del riego con el modelo MEPI se realizaron 3 recortes de caudal, mientras que con los otros dos métodos se dio un recorte solamente. En la figura 4 se representan las curvas de avance y receso simuladas por los tres métodos en comparación con las medidas en campo. Como puede observarse el avance es algo más lento para el S.C.S. y el SIRMOD, debido a que ambos consideran una infiltración constante para todo el surco, con lo cual sobreestiman ésta y el avance es más lento que el observado y el simulado con MEPI. Por este motivo los tiempos de receso simulados con SIRMOD y con S.C.S. son inferiores a los reales y simulados con MEPI. En la figura 5 se representan los hidrogramas de escorrentía simulados por los modelos SIRMOD y MEPI en comparación con el medido en campo. Existe una enorme coincidencia entre la escorrentía simulada por MEPI y la producida en campo, sin duda debido a la efectividad en el manejo de dicho modelo. También existe una enorme coincidencia con los datos simulados por SIRMOD, si bien, en este modelo tan solo es posible aplicar un recorte.

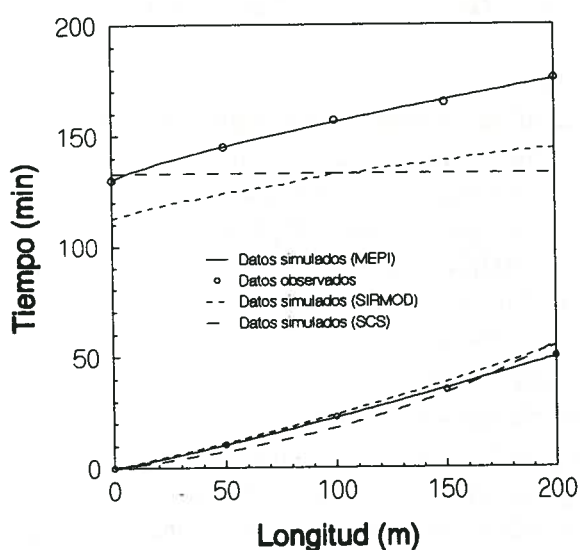


FIGURA 4. Curvas de avance y receso.

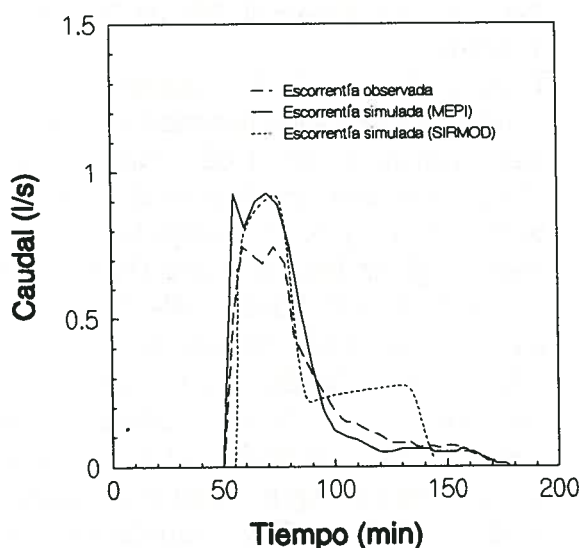


FIGURA 5. Comparación de hidrogramas de escorrentía.

4. CONCLUSIONES

La consideración del carácter variable de la infiltración explica en mejor medida lo que ocurre en campo. Esto unido a un sistema de decisión que maneje durante el mismo acontecimiento el riego, permite conseguir altos rendimientos de aplicación en campo.

Dicho manejo es aún más importante en condiciones como las de este riego, es decir, último riego de la campaña con un avance casi lineal debido a una reducida infiltración achacable a la suela de labor producida.

El modelo MEPI permite manejar de forma fácil y simple el riego, con muy pocos datos conseguimos unos altos rendimientos de aplicación, que no serían posibles con otros diseños.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Blair, A.W. y E.T. Smerdon. 1988. Infiltration from irrigation advance data. II: Experimental. ASCE, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(IR1):18-30.
- Camacho, E.; J. Roldán; M. Alcaide y J. Reza. 1993a. Parámetros de infiltración obtenidos de la curva de avance. *XI Jornadas Técnicas sobre Riegos*, pp. 19-25, Valladolid.
- Elliott, R.L.; W.R. Walker y G.V. Skogerboe. 1982. Zero-inertia modeling of furrow irrigation advance. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(IR3): 179-195.
- Losada, A. 1992. *El riego. Fundamentos Hidrológicos. Métodos de Aplicación*. E.T.S.I.A., Universidad Politécnica de Madrid.
- Nelder, J.A. y R. Mead. 1965. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, Vol 7, No.4, 308-313.
- Pérez, C.J. 1995. *Control del Riego por Surcos en Tiempo Real*. Trabajo fin de carrera, Universidad de Córdoba.
- Pérez, C.J.; E. Camacho, J. Roldán, M. Alcaide, I. Llanos y F. Casares. 1995. Manejo del riego por surcos en tiempo real. *XIII Jornadas Técnicas sobre Riegos*, pp. 388-398, Tenerife.
- Reddell, D.L. y H.F. Latortue. 1986. Evaluation of furrow surface storage and the Kostiaikov infiltration parameters using irrigation advance data. *ASAE Paper No. 86-2874*.
- Saint-Venant B. de. 1.887. Note a joindre an Memorie sur la dynamique des fluides. *Comptes Rendus des Seances de L'Académie des Sciences*, Vol. 17, 1843.
- Strelkoff, T. y N.D. Katopodes. 1977. Border irrigation hydraulics with zero-inertia. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(IR3):325-342.
- Strelkoff, T. y F. Souza. 1984. Modeling effect of depth on furrow infiltration. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, 110(4):375-387.
- USDA. 1974. Border and Furrow Irrigation. *Chapters 4 and 5, Section 15 (Irrigation), Soil Conservation Service National Engineering Handbook*, Washington.
- USU. 1989. *SIRMOD. User's Guide*. Irrigation Software Engineering Division, Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan.
- Walker, W.R. y G.V. Skogerboe. 1987. *Surface Irrigation. Theory and Practise*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 386 págs.

MODELO MULTICRITERIO DE AYUDA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA OPTIMIZACIÓN DEL MANEJO DEL RIEGO POR ASPERSIÓN

Valiente M.(P), Tarjuelo J.M. y De Juan J.A.¹

1 RESUMEN

Es indudable que el agua es un bien indispensable para el desarrollo socioeconómico de las regiones de cualquier país del mundo, y que lo es todavía más en aquellas en las que es especialmente escasa y existe una gran demanda de la misma para sus diferentes usos.

Se ha desarrollado un modelo para determinar las estrategias óptimas de riego durante una campaña. Para mostrar el uso del modelo, se ha aplicado a un ejemplo de una explotación agrícola, analizando los resultados y deduciendo algunas recomendaciones de actuación. Dada la variabilidad climática anual, el procedimiento propuesto permite orientar al agricultor sobre la alternativa de cultivos que maximiza su beneficio económico en función de sus disponibilidades de agua, del CU de su sistema de riego y del precio a que le resulta el agua colocada en el suelo a disposición del cultivo.

2 INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS

El objetivo principal de este artículo es elaborar un modelo multicriterio de ayuda para la toma de decisiones, con una estructura horizontal, que incluya los diferentes aspectos agronómicos, técnicos y económicos del manejo y la programación de riegos. Dicho modelo será capaz de:

- A. Determinar las necesidades hídricas de los cultivos (ET) y las necesidades netas de riego (IR_N), utilizando el método del balance hídrico, en base a datos climatológicos, edafológicos y de cultivo.
- B. Cuantificar el efecto de la uniformidad del riego sobre el rendimiento de los cultivos.
- C. Determinar la lámina de agua con la que se obtiene el máximo rendimiento económico para un cultivo en unas condiciones determinadas y, por lo tanto, con la que se optimiza el riego desde un punto de vista económico.
- D. Incluir los efectos de la PAC sobre el plan de producción de la explotación.
- E. Determinar el plan de producción óptimo (alternativa de cultivos, input y output) que maximiza el rendimiento económico de la explotación, teniendo en cuenta la variabilidad de una serie climática amplia.
- F. Realizar un análisis de sensibilidad sobre las variables que intervienen en el modelo.
- G. Determinar el plan de producción óptimo cuando en la explotación se tienen restricciones de algún input, en especial del agua.
- H. Evaluar planes de producción alternativos propuestos por los agricultores, técnicos y gerentes de explotaciones agrarias, asesorando a los mismos en la toma de decisiones.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

Se ha desarrollado un modelo que consta a su vez de tres módulos interconexiónados, de forma que su ejecución es secuencial.

- I. **Módulo para determinar la evapotranspiración de los cultivos y las necesidades netas de riego** en función de datos de tipo: climatológico, edafológico y de cultivo. Se emplea el método del balance hídrico en el suelo (Doorenbos y Kassam, 1979).
- II. **Módulo para determinar la lámina de agua aplicada que optimiza el riego desde un punto de vista económico.** Se utiliza un modelo semejante al manejado por Orgaz (1992) y Mantovani

¹ E.T.S.I. Agrónomos. Dpto. Producción Vegetal y Tecnología Agraria. Campus Universitario s/n. 02071 - Albacete.
Universidad de Castilla - la Mancha

(1993), que contempla el efecto de la uniformidad sobre el rendimiento de los cultivos. En resumen, dicho modelo necesita como datos de partida:

- a) Conocer la función de producción del cultivo con respecto al agua, tomándose la relación dada por Stewart (Stewart et al., 1977).
- b) Conocer la función de distribución real del agua con sistemas de riego por aspersión.
- c) Datos económicos de forma que, asignando precios a la producción, a los costes y al agua, se pueda determinar cuál es la lámina de agua aplicada que optimiza el riego desde un punto de vista económico.

III. Módulo para determinar el plan de producción óptimo (alternativa de cultivo, superficies, etc.) que maximiza el rendimiento económico de una explotación, teniendo en cuenta la variabilidad de una serie climática amplia, las disposiciones de la PAC y la disponibilidad de recursos, especialmente el agua. Se desarrolla un modelo basado en Target Motad (Tauer, 1983), que mediante técnicas de programación lineal permita determinar el plan de producción óptimo para las hipótesis de partida consideradas.

3.1 ANÁLISIS DEL MODELO TARGET-MOTAD

Este método permite comparar la utilización de diferentes alternativas tecnológicas AT_c (instalación de riego con diferentes valores de CU, precios de agua) para conseguir un objetivo común (obtener el plan de producción óptimo sujeto a una serie de restricciones), cuantificando económicamente el riesgo asociado a cada una de ellas debido a la variabilidad climática (Prevatt et al., 1992).

El gran número de factores que entran en juego y la complejidad de las relaciones existentes entre ellos, obligan a realizar un planteamiento global, que contemple conjuntamente los diferentes elementos y sus interrelaciones.

Target-Motad proporciona un procedimiento para que el agricultor pueda evaluar y comparar soluciones alternativas bajo distintos supuestos de disponibilidades de agua y otros recursos, en diferentes escenarios climáticos, con el objetivo de definir el plan de producción que le proporcione el máximo beneficio económico, para la campaña agrícola venidera.

Tauer (1983) define el método de Target-Motad con dos variables fundamentales: el riesgo y el rendimiento económico, de forma que para obtener la solución (plan de producción óptimo), el problema se reduce a maximizar y minimizar respectivamente dos funciones objetivo sujetas a una serie de restricciones. La expresión matemática del modelo es la siguiente:

- I. Maximizar el rendimiento económico esperado (MB) de la explotación agrícola, para cada año de la serie climática, sometida a las restricciones correspondientes, determinando la superficie que debe haber de cada actividad (cultivo). Así se tendrán tantos planes de producción (rotaciones de cultivo) como años de la serie climática.

$$MB = \sum_{j=1}^n MB_{opt,j} x_j \quad (1)$$

- II. Minimizar el riesgo esperado (PAD-). Esta función objetivo proporciona un único plan de producción de acuerdo con la variación climática intrínseca a la serie de años elegida.

$$PAD- = \sum_{r=1}^s n_r w_r \quad (2)$$

respecto a:

$$\sum_{j=1}^n MB_{opt,j,r} x_j + n_r - p_r = T \quad r = 1, \dots, s \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n IRb_{opt,j,r} x_j \leq SIW \quad r = 1, \dots, s \quad (4)$$

$$0 \leq x_j \leq \lambda_j IA \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j \leq IA \quad (6)$$

$$SIW > 0; \quad x_j > 0; \quad p_r > 0; \quad n_r > 0 \quad (7)$$

donde:

MB: rendimiento económico esperado del plan de producción o solución (pta) en un año concreto de la serie climática

PAD-: riesgo medio esperado del plan de producción (pta), si se estableciera durante los años de la serie climática

MB_{opt,j}: rendimiento óptimo esperado de la actividad "j" (pta*ha⁻¹) en un año concreto de la serie climática

x_j: superficie de cultivo dedicada a la actividad "j" (ha) en un año concreto de la serie climática

MB_{opt,j,r}: rendimiento óptimo esperado de la actividad "j" para cada año "r" de la serie climática considerada

T: objetivo de rendimiento a partir del cual se miden las desviaciones absolutas negativas (determinado endógenamente)

n_r: desviación absoluta negativa respecto al objetivo T para el año "r" (observación)

w_r: probabilidad de ocurrencia de cada año "r" (observación)

p_r: desviación absoluta positiva respecto al objetivo T para el año "r" (observación)

s: número de años de la serie climática considerada (nº de observaciones)

n: Número de actividades productivas contempladas en la explotación agrícola

IRb_{opt,j,r}: lámina de agua óptima correspondiente a la actividad "j" para el año "r"

SIW: agua total de riego disponible

λ_j: coeficiente de participación del cultivo "j" en la superficie de la explotación agrícola impuesto por exigencias de la PAC y/o condicionantes de otra naturaleza

IA: perímetro total regable de la explotación agrícola

La ecuación nº 1 maximiza el rendimiento esperado para el plan de producción o solución.

La ecuación nº 2 minimiza el riesgo medio esperado para el plan de producción o solución. La ecuación nº 3 mide la ganancia (p_r) o la pérdida (n_r) del plan de producción, con respecto al objetivo de rendimiento (T), bajo el estado de la naturaleza (r). Si la ganancia es menor que el objetivo de rendimiento (T), la diferencia es transferida a la ecuación nº 2 a través de la variable (n_r). La ecuación nº 2 es la suma de las desviaciones absolutas negativas después de ponderarlas por su probabilidad de ocurrencia (w_r).

En base a estos supuestos, Tauer define:

- El **Rendimiento económico (MB)** como la suma de los rendimientos esperados, de cada una de las actividades, multiplicadas por su nivel individual de participación en la solución final.
- El **Riesgo (PAD-)** de un plan de producción como la suma de las desviaciones absolutas negativas (n_r), con respecto a un objetivo de rendimiento mínimo esperado (T), de los rendimientos económicos obtenidos al aplicar el plan de producción a cada uno de los años (r) de la serie climática, ponderadas por su probabilidad de ocurrencia (w_r).

Previamente, para obtener el conjunto de soluciones eficientes que cumplen estas restricciones, es preciso en primer lugar fijar el objetivo de rendimiento (T), que es un parámetro determinado endógenamente y puede ser establecido por el analista a cualquier nivel, según los objetivos del análisis.

Por ejemplo, el objetivo de rendimiento (T) puede ser el beneficio mínimo que el agricultor espera para la explotación agrícola, de forma que, una vez resuelto el problema de programación lineal y obtenido un plan de producción, al sustituir dicho plan en los diferentes años climatológicos (estados de la naturaleza u observaciones), habrá años en los cuales se sobrepase el objetivo de rendimiento T en una cantidad p_r (desviación absoluta positiva con respecto a T) y habrá otros años en los cuales no se llegue al objetivo de rendimiento (T), quedándose una cantidad n_r (desviación absoluta negativa con respecto a T) por debajo del objetivo de rendimiento T.

Para obtener un conjunto eficiente de soluciones lo más amplio posible, se debe emplear el criterio del MAXIMIN (Berbel, 1990).

El procedimiento para establecer el valor de T tiene dos fases.

1. La primera fase consistirá en aplicar a cada alternativa tecnológica (AT_e) la función objetivo que minimiza el riesgo esperado (PAD-), siendo "e" el número de alternativas consideradas y variando el objetivo de rendimiento económico T_e hasta encontrar una solución (plan de producción) con riesgo cero, o muy próximo a cero.
2. En la segunda fase, de todos los objetivos de rendimiento económico T_{em} obtenidos en la fase anterior, se toma el mayor $T = \text{Max}\{T_{em}\}$.

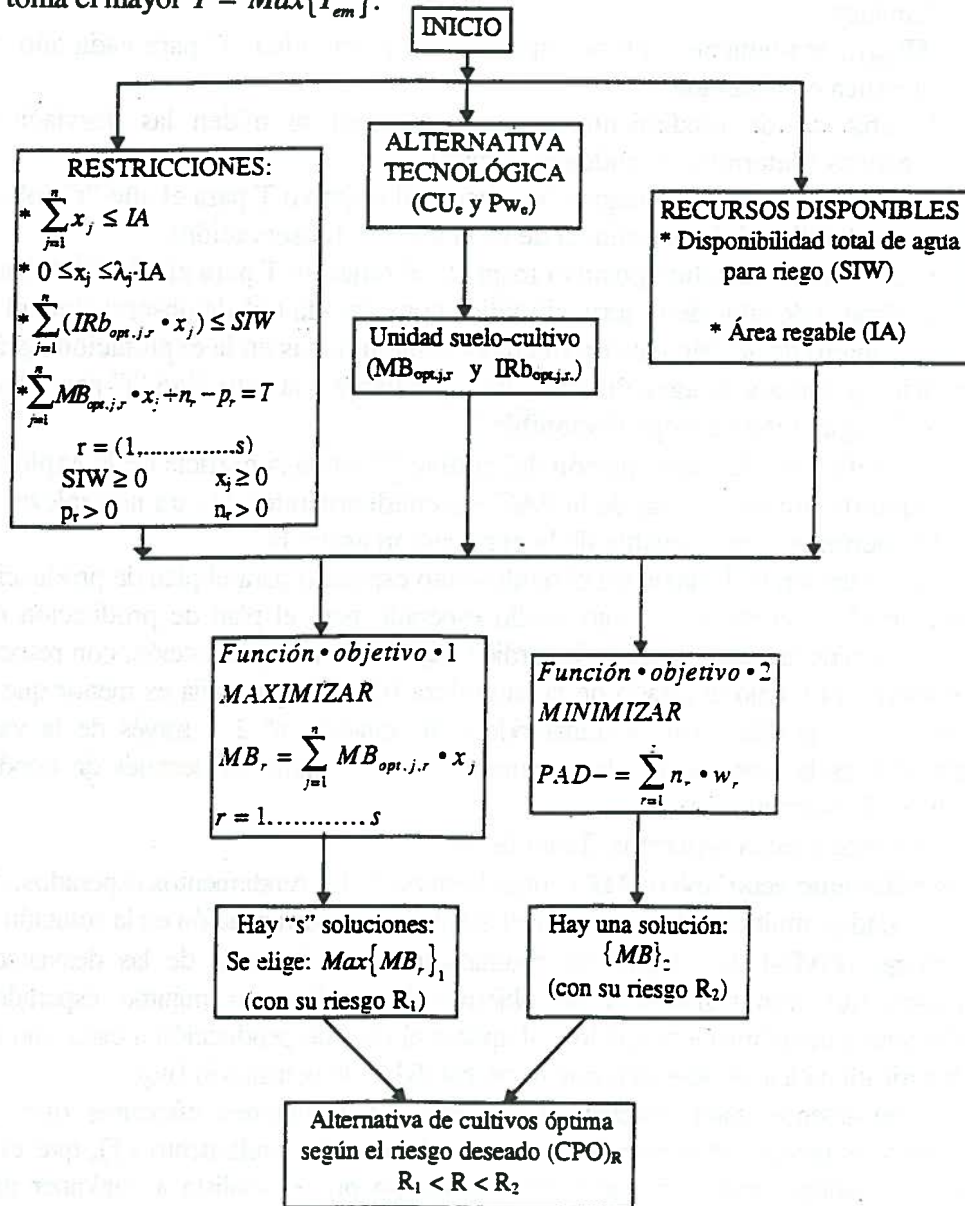


DIAGRAMA DE FLUJO: MÓDULO N° III

Para las diferentes hipótesis de partida se ha aplicado Target-Motad a cada uno de los años individualmente, teniendo en cuenta las restricciones de la serie temporal, de agua y de cultivo.

Como se ha dicho anteriormente, cuando se maximiza el rendimiento económico esperado (MB) se obtienen 5 soluciones, correspondientes a cada uno de los años de la serie temporal, y cuando se minimiza el riesgo esperado (PAD-) se obtiene una solución única.

Para seleccionar una única solución óptima de entre las 5 aportadas con el criterio de maximizar el rendimiento económico se ha optado por elegir la de mayor rendimiento económico, independientemente del riesgo que tenga asociado (R_1). De esta manera se generan dos soluciones para cada alternativa tecnológica (combinación de CU y precio del agua):

- I. Maximizando el rendimiento económico esperado (MB) se obtiene una solución con un riesgo (PAD-)= R_1 : Solución con más riesgo y mayor rango de variación de los rendimientos esperados ($A \leftrightarrow B$). Si el año es favorable climatológicamente (año húmedo), se obtiene el máximo rendimiento posible (B), pero si el año es desfavorable climatológicamente (año seco) se obtiene el mínimo rendimiento posible (A).
- II. Minimizando el riesgo esperado (PAD-) se obtiene una solución con un riesgo (PAD-)= R_2 : Solución más conservadora y con menor rango de variación de los rendimientos esperados ($C \leftrightarrow D$). Si el año es favorable climatológicamente (año húmedo), se obtiene un rendimiento máximo (D), dejando de percibir una cantidad B-D con respecto a la alternativa (PAD-)= R_1 . Si el año es desfavorable climatológicamente (año seco), se obtiene un rendimiento mínimo (C), dejando de perder una cantidad C-A, con respecto a la alternativa (PAD-)= R_1 .
- III. Las posibles soluciones se encuentran dentro de área encerrada por los puntos ABCD. Según el grado de aversión al riesgo del agricultor, variando el nivel de riesgo esperado (PAD-) entre $R_1 < (PAD-) < R_2$, se pueden obtener las diferentes soluciones intermedias.



Figura 1-1: Conjunto eficiente de soluciones posibles

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se aplicará el modelo a un caso particular representativo de La Llanura Norte de Albacete, partiendo de una finca tipo de la zona con una superficie de 300 ha de perímetro regable. La superficie total está dividida en tres polígonos de riego, abastecidos por una bomba de impulsión de 150 CV, que aporta un caudal de $450 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. El sistema de riego por aspersión es una cobertura total enterrada, con aspersores dotados de un caudal de descarga de $2090 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ y pluviometría media de $6,5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, dispuestos en un marco de riego de $18 \text{ m} \times 18 \text{ m}$. El tiempo máximo de riego es de 20 horas al día.

El suelo, de textura franca y franco-arcillo-arenosa, con una profundidad de 1,2 m, tiene una capacidad de retención de $100\text{-}120 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$.

Para analizar los riesgos relacionados con la variabilidad climática y realizar la simulación del modelo propuesto, se ha tomado una serie climática amplia de 20 años (1974-1993), registrada en el observatorio de Los Llanos, próximo a la explotación.

Se manejarán dos CU, uno inicial del 70%, representativo de los sistemas de riego por aspersión que riegan con aspersores de una boquilla y una presión de trabajo de 400 kPa, y otro final del 85%, propio de sistemas de riego por aspersión dotados con aspersores de doble boquilla (4,8 mm +2,4 mm). Se trabajará a una presión nominal de 350 kPa, de forma que se mantenga más o menos constante la pluviometría del sistema, así como los caudales iniciales, no variando los parámetros hidráulicos básicos de diseño de la instalación (\varnothing tubería y equipo de bombeo).

Igualmente, para cada CU se tomarán tres precios de agua: 10, 17 y 25 pta*m³, que representarían las situaciones posibles en la zona, de agua barata, normal y cara.

CU=70% - PA=10 pta*m ³	CU=70% - PA=17 pta*m ³	CU=70% - PA=25 pta*m ³
CU=85% - PA=10 pta*m ³	CU=85% - PA=17 pta*m ³	CU=85% - PA=25 pta*m ³

Tabla 1-1: Coeficientes de uniformidad (CU) y precios del m³ de agua (PA) considerados para elaborar las hipótesis de partida.

En base a las tendencias observadas durante los dos últimos años, se han considerado seis actividades que pueden desarrollar en la explotación : cebada cervecera, guisante proteaginoso, girasol oleaginoso, maíz, remolacha y tierra retirada, cada una de ellas con las correspondientes restricciones impuestas por la PAC (1994).

4.1 DATOS DE ENTRADA²

Los datos necesarios para la utilización del módulo III son los siguientes:

- I. **Márgenes brutos óptimos (MB_{opt})** asociados a cada una de las actividades productivas, y para cada uno de los años de la serie climática escogida e hipótesis consideradas (valores de CU y precios del agua). Se obtienen mediante la aplicación del módulo II.
- II. **Láminas de riego óptimas (IRb_{opt})** que se corresponden con cada uno de los márgenes brutos óptimos del apartado anterior. Igualmente, se obtienen del módulo II.
- III. **Restricciones.** Se refieren a los límites impuestos a las superficie de cultivo, a las disposiciones de la PAC, a la disponibilidad de agua y de otros recursos, etc...
 - A. **Superficie.** Las restricciones de ocupación de superficie de cultivo exigen que las superficies dedicadas a las diferentes actividades productivas no puedan sobrepasar, en ningún momento, la superficie disponible en el perímetro regable (IA) de la explotación agrícola. A esta restricción tan general cabría añadir otras, referidas también a la superficie de cultivos impuestas por la reforma de la PAC o de otra naturaleza.
 1. La **superficie total** de la finca será de 300 ha, para el supuesto práctico a desarrollar.
 2. **Remolacha:** sólo se podrá dedicar al cultivo de remolacha una superficie máxima que no rebase el 15% del perímetro total regable.
 - B. **Las restricciones impuestas por la PAC para el año 1994 son:**
 1. En los **cultivos herbáceos** afectados por la PAC (cebada, maíz, girasol, y guisante), se dedicará a tierra retirada obligatoria el 15% de la superficie total dedicada a dichos cultivos.
 2. **Tierra retirada:** Además del 15% de la superficie de los cultivos herbáceos afectados por la PAC, opcionalmente y de una forma voluntaria, el agricultor puede retirar hasta el 50% del perímetro total regable, obteniendo las mismas ayudas compensatorias que para el 15% obligatorio.

² Para una exposición más amplia de los datos de entrada (INPUTS) de cada módulo, consultar De Juan et al., 1995 y Tarjuelo et al., 1995.

3. **Oleaginosas:** Solamente se podrá dedicar a oleaginosas el 50% de la superficie de la hoja de cultivo dedicada el año anterior.
- IV. **Disponibilidad del agua de riego.** Se aplicará el modelo para las seis hipótesis consideradas en los siguientes supuestos:
- A. **Agua de riego ilimitada** (situación pasada). No existen restricciones de agua y, por lo tanto, en esta situación se obtendrá el máximo rendimiento económico esperado.
 - B. **Agua de riego disponible: 7.000 m³*ha⁻¹** (situación presente). Esta situación representaría aproximadamente la realidad actual.
 - C. **Agua de riego disponible: 5.250 m³*ha⁻¹** (situación a corto plazo). Se hace una restricción del 25% respecto a los 7.000 m³*ha⁻¹ iniciales.
 - D. **Agua de riego disponible. 3.500 m³*ha⁻¹** (posible situación futura). Se hace una restricción del 50% respecto a los 7.000 m³*ha⁻¹ iniciales.

4.2 DATOS DE SALIDA³

Para cada una de los años de la serie e hipótesis consideradas, el modelo da los siguientes resultados:

- I. Plan de producción o solución
- II. Rendimiento económico esperado (MB) del plan de producción
- III. Riesgo medio esperado (DAP-) asociado con dicho plan

Y aplicando cada uno de los planes de producción obtenidos como solución a la serie temporal, se obtiene:

- A. Rendimiento esperado para cada uno de los años de la serie climática.
 1. Máximo del rendimiento esperado en la serie
 2. Media del rendimiento esperado en la serie
 3. Mínimo del rendimiento esperado en la serie
 4. Desviación típica del rendimiento esperado en la serie
- B. Agua de riego utilizada en cada uno de los años de la serie climática.
 1. Máximo del agua de riego utilizada en la serie
 2. Media del agua de riego utilizada en la serie
 3. Mínimo del agua de riego utilizada en la serie
 4. Desviación típica del agua de riego utilizada en la serie

De todos los resultados obtenidos, las consecuencias que se pueden extraer son:

Sin restricciones de agua, el primer cultivo que entra a formar parte de la alternativa es la Remolacha azucarera, ya que es el cultivo que obtiene mayores márgenes brutos de forma que, para evitar que toda la superficie se dedicara a Remolacha, se puso una cuota del 15% del perímetro total regable.

Agotada la superficie de Remolacha, el segundo cultivo que entra a formar parte de la alternativa es el Maíz, que dependiendo de la hipótesis de trabajo coexistirá con el Girasol oleaginoso.

En caso de restricciones importantes de agua (5.250 m³*ha⁻¹), el cultivo por excelencia es el Girasol oleaginoso, siendo sustituido por el Guisante proteaginoso cuando se alcanza la cuota de superficie de Girasol.

En último lugar, el cultivo preferente en el caso de tener restricciones muy severas de agua (3.500 m³*ha⁻¹) es el Guisante proteaginoso, ya que presenta unas IBb_{opt} muy parecidas a las de la cebada, pero por contra, obtiene unos MB_{opt} superiores a la misma.

Esta última conclusión parece contrastar con la realidad ya que, para el año 1.993, la superficie dedicada a cereal (cebada + trigo) fue de 19.600 ha (16% /s.superficie de regadío

³ Para una exposición más amplia de los resultados, consultar Valiente et al., 1995.

provincial), frente a 3.400 ha (2,8% /s.superficie de regadío provincial) dedicadas a Guisante proteaginoso. La razón última parece estar en la estructura de costes que se ha adoptado en la Cebada cervecera, haciendo que quede excluida de los planes de producción óptimos.

De todas formas, creemos que la realidad de la mayor parte de las explotaciones confirma el mayor beneficio económico del guisante proteaginoso, pero todavía perdura la amplia tradición arraigada de cultivo de cebada en muchas explotaciones de la provincia.

4.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD RESPECTO AL OBJETIVO DE RENDIMIENTO

Como ya se anticipó anteriormente, uno de los puntos previos más importantes para aplicar el modelo es determinar el objetivo de rendimiento (T), a partir del cual se van a medir las desviaciones absolutas. Al realizar un análisis de sensibilidad sobre esta variable, considerando el agua de riego disponible ilimitada, se observa que:

Cuando se aumenta el objetivo de rendimiento (T) para todas las hipótesis de trabajo, se produce un incremento positivo del riesgo esperado.

Independientemente del CU, un aumento del precio del agua supone un aumento del riesgo esperado para las hipótesis de trabajo consideradas.

Una mejora del CU del 70% al 85% se traduce en una disminución del riesgo esperado, siendo esta bajada más significativa conforme el precio del agua es más barato.

4.4 RESUMEN DE RESULTADOS

En cuanto a la relación entre rendimiento económico y riesgo puede concluirse que:

A) Cuando no existen limitaciones en la disponibilidad de agua

- Al aumentar el objetivo de rendimiento económico mínimo esperado (T), se produce un aumento del riesgo esperado en todas las situaciones.
- Un aumento del precio del agua produce un aumento del riesgo y una disminución del rendimiento económico, con un mayor rango de variación de éste, aumentando el grado de incertidumbre en cuanto a los ingresos a percibir.
- Al mejorar el CU (pasando de 70% a 85% por ejemplo) se obtienen mejores resultados económicos (mayor rendimiento económico con menor riesgo), aunque normalmente se utilizan mayores cantidades globales de agua de riego.

B) Cuando aparecen limitaciones en las disponibilidades de agua:

- Se produce normalmente una disminución de los rendimientos económicos y un aumento del riesgo esperado. Esto suele ir unido a una disminución del rango de variación del rendimiento económico y, por tanto, del grado de incertidumbre de los ingresos esperados.
- Los primeros cultivos que desaparecen del plan de producción son los que presentan un valor más alto en la relación entre consumo de agua y rendimiento económico. Un ejemplo es el caso del maíz, que pasa a ser sustituido por el girasol, pero no le ocurre a la remolacha por su mayor rendimiento económico por unidad de agua consumida. Cuando la restricción de agua aumenta, desaparecen los cultivos más consumidores de agua, que son sustituidos por cultivos de primavera (como puede ser el guisante), aumentando la tierra de retirada subvencionada por la PAC.

5 CONCLUSIONES

- El modelo desarrollado puede ayudar al regante a evaluar los efectos de la falta de uniformidad del riego en la productividad de los cultivos y a seleccionar las estrategias óptimas de riego (incluso con limitaciones en las disponibilidades de agua), manejando una información reducida y fácilmente disponible en la explotación agrícola.
- Dada la variabilidad climática anual, el procedimiento propuesto permite orientar al agricultor sobre la alternativa de cultivos que maximiza su beneficio económico en función de sus

disponibilidades de agua, del CU de su sistema de riego y del precio a que le resulta el agua colocada en el suelo a disposición del cultivo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- DE JUAN J.A., TARJUELO J.M., VALIENTE M., GARCÍA P., 1995. Model for optimal cropping patterns in the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. Part I: Development of a decision Irrigation management model within the economic context of the new Community Agriculture Policy (PAC). *Agric. Water Mang.* (en revisión).
- TARJUELO J.M., DE JUAN J.A., VALIENTE M., GARCÍA P., 1995. Model for optimal cropping patterns in the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. Part II: A case study of irrigation scheduling in Albacete, Spain. *Agric. Water Mang.* (en revisión).
- BERBEL, J. 1990. A comparison of target MOTAD efficient set and the choice of a target. *Can. J. Agric.Econ.*, 38, 149-58.
- ORGAZ, F. 1992. Relaciones agua-planta. Funciones de producción. Curso sobre "Teoría y práctica del riego". CIDA Alameda del Obispo. Córdoba.
- PAC. (Política Agraria Común). 1994. Campaña 1994 en la provincia de Albacete. ITAP, S.A. . Boletín Monográfico nº18. Albacete.
- PREVATT, J. W., STANLEY, C. D., GILREATH, P. R. and CLARK, G. A. 1992. Return-Risk Analysis of Adopting Drip Irrigation. *ASAE. Applied Engineering in Agriculture Vol. 8, No. 1*, pp. 47-52.
- TAUER, L. M. 1983. Target MOTAD. *Amer. J. Agric. Econ.*, 65, 606-10.
- DOORENBOS J., KASSAM A.H., 1979. Efecto del agua sobre los rendimientos de los cultivos. *Estudios FAO: Riego y drenaje*, nº33. FAO, Roma, Italia.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O., 1974. Las necesidades de agua de los cultivos. *Estudios FAO: Riego y drenaje*, nº24. FAO, Roma, Italia.
- HATFIELD J.L., 1985. Wheat canopy resistance determined by energy balance techniques. *Agron. J.*77:279-283.
- MANTOVANI E.C., 1993. Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de cultivos. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba, España.
- STEWARD J.I., HAGAN R.M., 1973. Functions to predict effects of crop water deficits. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE* 99, 4:421-439.
- VALIENTE M., 1995. Metodología para la evaluación y mejora del reparto de agua con aspersores de tamaño medio en la zona de Albacete. Tesis Docotoral. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S.I. Agrónomos, España.

7 AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento más sentido a la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de la Junta de Comunidades de Castilla - La Mancha por la financiación de este trabajo.

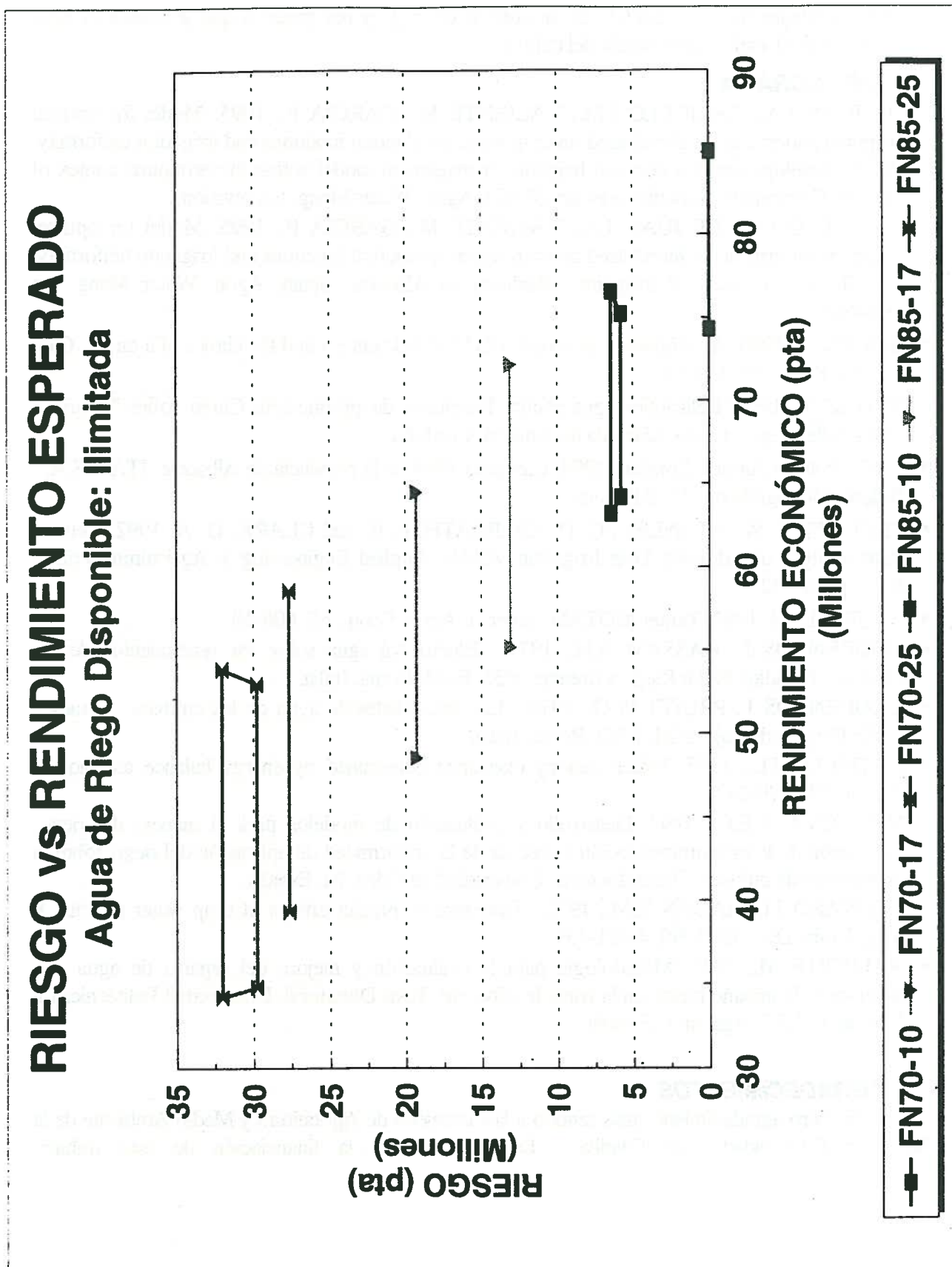


Figura 1-2: Relación entre el riesgo y el rendimiento económico cuando no hay limitaciones en la disponibilidad de agua, para dos CU y tres precios del agua PA

EFICIENCIA DEL RIEGO Y MODERNIZACION DE REGADIOS

L. Mateos¹, E. Fereres^{1,2} (P) y A. Losada³

¹ Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Apdo 4084 Córdoba, ² Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba, ³ Departamento de Ingeniería Rural, Universidad Politécnica de Madrid

Resumen: En el ámbito hidrográfico de una zona regable puede distinguirse entre flujos de agua que se consumen y flujos que retornan al sistema hidrográfico. Los retornos serán pérdidas o no, según el ámbito considerado en la estructura de la cuenca que se quiera analizar. Ello hace que el término eficiencia de riego asociado al de pérdida suponga malentendidos. De ahí que nos adhiramos a la propuesta de sustituir el término de eficiencia por el de fracción consumida, siendo el resto fracción reutilizable. Esto permitirá aclarar tanto el concepto de ahorro de agua de riego como cuáles deben ser las líneas de inversión en la modernización de los regadíos.

Summary: Two major kind of flows may be considered in the hydrologic system of an irrigation district: consumptive flow and return flow. The return flow is a loss or it is not depending on the level of the basin under analysis. Therefore, we support the proposition of using the term fraction instead of efficiency, to prevent misunderstandings derived from the association between efficiency and loss.

Introducción

A raíz de la última sequía, los medios de comunicación y el ciudadano de a pie han empezado a preocuparse por la gestión del agua y a participar en el debate público sobre el tema. Uno de los hechos que más ha llamado la atención, es el elevado consumo de agua de los regadíos, que en España se estima en más del 80% de la que se utiliza para el total de las demandas. Ante este hecho, dentro de las iniciativas propuestas para resolver los problemas del agua en España, aparece la urgente necesidad de modernizar su regadío. Se parte de una premisa, y es que si los regadíos consumen tan alta proporción del agua, un ahorro derivado de la modernización debería liberar grandes cantidades que pueden ser suficientes para abastecer a todos los usuarios en situaciones de escasez. Para evaluar esta posibilidad es necesario manejar conceptos de consumo, utilidad y ahorro del agua, relacionadas con la física del sistema hidrográfico, y que, en general, no son comprendidos por el gran público. Por otra parte, lo inadecuado de algunos términos expresando el concepto al que se refieren, ha llevado a algunos malentendidos de consecuencias importantes.

Sobre esta problemática han llamado la atención Willardson et al. (1994) en Estados Unidos, y estos mismos autores volverán a poner la discusión sobre el tapete del próximo Congreso Internacional de la ICID. Nosotros pretendemos con esta comunicación trasladar a España este debate y aclarar la terminología sobre eficiencia del riego en relación a la modernización de los regadíos.

El ámbito hidrográfico de una zona regable

El concepto de consumo de agua se refiere al gasto irrecuperable producido durante su gestión, y el de ahorro a actuaciones para evitar un consumo excesivo en sistemas hidrográficos cuyo ámbito debe estar bien definido. En el caso de sistemas de riego, el agua atajada en alguna fase de su ciclo natural, es conducida y distribuida a

los tablares y aplicada para satisfacer la evapotranspiración (ET) de sus cultivos. El agua así consumida es irrecuperable, al mismo tiempo que beneficiosa; pero no es posible satisfacer esa utilidad consuntiva sin que parte del agua aportada se malgaste.

Parte del agua destinada a una zona regable escapa de su ámbito hidrográfico sin haber sido aprovechada para el objetivo pretendido, por lo que podría ser considerada como pérdida, o sobrante. Pero, si antes de desaprovecharse, una cantidad fuera recuperada dentro del ámbito propio del sistema, se obtendría un ahorro interno. Evidentemente, si el agua recuperada se destina a un sistema exterior, el consiguiente retorno deberá ser referido al conjunto de los sistemas ahora considerados, que constituyen un sistema hidrográfico de orden superior. Consecuentemente, en este nuevo marco desaparecería la condición de pérdida que le hubiera sido aplicada en el otro ámbito más reducido.

El suministro de agua a la mayor parte de las zonas regables de España se produce desde un canal que parte de un embalse o una presa de derivación. Los campos de riego se sitúan normalmente a cotas inferiores a la del canal, en la vega de los ríos. La cantidad de agua distribuida desde el canal debe ser siempre superior a la necesaria para satisfacer el consumo acordado del cultivo, ya que durante el transporte parte del agua se evapora y otra parte se fuga por fisuras de la red de distribución, o se infiltra en sus paramentos porosos, pudiendo filtrarse hacia acuíferos o ser consumida por las malas hierbas que crecen junto a las acequias. Otra parte del agua derivada al canal o acequias se vierte por aliviaderos cuando la demanda instantánea es inferior al suministro. De la cantidad de agua que entra en cada cantero, una fracción quedará en el suelo disponible para el cultivo, y otra fracción escurrirá o se filtrará hacia lechos más profundos como consecuencia de la propia operación del riego.

Del agua que filtra en profundidad, bien por debajo de la zona radical de los cultivos bien después de fugarse de la red de distribución, una fracción importante retorna directamente al río a través de drenes o de flujo subterráneo. Lo mismo ocurre con la escorrentía, que a través de desagües se reincorpora al río. Una vez recuperada en la red fluvial, el agua puede reutilizarse para el riego, la industria, la preservación de espacios naturales, el recreo o el suministro urbano.

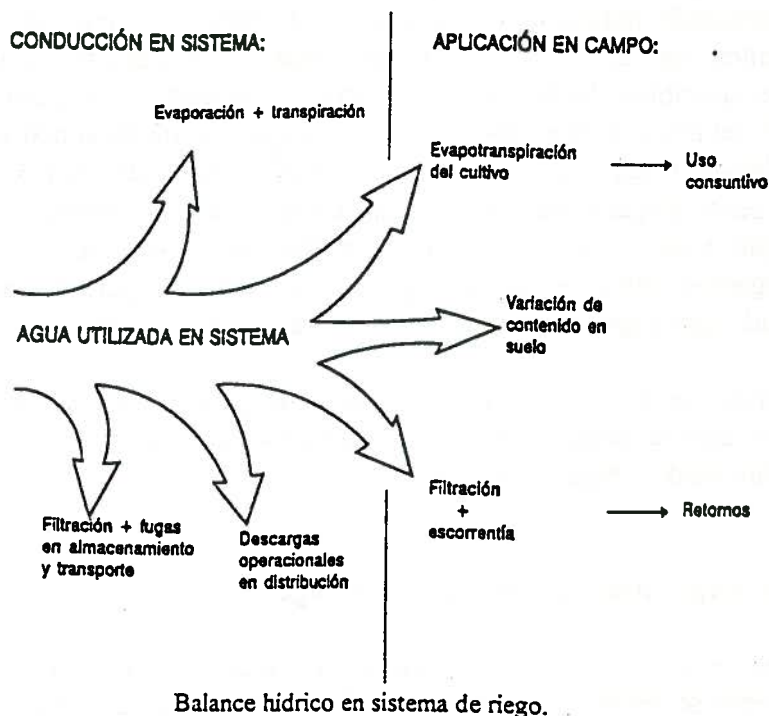
Dependiendo de las condiciones geológicas de la zona, la filtración profunda puede recargar acuíferos superficiales conectados con el río o acuíferos profundos. Tanto unos como otros pueden ser una reserva que utiliza la misma comunidad de regantes o regantes vecinos. Si la zona saturada está muy profunda, el agua filtrada puede no ser económicamente recuperable para el sistema hidrográfico considerado (un cantero por ejemplo), aunque pueda ser recuperada por otro sistema de orden superior (la finca donde se encuentra el cantero, o el regadío donde se encuentra la finca, o la cuenca donde se encuentra la zona regada). También puede ser irrecuperable, e incluso producir un impacto ambiental negativo, y será una pérdida si el agua del acuífero subyacente es de mala calidad y no es utilizable.

Los flujos que retornan al río o a los acuíferos subterráneos tienen una disponibilidad con desfases temporales variados. Los rebosamientos de alivio de las acequias y la escorrentía de cola de los tablares vuelven al río en cuestión de horas o pocos días, mientras que el flujo subterráneo es más lento, por lo que la disponibilidad

del filtrado a acuíferos profundos puede retrasarse meses. En cualquier caso, con el desfase correspondiente, los flujos de retorno pueden suponer parte o todo el suministro de aguas abajo.

En resumen, en el ámbito hidrográfico de un regadío hay agua consumida por el cultivo que se traduce en beneficio, hay agua perdida al evaporarse o al consumirla especies indeseadas, y hay agua que escapa como filtración, fugas, descargas y escorrentía, para la que el calificativo de pérdida sólo puede ser relativo, ya que es pérdida o no dependiendo del ámbito espacial o temporal que estemos considerando.

La concreción en la práctica de las ideas generales que anteceden sobre el flujo del agua en sistemas de riego se fundamenta en la aplicación de técnicas de balance hídrico. El esquema de la figura adjunta sugiere procedimientos que se basan en cuantificar los diferentes sumandos que lo integran, con el fin de proporcionar una información objetiva sobre el potencial de técnicas de ahorro de agua.



Utilidad del agua y ámbitos estructurales

Se ha visto que sólo una fracción del agua usada para riego es consumida y, por tanto, no es recuperable: en parte es útil, para la evapotranspiración de los cultivos, y en parte es perdida, bien por evaporación desde el propio sistema de riego considerado bien por transpiración de plantas sin interés productivo. Otra fracción, que puede representar un orden de magnitud comparable a las anteriores, escapa, superficialmente o a través de acuíferos, del control a que pudo estar sometida dentro del sistema durante las operaciones de almacenamiento, transporte, regulación, distribución y aplicación.

El agua que reporta beneficios que pretende el agricultor es la consumida por el cultivo en el proceso de la evapotranspiración. Por tanto, parece claro que todo lo que no sea ET del cultivo es pérdida para el regante. Si el volumen de riego tiene un coste, bien sea por el precio del agua o por los gastos de bombeo, el regante procurará disminuir la filtración, la escorrentía y las fugas del sistema de distribución dentro del cantero. Ya no resulta tan claro que una parte del agua que se filtra cumpla alguna otra función beneficiosa, y éste puede ser el caso de un lavado de exceso de sales.

La comunidad de regantes no compartirá totalmente los intereses de cada regante individual. Si parte del suministro de la zona regable proviene de aguas subterráneas, la filtración en parcela, que es pérdida para el propietario de esa parcela, puede aún ser útil para el conjunto de la comunidad, si es oportunamente recuperada. Lo mismo ocurre si la escorrentía o agua de cola se recoge para utilizarla en otro sector aguas abajo.

Esta falta de coincidencia (que no confrontación) entre intereses de regantes como individuos y regantes como comunidad, ocurre también entre cada comunidad de regantes y el conjunto de usuarios en una cuenca, a cuya Confederación Hidrográfica corresponde defender los intereses colectivos. En cuanto a que los retornos procedentes de un conjunto de sistemas hidrográficos simples son potencialmente recuperables dentro de un sistema hidrográfico complejo que los integra, la utilidad del agua en éste puede superar a la que resulta de sumar la de cada una de sus unidades de orden inferior. Pero así, los flujos retornados al río desde una zona regable son pérdidas para esa zona, ya que no benefician la producción de sus cultivos, y, aunque vuelven al sistema hidrográfico de donde se derivaron, la comunidad de regantes habrá tenido que poner los recursos para manejarlos y, además, habrá tenido que pagar el volumen utilizado, aunque no gastado.

De lo anterior se desprende que el concepto de pérdida es también relativo: depende de que el ámbito organizativo de la estructura en que nos movamos sea cantero, finca, comunidad de regantes o cuenca.

Terminología y concepto físico de eficiencia del riego

La descripción y consideraciones anteriores sobre el ciclo hidrológico son evidentes para quienes se relacionan con el riego. Sin embargo, la terminología que se usa para definir los procesos considerados no es acorde con la física de los mismos ni, en particular, con el marco físico del sistema hidrográfico, y esto ha tenido implicaciones en la interpretación del buen o mal uso del agua de riego y podría tener a la larga influencia en la política de inversiones públicas para la modernización de regadíos.

El origen del concepto de eficiencia puede buscarse en la forma en que se cuantificaba el agua necesaria para regar una determinada superficie. El reparto del agua comenzó a basarse en el principio de proporcionalidad en el levante español de la Edad Media, cuando correspondía a cada agricultor un número de "hilas" función de la superficie de su campo (Gil Ocina, 1985). La unidad hila no se corresponde con un volumen fijo porque sirve simplemente para repartir el agua disponible. Pronto los

tratados de agricultura reconocerían que los arenales requieren regarse con más frecuencia que lo que ahora conocemos como suelos pesados (Abu Zaccaria, siglo XII), que es admitir implícitamente que el drenaje en suelos de textura gruesa es mayor (y la eficiencia es menor) que en suelos pesados y que, por lo tanto, los riegos deben ser menos cuantiosos y más frecuentes.

Siglos después, Israelsen (1932) introdujo el término *efficiency* con la acepción actual de eficiencia de aplicación, al definirlo como el cociente entre el agua consumida por el cultivo y la aplicada al cantero.

Hasta aquí, el término eficiencia tenía un carácter productivista, pero con el desarrollo de nuevos sistemas de aplicación de agua, los ingenieros empezaron a utilizar el concepto como eficiencia técnica, entendiendo que las operaciones de transporte y distribución del agua son técnicamente eficientes si el agua aplicada a la parcela es una fracción importante de la derivada con ese propósito (Losada, 1994). Desde este punto de vista, la definición de eficiencia es el cociente entre salidas del sistema y entradas al sistema (de agua, en este caso), siendo la diferencia entre lo que entra y lo que sale las pérdidas del sistema. Por eso hay quien prefiere usar en castellano el término rendimiento (Losada, 1994) que es el que se utiliza al hablar de lo mismo (aunque referido a energía) cuando se trata de máquinas, en las que las pérdidas corresponden a la energía disipada en forma de calor.

Igual que ya se ha advertido de las conclusiones erróneas a las que puede llegarse trasladando a la agronomía el Coeficiente de Uniformidad del Riego utilizado en ingeniería (Mateos, 1995), ahora queremos advertir de los efectos del mal uso del concepto de eficiencia. Es en ingeniería del riego donde más clara aparece la idea de pérdida asociada al concepto de eficiencia y, precisamente, el traslado de esta asociación a la hidrología y gestión del agua ha acarreado desacuerdo entre terminología y concepto físico de eficiencia del riego cuando se encuadra en el ciclo hidrológico, donde es erróneo calificar sistemáticamente como pérdida al agua no evaporada. En este marco, tratar de paliar la escasez de agua aumentando la eficiencia de los sistemas de transporte, de distribución y de aplicación del agua de riego (Saura, 1995) podría ser un camino equivocado y, en todo caso, no el único ni el económicamente más adecuado.

Hay algunos sistemas hidrográficos o porciones de los mismos en las que cerca del 100% del agua se utiliza productivamente. En estos casos, la reutilización obviamente no puede aumentarse y la mejora de la eficiencia de la distribución y aplicación del agua de riego no liberará recursos para otros usos. Pensemos, por ejemplo, en importantes zonas regables del Alto Guadalquivir, como son las denominadas Vegas Altas, Medias y Bajas del Guadalquivir, El Rumblar o el Guadalquivir, muchas de las cuales tienen al menos 30 años. Estos regadíos han sufrido con frecuencia la acusación de ineficientes y de culpables de los recortes de agua en ciudades más bajas en el valle. Sin embargo, con toda seguridad, gran parte de las "pérdidas" de esas zonas regables (y un problema es que desconocemos con precisión cómo de grande es esa parte), retornaron al Guadalquivir para derivarse desde la Presa de Peñafior por el Canal del Bajo Guadalquivir hacia otras zonas regables o para el suministro urbano de ciudades del valle. Otra parte de las "pérdidas" consecuencia de la "ineficiencia" de años pasados, quedaron almacenadas

en reservas subterráneas que los agricultores bombearon durante la sequía, pudiendo no sólo producir cultivos, algunos de los cuales abastecieron la demanda de frutas y verduras de la zona, sino evitar la pérdida total de plantaciones de frutales y cítricos y defender la estabilidad de la producción agrícola del valle.

Por último, y por referirnos al uso de retornos en sistemas naturales, la baja eficiencia de algunos sectores de riego del Campo de Dalías, ha originado lagunas donde se han establecido comunidades de aves silvestres. Igualmente, los retornos son los que permiten mantener un mínimo de caudal estival en ríos del sur de la península, caudales que, de no mantenerse por este camino, habría que mantenerlos soltando agua embalsada.

En todos estos casos, el uso del término eficiencia del riego ha causado desacuerdo entre la base física del sistema hidrográfico y la percepción pública y política de la gestión del agua de riego. Esto ha culminado en un plan multimillonario para modernizar los regadíos con el objetivo de aumentar la disponibilidad de agua (OM del MAPA, BOE de 19/3/1996), objetivo que no necesariamente habría de alcanzarse con las acciones propuestas en el plan.

Fracciones en lugar de eficiencias

Para deshacer malentendidos derivados del uso del término eficiencia, Willardson et al. (1994) han propuesto una nueva terminología que resumimos a continuación. En primer lugar estos autores defienden la universalidad de los términos, sea cual sea el uso que se da al agua. Por ello proponen el concepto de fracción, en lugar del de eficiencia, para describir la proporción de agua que se ha utilizado en un proceso determinado. En el caso del riego, el término "Fracción Consumida" (FC) debe sustituir al de eficiencia. El mismo criterio puede extenderse al uso urbano, industrial o ambiental. La fracción de agua que no se consume en la operación del riego fluye subterránea o superficialmente y en la mayoría de los casos volverá a ser utilizable. A la proporción que retorna se la denomina "Fracción Reutilizable" (FR). La cantidad de agua consumida, V_{CON} (que dividida por la cantidad de agua utilizada, V_{UT} , resulta en FC), es la suma de lo evapotranspirado por el cultivo (V_{ET}), lo exportado (V_{EX}) y lo no recuperable (V_{NR}):

$$FC = \frac{V_{CON}}{V_{UT}} = \frac{V_{ET} + V_{EX} + V_{NR}}{V_{UT}} \quad (1)$$

Lo exportado por el sistema hidrográfico considerado será lo trasvasado fuera del mismo. Lo no recuperable incluye lo evaporado directamente desde los canales y acequias, lo evapotranspirado por las malas hierbas que crecen junto a ellos, lo que se vierte al mar o balsas de evaporación y lo que va cargado de contaminantes químicos, biológicos o sales que lo hacen inutilizable. La Fracción Reutilizable, FR, puede obtenerse como:

$$FR = \frac{V_{UT} - V_{CON}}{V_{UT}} = 1 - FC \quad (2)$$

y la "Fracción No Reutilizable" será:

$$FNR = \frac{V_{NR}}{V_{UT}} \quad (3)$$

que es la proporción de agua que a nadie sirve y de la que muchas veces cuesta deshacerse.

Con las fracciones descritas puede evaluarse cualquier uso del agua siempre que se especifique el ámbito hidrográfico al que nos referimos. No somos por tanto partidarios de extender mucho más la terminología a pesar de que quienes la han propuesto aún definen otras fracciones particulares de alguno de los ámbitos del sistema, y a pesar también de que la dificultad y la necesidad de tratar satisfactoriamente los conceptos cuestionados justifican persistentes intentos en normalizar su terminología y su uso (p.e., Clemmens et al., 1995). En todo caso, al menos en sistemas agrícolas, pensamos que sí puede interesar definir fracciones que cuantifiquen el destino del agua recuperable. Podemos definir la "Fracción Filtrada en profundidad" (FF) y la "Fracción de Escorrentía" (FE) como:

$$FF = \frac{V_F}{V_{UT}} \quad (4)$$

$$FE = \frac{V_E}{V_{UT}} \quad (5)$$

donde V_F y V_E son los volúmenes filtrados y escurridos respectivamente.

En el caso de los regadíos, los ámbitos de uso son cantero, finca, zona regable o cuenca. Así, el valor aceptable de $FC_{parcela}$ es inferior que $FC_{zona\ regable}$, y este inferior a FC_{cuenca} . Por tanto, será más importante invertir en la reducción de FNR que en el aumento de FC o, concretando con un ejemplo, será preferible reducir los retornos en el Bajo Guadalquivir antes que transformar a sistemas de riego a presión los sistemas abiertos (o por gravedad) de zonas regables del valle medio y alto. Otro ejemplo, al margen de consideraciones diferentes a las atendidas más arriba, nos llevaría a concluir que habría sido preferible reutilizar las aguas residuales de Cádiz antes que las de Córdoba. Y en cualquier caso, de lo anterior se desprende la necesidad de cuantificar las fracciones por ámbitos de sistemas hidrográficos, antes de tomar decisiones respecto a inversiones destinadas a modificar estas fracciones.

Consideraciones finales

En la sociedad actual existe la percepción generalizada que la agricultura de riego, al ser el principal consumidor de agua, despilfarra este recurso escaso. A esta percepción ha contribuido la extensión del concepto de eficiencia del riego desde la escala de cantero a las de zona regable o cuenca, donde dicho concepto no tiene el mismo significado físico. Es frecuente oír comentarios, incluso entre técnicos, indicando que riegos tradicionales tienen eficiencias del orden del 50%, lo que

implicaría que es posible regar con la mitad de las dotaciones sin que esta agricultura, o incluso la hidrología de las cuencas donde se enclavan, se viese afectada. Es necesario aclarar, tanto en los sectores técnicos como en la sociedad en general, que la fracción de agua que no es consumida por los regadíos, en la mayoría de las circunstancias es reutilizada al menos en una buena parte, y no debe ser considerada como pérdida a escala de cuenca. Por ello pensamos que es deseable sustituir el concepto de eficiencia de riego por las fracciones definidas en el epígrafe anterior, destacando que sólo la fracción consumida (FC) es la que idealmente debería identificarse a la hora de establecer tarifas por volumen en los regadíos.

Por último pensamos que sólo después de conocer para cada situación las fracciones consumida, reutilizable y no reutilizable, pueden plantearse medidas destinadas a optimizar el uso de los recursos públicos en la modernización de regadíos. Por un lado, las inversiones destinadas a mejorar la ingeniería de los sistemas de distribución y aplicación de agua, no han de redundar necesariamente en un incremento de la disponibilidad de agua neta en la cuenca, sobre todo en aquellos casos donde se reutilice una gran parte de la fracción no consumida. Por otro lado, también es necesario evaluar el impacto ambiental de permitir fracciones reutilizables elevadas, que en todo caso requieren energía para su recuperación y contribuyen a la contaminación difusa. En resumen, no parece razonable que puedan recomendarse inversiones específicas en los regadíos sin que antes se cuantifiquen con la mayor precisión posible, las fracciones definidas en esta comunicación.

Bibliografía

Abu Zacaria. Siglo XII. Libro de Agricultura. Traducido por Josef Antonio Baquerí, 1802, Imprenta Real, Madrid.

Clemmens, A.J., T.S. Strelkoff, C.M. Burt. 1995. Defining efficiency and uniformity: Problems and perspectives. *Water Resources Engineering ASCE*, 2:1521-1525.

Gil Ocina, A. 1985. La propiedad del agua en los grandes regadíos deficitarios del sureste peninsular: el ejemplo del Guadalentín. *Agricultura y Sociedad*, 35:207-225.

Israelsen, O.W. 1932. *Irrigation principles and practices*. John Wiley and Sons, New York. 418 pp.

Losada, A. 1994. Eficiencia técnica en la utilización del agua de riego. *Agricultura y Sociedad*, 167:131-154.

Mateos, L. 1995. Estimación de la uniformidad efectiva mediante un modelo de solape de aspersores. XIII Jornadas Técnicas de Riegos. Puerto de la Cruz, Tenerife. p 44-53.

Saura, J. 1995. La modernización de los regadíos. *El Campo*, 132:185-200.

Willardson, L.S., R.G. Allen y H.D. Frederiksen. 1994. Elimination of irrigation efficiencies. 13 Tech. Conf. USCID. Denver, CO. p 17.

PRESENTACIÓN EN CARTEL

COMPUERTA SEMIAUTOMATICA PARA RIEGO SUPERFICIAL

R. Pastor¹, J. Monserrat¹, J.R. Rosell¹, J. Barragán¹, Ll. Cots¹

Resumen: Se presenta un prototipo de compuerta para la operación del riego por tablares, que permite automatizar las acciones de apertura y cierre de una serie de compuertas durante un riego. El sistema se ha probado en laboratorio funcionando satisfactoriamente, así mismo un estudio comparativo de costes muestra que es económicamente viable.

Summary: This paper presents a prototype of gate, for border irrigation. It automatize the opening and closing of a series of gates during an irrigation event. The system was tested in laboratory and works fine, furthermore an economic analysis show thats is feasible.

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

El riego superficial en condiciones de buena nivelación, parcelas regulares, suelos profundos, y con un adecuado manejo, puede conseguir buenos resultados de riego. Como ventajas respecto a otros métodos de riego tiene su bajo consumo energético y la baja inversión y mantenimiento. Las principales limitaciones son la dificultad de regular la dosis aplicada y el coste de la mano de obra.

El objeto del presente trabajo son las explotaciones fruteras de la zona de Lleida en las cuales la mano de obra dedicada al riego oscila entre 35 y 70 h/ha/año.

El antecedente más directo de este trabajo es el artículo publicado por A.S. Humpherys (1995a), en el que desarrolla una compuerta de mariposa, sobre esa idea inicial se han cambiado algunos mecanismos y se ha adaptado a las condiciones de Lleida.

El objetivo que se persigue es automatizar la secuencia de apertura y cierre de tajaderas dentro de una parcela de riego por tablares. Dicha automatización puede además repercutir en una mejora del manejo y control del riego.

MATERIAL Y METODOS

El sistema consta de una compuerta, un sensor, y un controlador que opera el sistema.

Compuerta.

Consta de dos elementos principales: un marco para anclarla en las paredes de la arqueta de salida, sobre el cual se colocan las juntas de estanqueidad y el soporte del eje de giro en su parte superior. El otro elemento es una plancha rectangular solidaria con un eje que pivota sobre el citado soporte.

¹ E.T.S. Ingeniería Agraria, Universidad de Lleida.

La compuerta en su posición inicial (fotos 1 y 2) debe ser cerrada manualmente antes de empezar el riego. El empuje del agua lo resiste gracias al pestillo que fija la palanca solidaria con el eje (foto 2).

Este pestillo puede ser accionado por la bobina 1, que libera la palanca. La compuerta abre gracias al empuje del agua y al contrapeso de la parte superior (foto 6).

Este movimiento se detiene en posición horizontal debido al eje de la bobina 2 (foto 3). En esta posición el agua entra dentro del tablar de riego.

Cuando el agua llega al final del tablar, el sensor situado en esta posición envía una señal para que se abra la siguiente compuerta y cierre la actual.

Para cerrar la compuerta se excita la bobina 2 y gracias al contrapeso empieza a girar. Más tarde el empuje del agua sobre la cara posterior de la plancha hace que esta cierre (foto 4).

Esta secuencia se puede repetir sucesivamente hasta acabar de regar toda la parcela. El sensor de llegada del agua se puede sustituir por un temporizador pero en este caso el sistema no está retroalimentado y no detectaría la variación de cualquiera de las variables que influyen sobre el riego.

Una vez finalizado el riego, las compuertas deben retornarse a su posición inicial manualmente.

Sensor

Tiene la misión de detectar la llegada del agua y emitir una pulsación eléctrica al controlador. Tiene una construcción compacta, resistente, y de bajo consumo (Humpherys,1995b).

Controlador.

Su función es enviar una señal eléctrica que haga activar los solenoides. Su esquema se puede observar en la figura 1. Su funcionamiento es el siguiente, inicialmente el TR1 se encuentra cerrado, en el momento que el agua llega al sensor, este envía una señal eléctrica al controlador que entra por SCR hacia el circuito integrado PSN74121, este circuito le da las características eléctricas correctas para abrir el transistor TR1, de forma que la corriente eléctrica va hacia los solenoides accionándolos un cierto tiempo en función de la capacidad del condensador C1. El circuito está alimentado por dos baterías de 12 V y 1.9 Ah conectadas en serie. Los solenoides son de 24 V. y 2.2 A.

RESULTADOS Y DISCUSION

Hasta el momento solo se ha probado en condiciones de laboratorio, habiéndose observado lo siguiente :

- El tipo de mecanismo de cierre en la posición inicial, requiere unos esfuerzos no despreciables de la estructura, por lo que se ha de dotar a ésta de suficiente rigidez para evitar deformaciones.

- En la posición de cierre inicial, si se quiere conseguir una estanqueidad adecuada es necesario que el solenoide que actúa el pestillo reciba una energía suficiente.
- En la posición de cierre inicial las pérdidas son de 0.14 l/s y en la posición final 0.11 l/s.
- Para las dimensiones de la compuerta de 0.38 m. de anchura útil y una altura de agua de 0.19 m., el caudal máximo desaguado ha sido de 79 l/s.

Estudio económico:

El coste del sistema contabilizando material y mano de obra ha sido de 21875 pts., la parte mecánica y 31269 pts. la parte eléctrica. Lo que supone un costo total de : 53144 pts.

A efectos de comparación se ha contabilizado el coste del riego con el sistema manual tradicional, el sistema semiautomático, y el riego por goteo, obteniéndose los siguientes resultados :

Riego tradicional : 35325 pts/año
Riego semiautomático : 28882 pts/año
Riego localizado : 40000 pts/año

CONCLUSIONES

El sistema semiautomático que se presenta tiene una viabilidad tanto técnica como económica, por lo que sería interesante su prueba en condiciones de campo.

REFERENCIAS

- A.S. Humpherys (1995a). "Semiautomation of irrigated basin and borders: II Dual-Function turnout gates". Applied Engineering in Agriculture. Vol.11(1):75-82. ASAE
- A.S. Humpherys (1995b). "Water sensor feedback control system for surface irrigation" Applied Engineering in Agriculture. Vol.11(1):61-65. ASAE

Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado parcialmente con una ayuda del Ayuntamiento de Lleida y la colaboración de la Comunidad de regantes de los canales de Urgell.

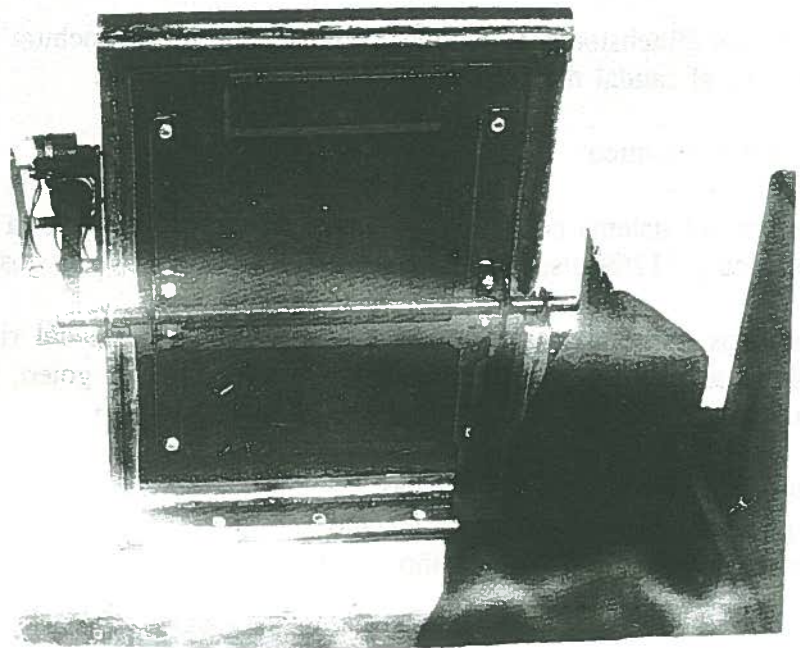
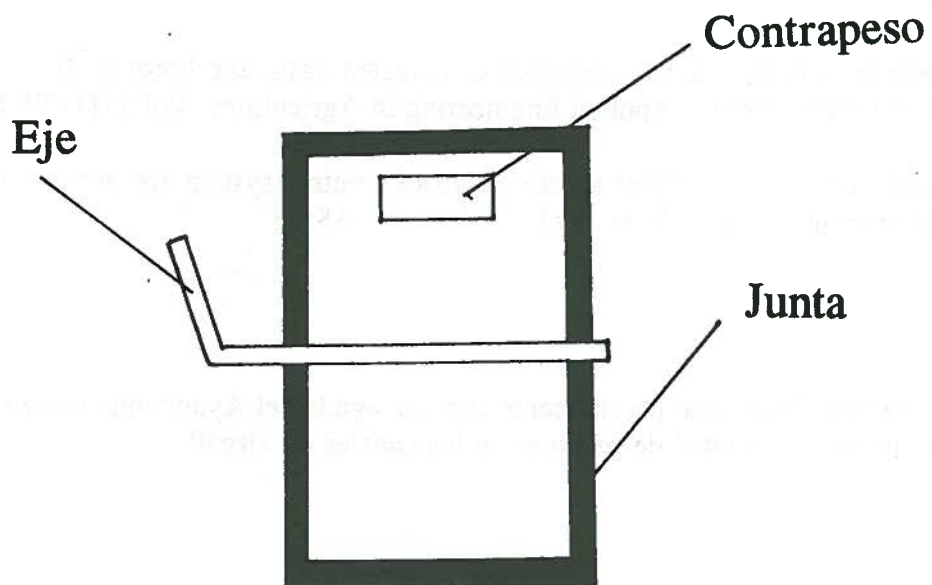


Foto nº 1. Compuerta en posición inicial (vista posterior)



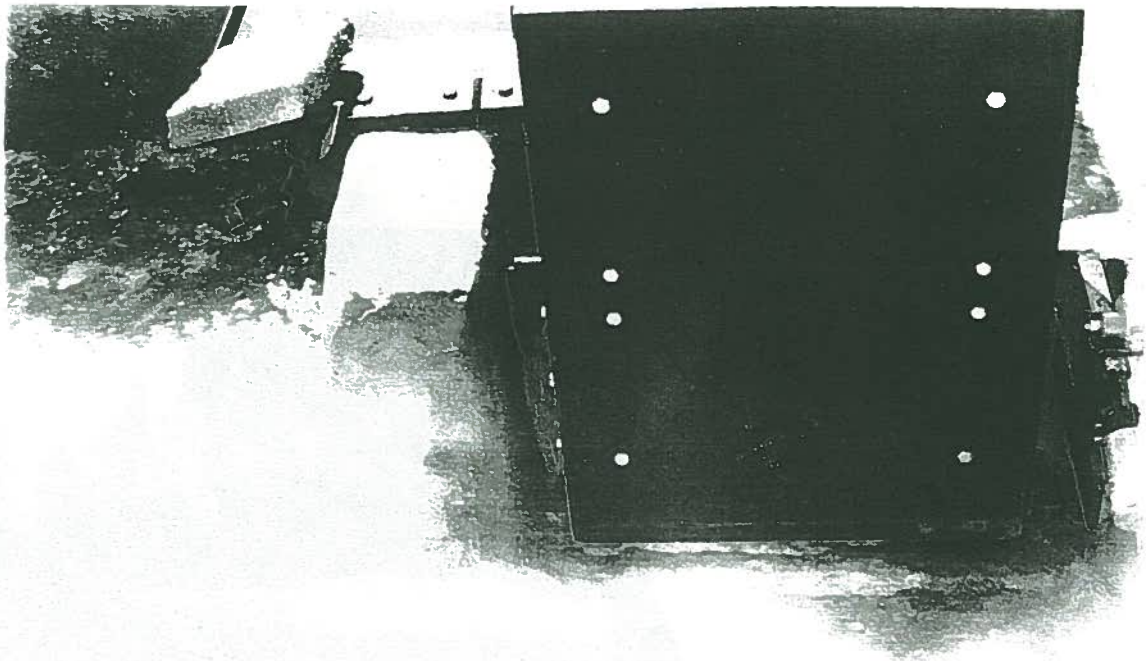
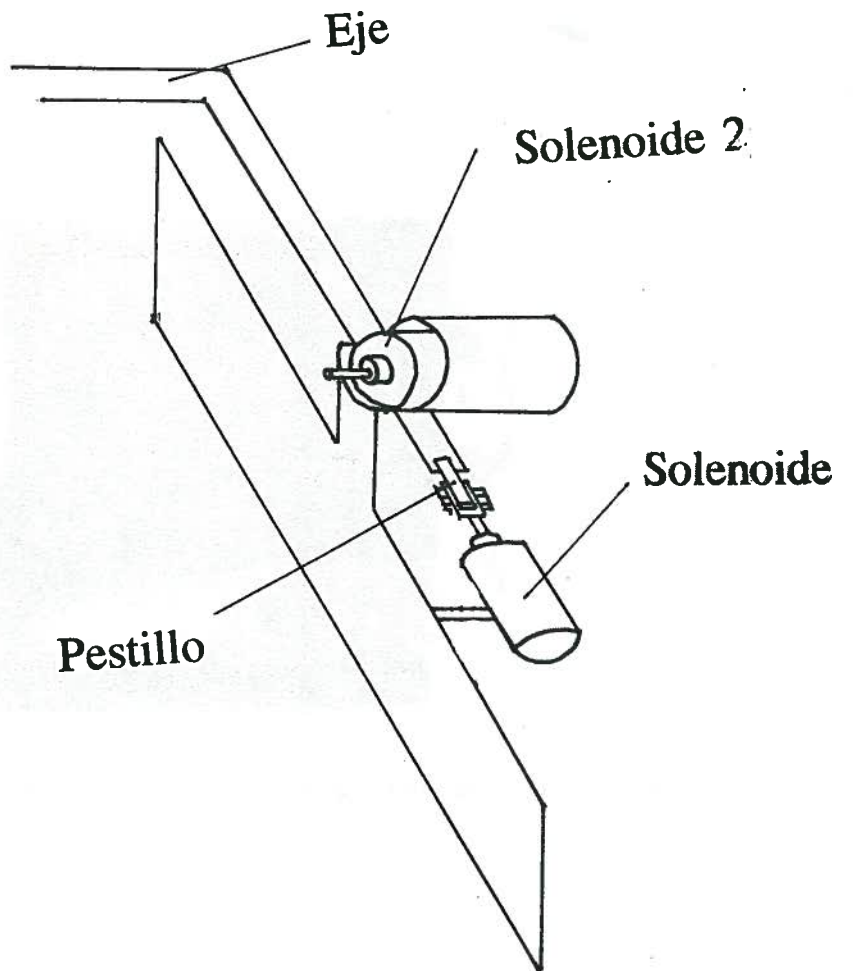


Foto nº 2. Compuerta en posición inicial (vista anterior)



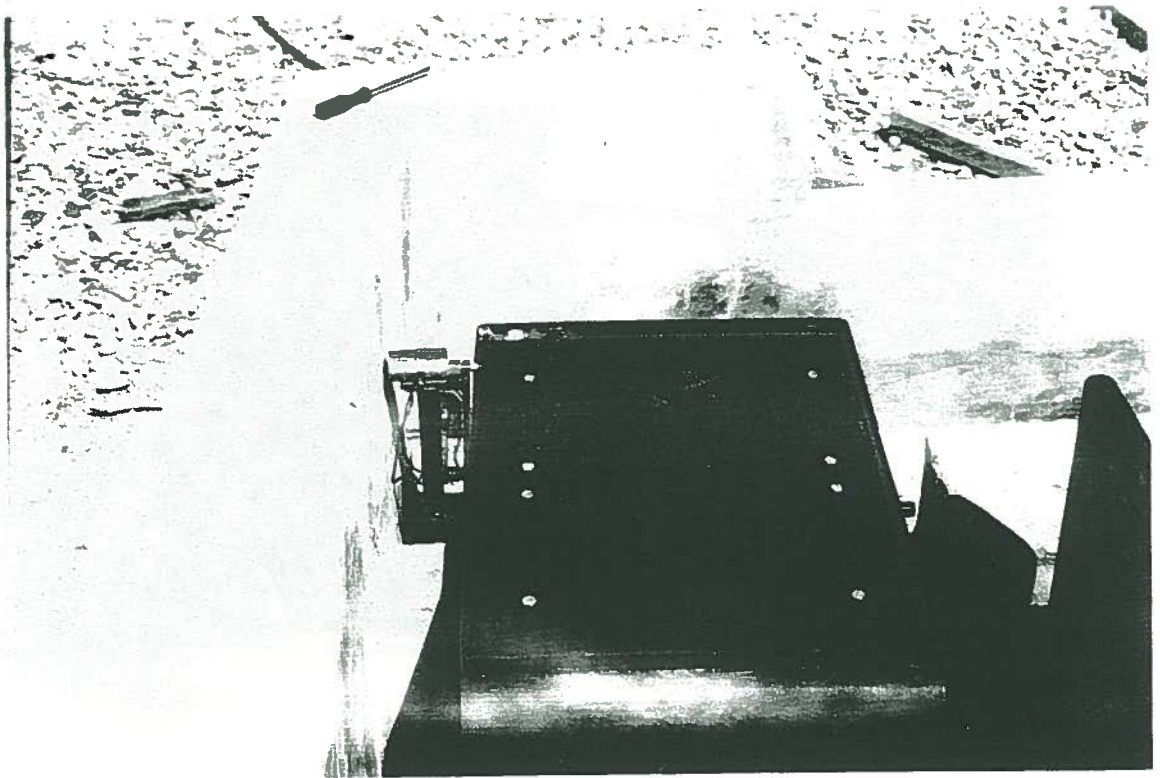


Foto nº 3. Compuerta en posición intermedia (vista posterior)

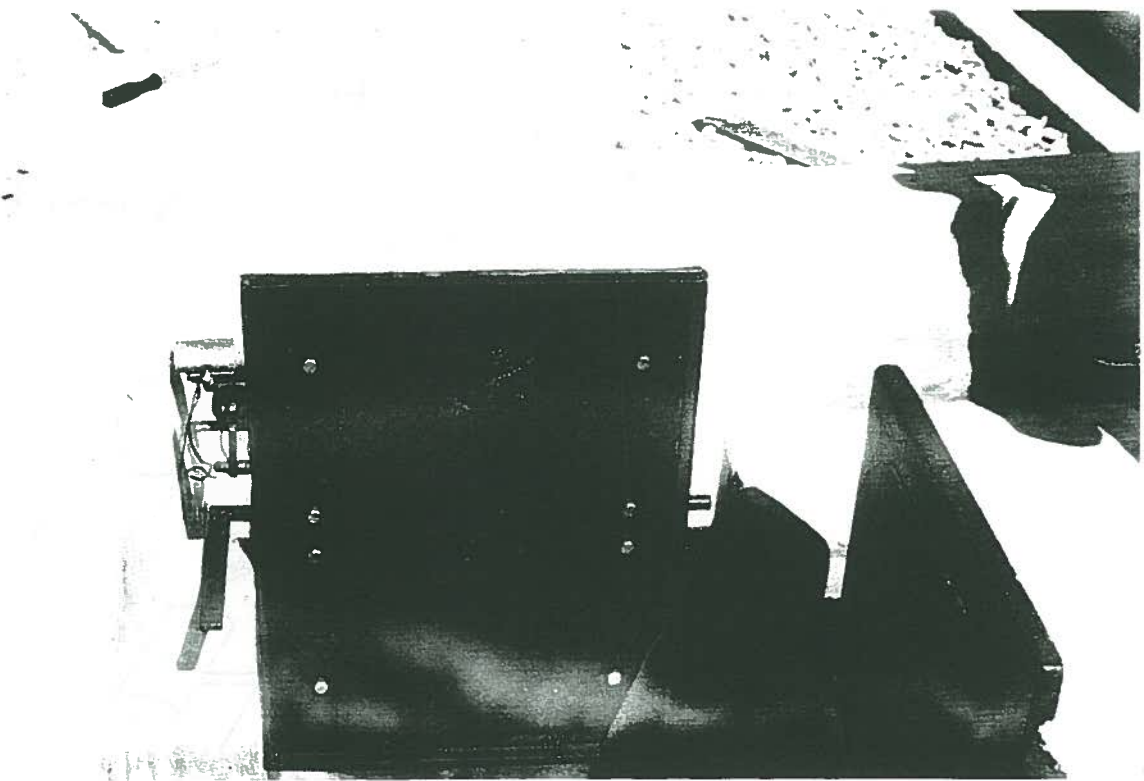


Foto nº 4. Compuerta en posición final (vista posterior)

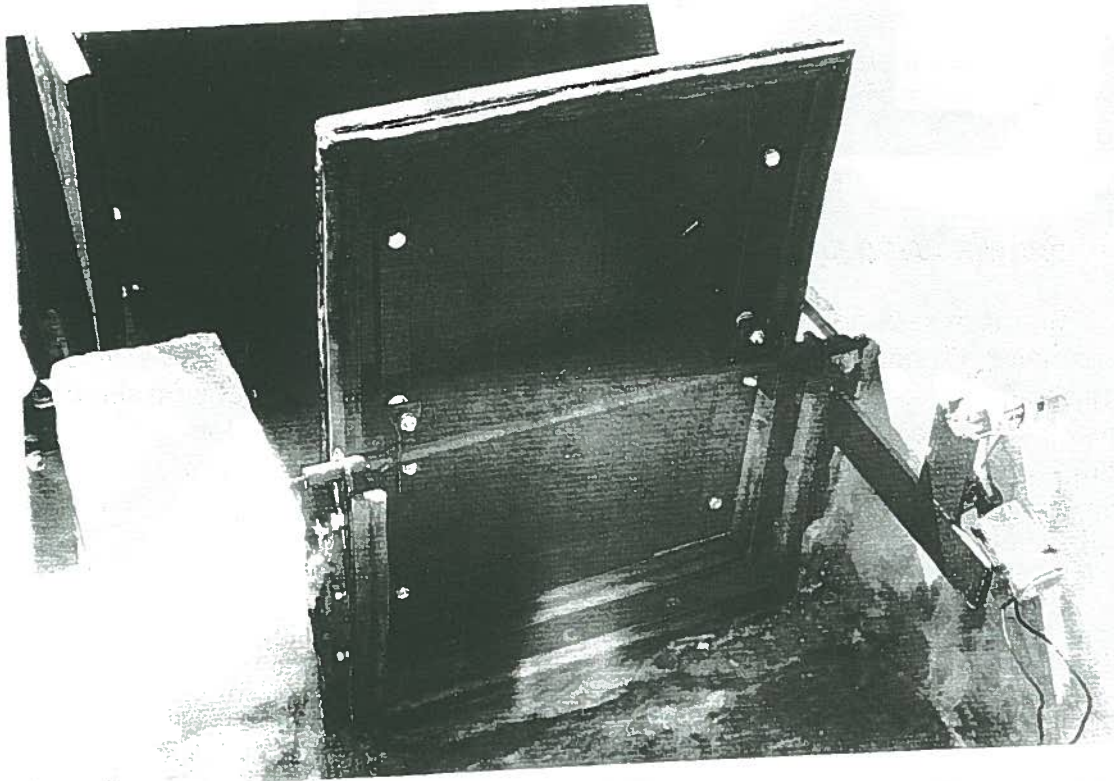
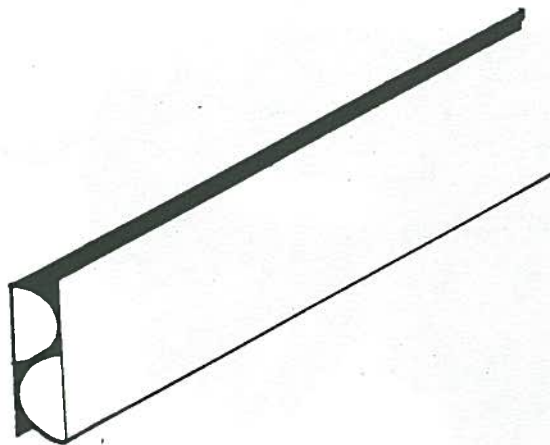


Foto nº 5. Compuerta en posición final (vista anterior)



Acoplamiento de la juntas

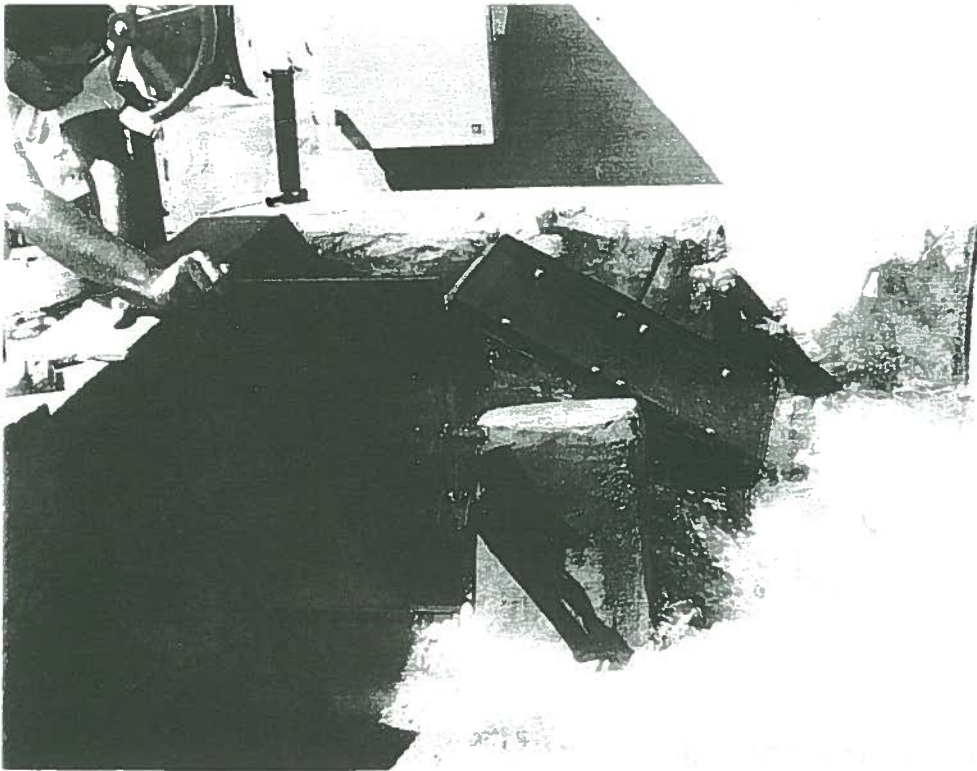
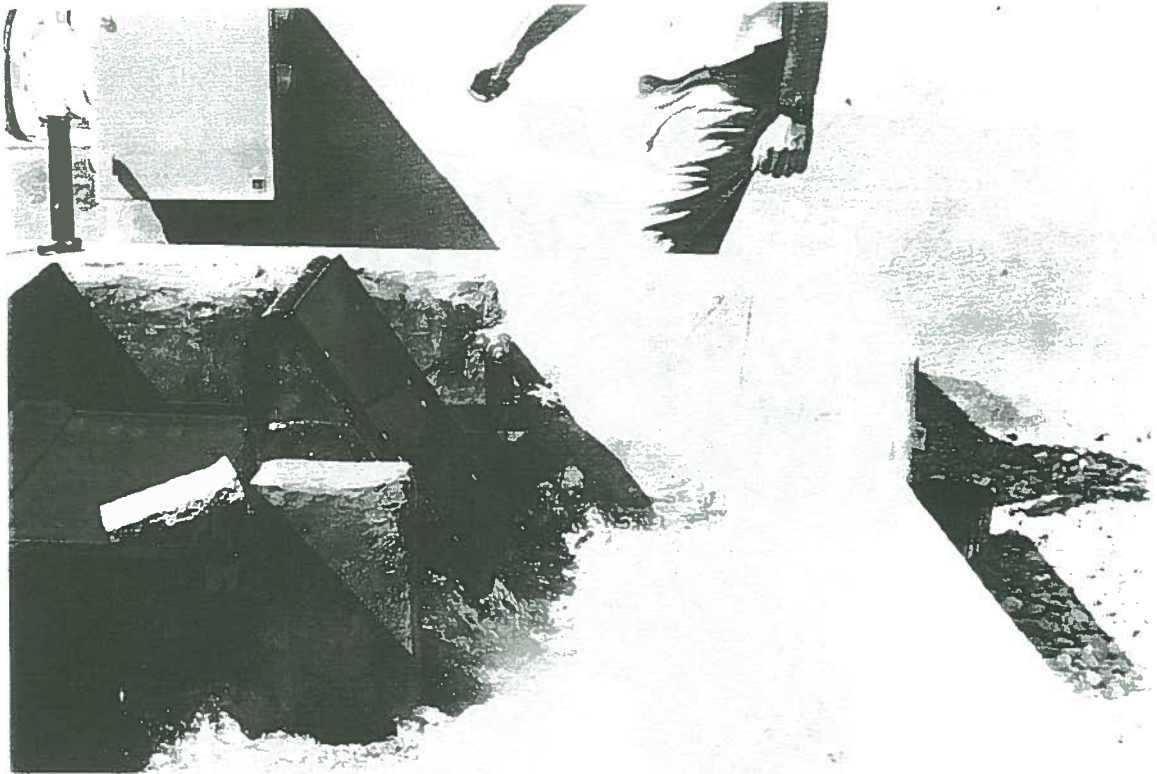


Foto nº 6. Secuencia de obertura por parte del agua

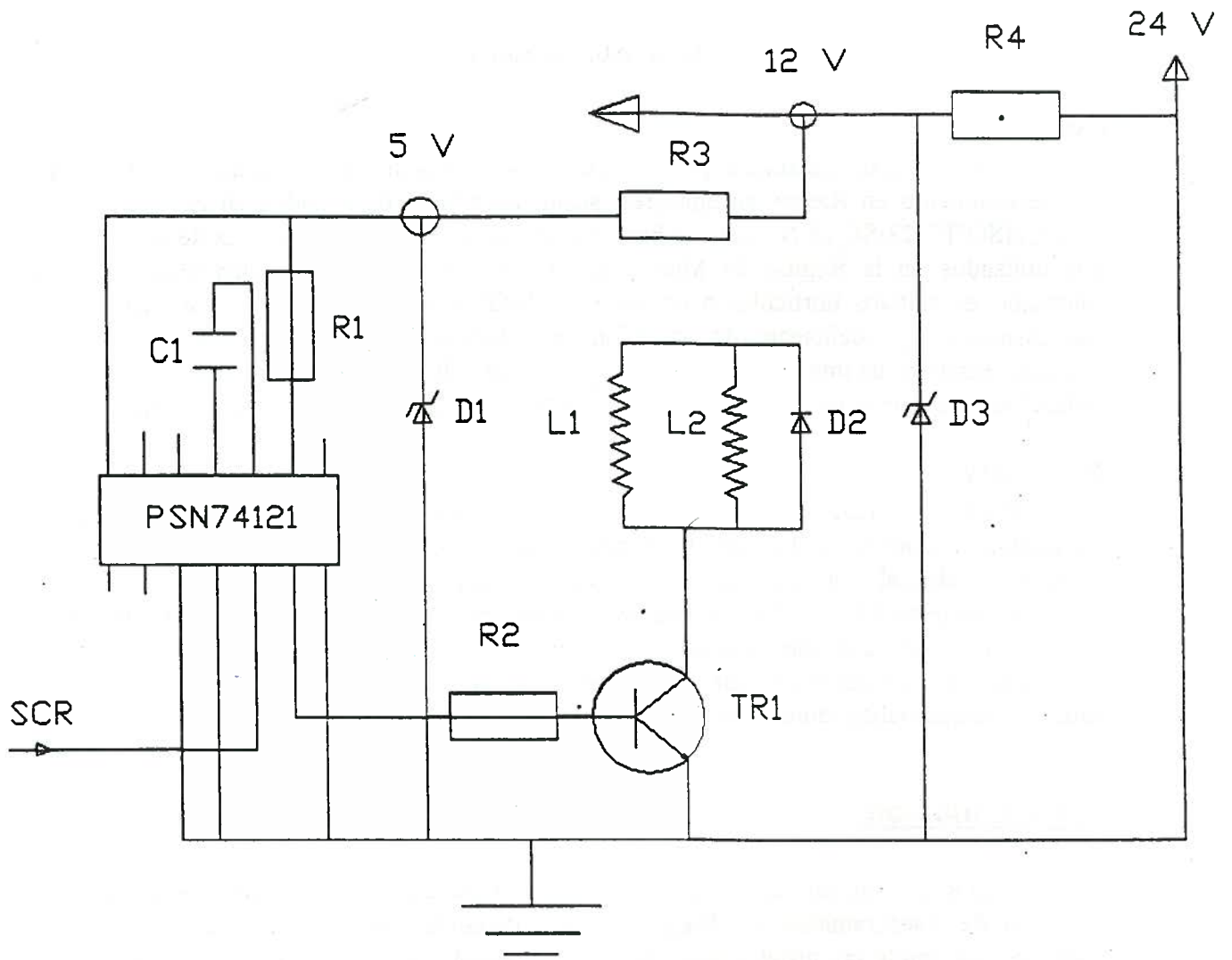


Diagrama eléctrico de la controladora

CARACTERÍSTICAS DE LOS EMISORES MAS UTILIZADOS EN LA REGIÓN DE MURCIA EN EL PERIODO 92-95

Antonio José García Moya¹

Ángel Abadía Sánchez¹

Resumen:

De los ensayos efectuados por el Laboratorio de Calidad de Materiales, del Programa de Asesoramiento en Riegos en emisores, según los requisitos exigidos en la norma UNE 68075, (ISO/TC 23/SC 18 N 128), se han obtenido las características técnicas de los emisores más utilizados en la Región de Murcia en el periodo 92-95, diferenciándolos según su utilización en cultivos hortícolas o arbóreos, y clasificándolos de acuerdo a su régimen de funcionamiento, y coeficiente de variación. Se observa la gran utilización de emisores autocompensantes, de importación, en instalaciones de cultivos arbóreos y por el contrario la utilización de emisores no compensantes y de fabricación regional en los cultivos hortícolas.

Summary:

The trials carried out, by the Laboratory of Quality of Materials, of the Advice Program in Irrigation, according to the norm UNE 68075, (ISO/TC 23/SC 18 N 128), have allowed to obtain the technical characteristic of the emitters more frequently used in the Region of Murcia in the period 92-95. The emitters were classified according to their use in horticultural or arboreal crops, and their operation regime, and variation coefficient. It is noted the predominant use of imported, self-compensating emitters, in arboreal crops, and of regional made, no compensating emitters in horticultural crops.

1.- Introducción.

En la Región de Murcia, desde el año 1988 el Laboratorio de Calidad de Materiales del Programa de Asesoramiento en Riegos, viene analizando los emisores y las tuberías de polietileno de todas las instalaciones de riego localizado cuyos propietarios han solicitado cualquier tipo de ayuda a la administración, además otros agricultores que no piden ayudas, también envían muestras para su análisis. En los cuatro últimos años han sido 419 los análisis de emisores que se han efectuado, éstos han sido remitidos desde todas las comarcas de la Región, por lo que estadísticamente poseemos una muestra muy representativa del conjunto de los emisores instalados en la Región de Murcia.

El presente trabajo trata de presentar un resumen de las características de los principales emisores utilizados en la Región de Murcia, diferenciándolos en función de su utilización, en cultivos hortícolas o para cultivos arbóreos (frutales y cítricos principalmente), estableciendo las distintas clasificaciones para cada tipo de utilización.

¹ Ayudante de Investigación de Riegos. Departamento de Riegos. CIDA. La Alberca 30150 MURCIA

2.- Materiales y métodos.

La metodología utilizada para la realización de los ensayos en los emisores es la descrita por la norma española UNE 68075, que consiste en tomar como mínimo una muestra de 25 emisores del total de la población e instalarlos sobre la tubería siguiendo las recomendaciones del fabricante.

A continuación se miden los caudales suministrados por los emisores, cuando la presión de entrada del emisor sea igual a la presión nominal de ensayo, anotando por separado el caudal suministrado por cada uno de los emisores. A los emisores autocompensantes previamente se les acondiciona durante un tiempo no inferior a una hora, someténdolos a diferentes presiones entre la presión mínima y la máxima de funcionamiento. Todos los ensayos se realizan con el agua a 23°C.

Con los datos obtenidos se obtiene la desviación típica de la muestra S , el caudal medio Q_m , y el coeficiente de variación de la muestra $C.V.$, que es el cociente entre S y Q_m , expresado en tanto por ciento.

Para la determinación del exponente del emisor x , se seleccionan cuatro emisores de la serie de acuerdo a criterios estadísticos y se estudia en ellos la variación del caudal producida al variar la presión a la entrada del emisor.

Para cada presión de entrada p_i , obtenemos un caudal medio del emisor \bar{q}_i , obteniéndose el exponente x , mediante la siguiente fórmula:

$$x = \frac{\sum (\log p_i) (\log \bar{q}_i) - \frac{1}{n} (\sum \log p_i) (\sum \log \bar{q}_i)}{\sum (\log p_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \log p_i)^2}$$

3.- Resultados y discusión

Debido a las notables diferencias que presentan los emisores en función de su utilización para un determinado tipo de cultivo, vamos tratarlos según su utilización en instalaciones de cultivos hortícolas o en instalaciones de cultivos arbóreos.

3.1.- Emisores utilizados en instalaciones hortícolas

En general los emisores utilizados en cultivos hortícolas se caracterizan por ser de un caudal de 3 l/h, en general., aunque empieza a ser frecuente la utilización de tuberías emisoras con caudales de 1 a 2 litros por emisor.

El gráfico 1 nos presenta la distribución de los principales emisores utilizados en éste tipo de cultivos, ordenados según su mayor porcentaje de utilización en instalaciones, mientras que la tabla 1 nos presenta las características técnicas de éstos emisores.

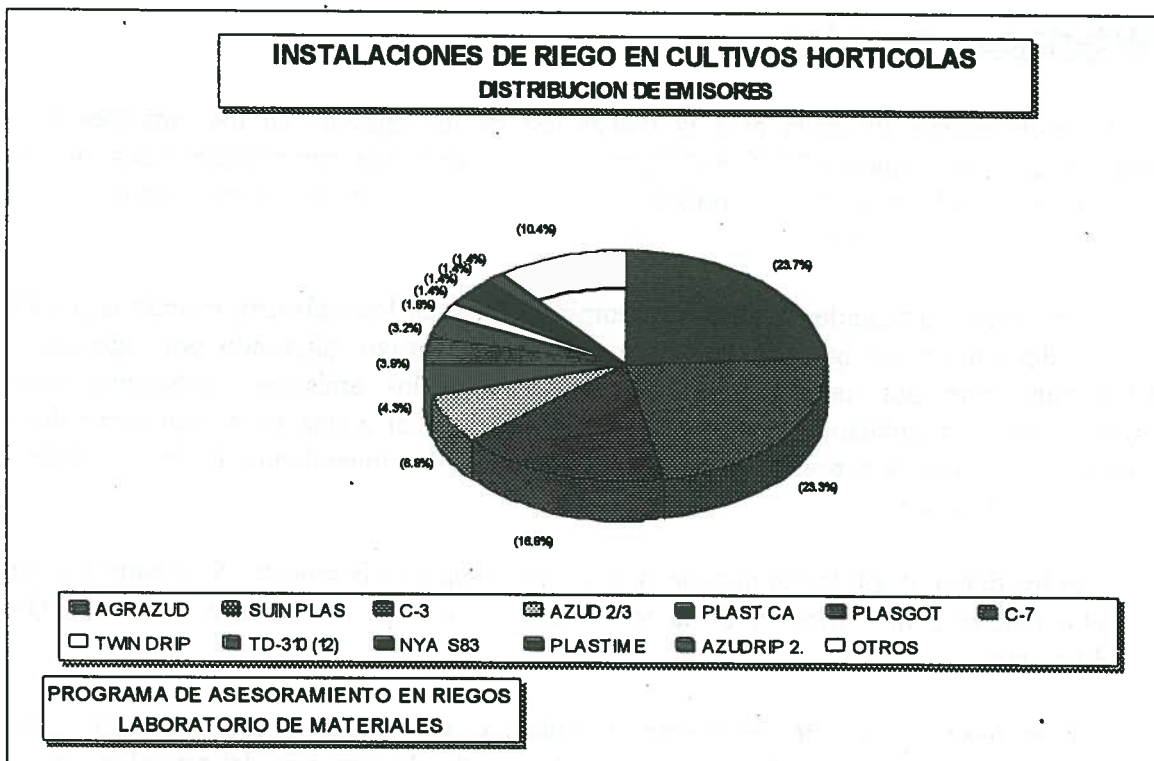


GRÁFICO 1. Distribución de emisores en según su porcentaje de utilización en cultivos horticolas.

TABLA 1. Características técnicas de los principales emisores utilizados en cultivos horticolas.

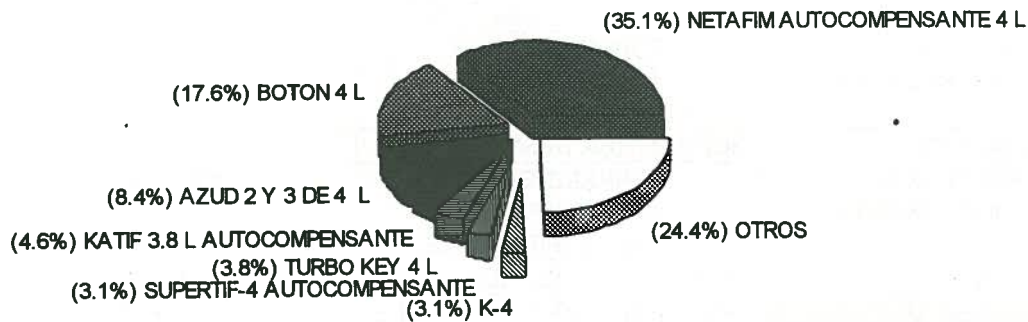
	X	Caudales medios				Coeficiente de Variación			
		Min.	Máx.	Promedio	Desv Est	Min.	Máx.	Promedio	Desv Est
AGRAZUD 12 3 L	0.51	2.95	3.18	3.08	0.05	1.70	6.95	3.15	1.17
C-3	0.53	2.89	3.50	3.23	0.15	0.64	9.11	2.92	1.85
SUIN PLAS 16	0.53	2.81	3.25	3.02	0.11	1.03	6.45	2.74	1.61
SUIN PLAS 12	0.53	2.84	3.29	3.03	0.14	1.36	9.33	4.43	1.98
AZUD 2/3	0.51	2.96	3.25	3.09	0.07	1.43	7.93	3.32	1.76
PLAST CAR	0.53	2.93	3.42	3.21	0.15	2.17	5.60	3.82	1.14
AGRAZUD 16 3 L	0.53	3.06	3.57	3.25	0.16	1.91	10.42	4.92	2.86
PLASGOT CORTO	0.52	3.57	3.68	3.62	0.03	0.67	6.10	3.01	1.59
C-7	0.52	2.89	3.30	3.12	0.14	1.50	7.14	3.62	2.12
TWIN DRIP	0.50	1.86	2.18	2.03	0.14	5.06	7.45	6.55	0.96
TD-310 (12)	0.51	3.11	3.20	3.17	0.04	0.95	1.88	1.51	0.43
NYA S83	0.57	4.06	4.38	4.16	0.15	2.62	12.97	6.31	4.71
PLASTIMER	0.55	3.17	3.51	3.31	0.14	3.21	7.64	5.42	2.33
AZUDRIP 2.2	0.52	2.18	2.83	2.45	0.29	1.78	3.39	2.65	0.72

3.2.- Emisores utilizados en Instalaciones arbóreas.

Los emisores utilizados trabajan únicamente en el rango de los 4 litros hora, la tendencia es a utilizar emisores autocompensantes.

El gráfico 2 nos presenta la distribución de los principales emisores utilizados en éste tipo de cultivos, ordenados según su mayor porcentaje de utilización en instalaciones, mientras que la tabla 2 nos presenta las características técnicas de éstos emisores.

INSTALACIONES DE RIEGO EN CULTIVOS ARBÓREOS
DISTRIBUCION DE EMISORES



PROGRAMA DE ASESORAMIENTO EN RIEGOS
LABORATORIO DE MATERIALES

GRÁFICO 2. Distribución de emisores en según su porcentaje de utilización en cultivos arbóreos.

TABLA 2. Características de los principales emisores utilizados en cultivos arbóreos.

	X	Caudales medios				Coeficiente de Variación			
		Min.	Máx.	Promedio	Desv Est	Min.	Máx.	Promedio	Desv Est
NETAFIM AUTOCOMPENSANTE 4 L	-0.01	3.76	4.22	4.03	0.08	0.89	4.21	2.25	0.72
BOTON 4 L	0.47	3.62	3.84	3.72	0.05	0.80	2.48	1.61	0.46
AZUD 2 4 L	0.50	3.92	4.08	4.01	0.06	0.84	3.21	1.66	1.00
KATIF 3.8 L AUTOCOMPENSANTE	0.01	3.62	4.00	3.76	0.14	2.26	6.67	4.43	1.81
TURBO KEY 4 L	0.54	4.34	5.14	4.62	0.31	7.71	21.62	13.19	5.36
SUPERTIF-4 AUTOCOMPENSANTE	0.00	3.79	4.04	3.86	0.12	1.51	2.61	2.24	0.50
AZUD 3 4 L	0.52	4.26	4.50	4.36	0.10	1.50	5.37	3.51	1.68
K-4	0.55	3.65	3.73	3.68	0.04	2.11	4.13	3.13	0.84



GRÁFICO 3. Distribución de emisores compensantes y no compensantes

TABLA 3 . Tipo de Emisor y Procedencia

EMISOR	TIPO	PROCEDENCIA
NETAFIM AUTOCOMPENSANTE 4 L	SOBRELINEA NO DESMONTABLE AUTOCOMPENSANTE	IMPORTACIÓN
NETAFIM BOTON	SOBRELINEA NO DESMONTABLE	IMPORTACIÓN
AZUD 2 Y 3 DE 4 L	INTERLINEA DESMONTABLE DE 12 Y 16	MURCIA
KATIF 3.8 L AUTOCOMPENSANTE	SOBRELINEA NO DESMONTABLE AUTOCOMPENSANTE	IMPORTACIÓN
TURBO KEY 4 L	SOBRELINEA DESMONTABLE	IMPORTACIÓN
SUPERTIF A L AUTOCOMPENSANTE	SOBRELINEA NO DESMONTABLE AUTOCOMPENSANTE	IMPORTACIÓN
K-4	SOBRELINEA DESMONTABLE	IMPORTACIÓN
AGRAZUD	INTERLINEA SIN CARCASA DE 12 Y 16	MURCIA
C-3	INTERLINEA SIN CARCASA DE 12	MURCIA
SUIN PLAS	INTERLINEA SIN CARCASA DE 12 Y 16	ALICANTE
AZUD 2/3	INTERLINEA DESMONTABLE DE 12	MURCIA
PLAST CAR	INTERLINEA SIN CARCASA DE 12	MURCIA
PLASBOT CORTO	INTERLINEA SIN CARCASA DE 12	ALICANTE
C-7	INTERLINEA SIN CARCASA DE 16	MURCIA
TWIN DRIP	TUBERIA EMISORA	ALICANTE
TD-310	INTERLINEA DESMONTABLE DE 12	ALICANTE
NYA S83	INTERLINEA SIN CARCASA DE 12	ALMERIA
PLASTIMER	INTERLINEA SIN CARCASA DE 12	ALMERIA
AZUDRIP 2.2	TUBERIA EMISORA	MURCIA

De la revisión de los cuadros anteriormente expuestos se observa la importancia de los emisores autocompensantes en las instalaciones de riego en cultivos arbóreos, y en especial de uno de ellos que abarca 1/3 del mercado por sí solo; a pesar del alto costo el agricultor tiene plena confianza en ellos.

El tipo de emisor utilizado en cultivos hortícolas es el tipo interlinea sin carcasa, con un exponente entre 0.5 y 0.6, trabajando en régimen turbulento. Prácticamente la totalidad son de fabricación regional lo que hace posible su bajo coste, sin que por ello sean de calidad inferior, pues su coeficiente de variación de fabricación medio es inferior a 5%.

Hay que hacer constar la aparición real en el mercado de las tuberías emisoras que aunque del total del material ensayado representa un 10 % aproximadamente, ha sido durante el año 1995 cuando han incidido de verdad en nuestra región. La tabla 4 nos presenta la evolución del número de ensayos en tuberías emisoras con el tiempo.

Tabla 4. Evolución del número de tuberías emisoras analizadas.

AÑO	1992	1993	1994	1995
TUBERÍAS EMISORAS	7	1	2	22

4.- Conclusiones

La gran mayoría de los emisores utilizados en cultivos arbóreos son de importación, en parte porque en España no se fabrica ningún emisor autocompensante de calidad, y en parte por la mayor dificultad en fabricar un buen emisor que no sea de una sola pieza. Incluso como se puede observar algún emisor importado no responde a las características de calidad adecuadas, confiando el agricultor a ciegas por su procedencia de importación.

En cultivos hortícolas se utilizan emisores de fabricación regional que han sido poco a poco adaptados por los fabricantes a las exigencias de los agricultores, habiendo muy poca diferencia en los parámetros de calidad de unos y otros, siendo su mayor o menor incidencia en función de la red comercial del fabricante.

El hecho de que sean de 3 l/h, caudal alto para hortícolas, se explica por la dificultad de conseguir un buen emisor, barato y sin problemas de obstrucciones.

La gran variabilidad de los coeficientes de variación de fabricación creemos se debe en parte a la utilización de emisores sin carcasa, y en parte al deficiente mantenimiento y limpieza de los moldes de inyección de los emisores, se trata de fabricar el máximo número de goteros posibles, sin reparar mucho en la calidad.

En 1995 han incidido a fondo las tuberías emisoras, por lo que creemos que en los años sucesivos irán ganando cota de mercado a gran velocidad.

5.- Bibliografía

- AENOR. (1986) Material de Riego. Emisores. Requisitos generales y métodos de ensayo. Norma UNE 68-075-86.
- AENOR. (1989) Equipos para riego. Sistemas de Tuberías-Emisoras. Características generales y métodos de ensayo. Norma UNE 68-076-89.
- RODRIGO LÓPEZ, J., HERNANDEZ ABREU, J.M., PÉREZ REGALADO, A., GONZÁLEZ HERNANDEZ, J.F. (1992) Riego Localizado. Ediciones Mundi-Prensa. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.

GRUPO DE TEMAS D

TEMAS VARIOS

PRESENTACIÓN ORAL

RIESGOS Y VENTAJAS DE LA INTRODUCCION **DEL INTERCAMBIO DE CONCESIONES**

por

Ricardo Segura Graño¹

Resumen:

La ponencia presenta la experiencia obtenida en California al introducir medidas que permiten el intercambio de derechos legales al uso del agua y analiza las implicaciones de su trasposición al caso español. Especial atención se presta a las ventajas e inconvenientes que se derivarían si se introduce en nuestras normas el intercambio de concesiones.

Summary:

The paper presents the experience obtained in California when introducing measures allowing the interchange of legal rights for water use and analyses the effects of its application to the Spanish case. Particular attention is given to the advantages and drawbacks that would derive from the interchange of administrative allowances, if this item is introduced into the Spanish legislation.

1. El régimen legal para el aprovechamiento del agua

En nuestro país, y como es sabido, el aprovechamiento de los recursos hídricos en el regadío se efectúa mediante el otorgamiento a favor de los usuarios – regantes – de una concesión administrativa. Mediante esta figura legal, los regantes pueden utilizar el agua – elemento constitutivo del dominio público hidráulico – para regar sus fincas, a las que se adscribe este derecho; en nuestra legislación el derecho al uso del agua va unido, inseparablemente, a la propiedad de la tierra. El agua queda adscrita a los usos indicados en el título concesional sin que pueda ser aplicada a otros distintos, ni a terrenos diferentes.

En consecuencia, las normas españolas no contemplan, ni permiten, salvo autorización administrativa específica, la negociación – compra/venta – de derechos sobre el agua, excepto en el archipiélago canario y cuando el agua proceda de pozos alumbrados antes de la entrada en vigor de la Ley de Aguas, en cuyo caso el agua es de propiedad privada.

Se exceptúan de este procedimiento general – el uso por concesión – el archipiélago canario; las aguas subterráneas alumbradas con anterioridad al 1 de

¹ Subdirector General de Planificación Hidrológica, Dirección General de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente - Madrid

enero de 1986 – fecha de entrada en vigor de la Ley de Aguas de 1985 (1) –, que seguirán siendo privadas; finalmente, aquéllos usuarios de pozos y manantiales, cuyo uso es autorizado por la ley siempre y cuando el volumen total no pase de 7.000 m³.

2. Reasignación en situaciones de escasez

Siempre según la vigente Ley de Aguas, en situación de sequía extraordinaria declarada mediante Real Decreto, se pueden adoptar medidas en relación con la utilización del agua, aun cuando hubiese sido objeto de concesión. Es decir, en estos casos excepcionales se admite y contempla la reasignación por la Administración de los recursos disponibles, siempre en función de la preferencia entre los distintos usos; en general, aguas destinadas normalmente al riego se derivan al uso urbano.

No se concretan en la norma las compensaciones a que tienen derecho los usuarios privados del uso del recurso para satisfacer el suministro de otros usuarios. Así, por ejemplo, la utilización de las reservas del embalse del Pintado, destinadas al riego de la Z.R. del Viar y que se han reasignado al suministro de la población de Sevilla y su alfoz. Actuaciones de esta naturaleza, puestas en vigor en el episodio de sequía 1991/95, están originando conflictos jurídicos, aún en vías de resolución, ajenos al objetivo de esta comunicación.

En una época en la que prevalecen las consideraciones económicas sobre las de otra índole, se sugiere en numerosos foros (2) que la asignación de los recursos hídricos en períodos de escasez debería fundamentarse en la rentabilidad obtenida por los diferentes usuarios. Aquellos usos en los que se consiga un rendimiento mayor utilizarían el agua escasa, previa adquisición del correspondiente derecho a otros usuarios a los que el precio pagado compensaría de su renuncia. En el debate sobre el Plan Hidrológico Nacional (3), las experiencias del llamado mercado del agua, aplicadas en California (4) en los últimos años, son aportadas para reforzar esta postura.

3. El mercado del agua

La compraventa de agua privada ya existe, al menos de facto, en algunas zonas de España –Canarias, Reus, Valle del Vinalopó– y presenta un amplio espectro de posibilidades en función de la duración del intercambio –temporal o permanente– y de la cantidad relativa del volumen negociado –parcial o total–. Así, se puede adquirir una cantidad determinada –volumen en m³–, un caudal durante un período o, entre otras posibilidades, una participación en los recursos de un pozo, mina o manantial.

Constituye, también, objeto de debate el grado de participación de la administración hidráulica en la regulación del eventual mercado del agua. Si el agua negociada es parte del dominio público hidráulico, parece razonable que, como mínimo, se registren los intercambios acordados por las partes interesadas – comprador/vendedor –. En la experiencia californiana (5) la intervención de la administración hidráulica estatal es determinante.

Siendo los recursos hídricos en España un bien de dominio público – elemento básico y tradicional en nuestra legislación hídrica –, nuestro eventual mercado del agua no negociaría propiamente el recurso agua sino el derecho a aprovechar dicho recurso. El elemento objeto de intercambio no sería el agua sino la concesión.

En todo caso, es necesario contar con unas infraestructuras que permitan el transporte desde el origen del recurso hasta el punto de aplicación por el usuario comprador.

4. Ventajas

Son importantes las ventajas conseguidas por la racionalización en el aprovechamiento del agua, que induciría la introducción de esta figura – el intercambio de concesiones –. En zonas sometidas a penuria hídrica un concesionario que extraiga rentabilidad reducida de su concesión estaría interesado en venderse a otro que pueda alcanzar un mayor rendimiento. Así pues, la escasez de recursos hídricos podría ser compensada mediante este tipo de intercambios. Por otra parte, se induciría un proceso de reordenación de las actuales concesiones, a todas luces beneficioso. Además, esta mecánica producirá un mayor grado de garantía en los usos fundamentales – abastecimiento urbano –, al poder echar mano de recursos adicionales.

Todas estas ventajas son debidas a la escasez crónica de recursos hídricos.

5. Inconvenientes

Aunque los inconvenientes de estos intercambios se conocerán con más precisión cuando se ponga en marcha el procedimiento, si pueden anticiparse algunos efectos previsibles de carácter negativo:

- 1º) Incremento injustificado de la demanda, al resurgir concesiones no utilizadas hasta ahora, pero que podrían ser objeto de compraventa.
- 2º) Incremento de los desembalses – demanda global – en un sistema de explotación en cascada, si se venden a nuevos usuarios los excesos de los distintos aprovechamientos existentes, que antes retornaban a los cauces y eran utilizados aguas abajo.

- 3º) Fenómenos de especulación con derechos concesionales, sobre todo cuando muchas de éstas concesiones son imprecisas, ambiguas o con dotaciones exageradas.
- 4º) Dado que el aprovechamiento del agua ha sido una actividad objeto de subvención, se podría producir de hecho una transferencia desde el sector público a los actuales usuarios que podrían recibir rentas adicionales con este intercambio.
- 5º) La carencia de redes de conexión entre sistemas –todavía mayor entre cuencas– limitaría el ámbito geográfico del intercambio. En la práctica, sólo se crearían numerosos pequeños espacios cerrados donde los intercambios serían posibles.
- 6º) La repercusión negativa sobre la actividad económica y social de la zona cedente, en el caso de transferirse un porcentaje significativo de los recursos empleados habitualmente en ella.

Todos estos inconvenientes se deben, también en gran medida, a nuestra escasez crónica de agua. Además, pueden existir problemas de índole jurídica, que no se analizan en este escrito.

6. Conclusión

A la vista de todo lo anterior, se concluye esta comunicación destacando el interés de modificar nuestra legislación de forma que se introduzca la posibilidad de intercambiar derechos concesionales, pero con las siguientes medidas cautelares y complementarias:

- 1ª. Adecuación previa de las características de las concesiones para que las dotaciones estén proporcionadas a las necesidades reales del aprovechamiento.
- 2ª. Intercambio sujeto a autorización de la administración hidráulica, que deberá comprobar que se transfieren derechos ejercidos realmente y sin perjuicio a terceros, al medio ambiente, o al futuro de la zona cedente.
- 3ª. Interconexión entre sistemas y cuencas, como en California, para ampliar el marco geográfico de los intercambios de derechos.

REFERENCIAS

- 1 Ley de Aguas, 2 de agosto 1985
- 2 Revista de Estudios Agrosociales 1994 y Economía del Agua. Aguilera et alter, MAPA
- 3 Proyecto de Plan Hidrológico Nacional, abril 1993
- 4 Plan Hidrológico del Estado de California y documentación aneja
- 5 La economía del agua. Simposium Barcelona 1993

EFFECTOS A CORTO PLAZO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE COBRE Y ZINC EN UN SUELO AGRICOLA TRAS LA APLICACION DE LODOS DE DEPURADORA.

Polo, M.J.¹ (P), Ordóñez, R.², Giráldez, J.V.¹, J.M. Cabanás³ y M.J. Gualda³

(1) Dpto. de Agronomía, E.T.S.I.A.M., Universidad de Córdoba.

(2) Dpto. de Suelos y Riegos, D.G.I.E.A. Junta de Andalucía.

(3) Laboratorio Provincial de Salud Pública, Córdoba.

Los cambios en la disponibilidad a corto plazo en el suelo de Cu y Zn, aportados por lodos de depuradora han sido establecidos, estudiando el incremento de las concentraciones en parcelas con dosis de 40 y 80 T/ha (peso húmedo) de lodos con respecto a parcelas testigo. Los resultados muestran el diferente comportamiento de estos dos metales en el suelo, asociándose a fracciones diferentes en este. Las curvas de adsorción obtenidas para ambos reflejan las modificaciones producto de la adición de lodos. Los incrementos en la concentración tanto de cobre como de zinc en el suelo son ligeros, debido a los niveles moderados de metales en los lodos usados. Esto, junto con las condiciones del suelo receptor, ha permitido que la disponibilidad de ambos metales en el suelo no haya variado con respecto al testigo, no debiendo deducirse de este hecho que, a largo plazo, el aporte de metales realizado con la aplicación continua de lodos a un suelo redunde en la inmovilización de estos elementos.

Summary.

Short-term changes of Cu and Zn availability in a sewage sludge amended soil were established. The different application rates were 0, 40 and 80 T/ha (wet weight). The results show the different behaviour of these two metals in soil and the chemical forms induced through sludge applications. The accumulation of Cu and Zn in the surface horizons is slight due to the low content of the metals in the sludge. The percentage of metals in exchangeable and soluble forms was very low regardless of the sludge application rate, but it cannot be concluded that long-term applications will perpetually immobilize these elements in soil.

1. Introducción.

La aplicación de lodos de depuradora a suelos agrícolas para conseguir una mejora de sus propiedades físicas y aprovechar su contenido de elementos nutrientes, al tiempo que se evita el problema de su acumulación, es una práctica frecuentada desde hace años. Se ha demostrado el valor de estos residuos como fertilizantes en numerosos trabajos, así como las ventajas del incremento de materia orgánica en los suelos tratados con los mismos, haciendo, no obstante, hincapié en el riesgo potencial que supone la incorporación a un suelo de metales pesados por su posible paso a los cultivos y, de estos, a los animales y al hombre (1,2,3,4).

Los estudios sobre los efectos de la acumulación de metales pesados en suelos agrícolas se centran en la disponibilidad de los mismos, refiriéndose a su absorción por la planta y su movilidad a lo largo del perfil de suelo (5,6). Los resultados muestran diferencias en el comportamiento del metal añadido según el tiempo transcurrido desde la incorporación y la forma química en que se halle presente el metal. En ensayos a corto plazo, la disponibilidad de metales añadidos en forma de sulfato, nitrato o cloruro resultó ser mayor que en el caso de una cantidad equivalente aplicada como lodos de depuradora, debido a la presencia en estos de materia orgánica y otros elementos que disminuyen la actividad de estos metales en solución, formando complejos y adsorbiéndolos en superficies coloidales (2,7). Por otra parte, la aplicación continuada de lodos a un suelo durante años puede incrementar significativamente el

contenido de metales del mismo, persistiendo estos durante largo tiempo tras el cese de las aplicaciones (8).

Los metales pesados en la fase sólida de un suelo pueden aparecer en diferentes formas. La distribución de estos metales en las distintas fracciones de un suelo enmendado con lodos de depuradora puede ofrecer información sobre su solubilidad y disponibilidad para el cultivo.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento a corto plazo de un suelo tratado con lodos de depuradora, en lo que a su dinámica de metales se refiere, estudiando concretamente cobre y zinc por ser los aportes mayoritarios de metales regulados por la legislación en los lodos usados. Para ello se ha analizado la distribución de estos dos metales en las distintas fases del suelo, relacionándolo con la dosis de aplicación de lodos, y se han obtenido, asimismo, las curvas de adsorción de dichos metales en el suelo.

2. Materiales y métodos.

El residuo procedía de la E.D.A.R. La Golondrina de Córdoba, resultado de un tratamiento secundario del agua residual en cubas de aireación, y su composición se muestra en la tabla I. De la comparación con los niveles máximos de metales permitidos en los lodos por la legislación vigente al respecto (9), se puede afirmar que estos lodos presentan un contenido bajo de metales, lo cual los hace especialmente aptos para la agricultura. El aporte de metales pesados realizado por el residuo sería, en orden decreciente, $Zn > Cu > Pb > Ni > Cr > Cd > Hg$, motivo por el cual se ha centrado el estudio en el zinc y el cobre, que, a la vez, son elementos micronutrientes a las concentraciones usuales en suelos no contaminados.

Caracterización agronómica de los lodos			
Humedad (%):	63.0	Calcio (%):	3.79
N inorg. (ppm):	10.0	Magnesio(%):	0.26
M.O. (%):	55.6	Potasio(%):	0.11
N. org. (%):	2.3	Sodio(%):	0.03
pH en agua:	6.8	Fósforo (%):	1.30
Metales en los lodos		Límite máximo (*)	
ppm			
Cadmio:	2.5	Cadmio:	40
Cobre:	283.1	Cobre:	1750
Níquel:	24.1	Níquel:	400
Plomo:	153.9	Plomo:	1200
Zinc:	623.9	Zinc:	4000
Mercurio:	1.2	Mercurio:	25
Cromo:	14.2	Cromo:	1500

(*) Límite máximo permitido por la legislación para aplicar en suelos con $pH > 7$.

Tabla I. Características de los lodos usados en el ensayo.

Se tomaron muestras del horizonte superficial de un suelo en el que se habían efectuado tres tratamientos: testigo (T), 40 (A) y 80 (B) T/ha de estos lodos (peso húmedo). El suelo utilizado pertenece a la finca Alameda del Obispo, en el C.I.D.A. de Córdoba, y sus características se muestran en la tabla II. Se adoptaron parcelas de $6 \times 10 \text{ m}^2$ de superficie, con cuatro repeticiones localizadas al azar para cada tratamiento y para cada cultivo a implantar (trigo y girasol). La aplicación se efectuó en Julio de 1994, extendiéndose los residuos en

superficie con el fin de que quedaran expuestos a la intemperie durante los meses de verano. tras esta estabilización, se llevó a cabo la incorporación al suelo a mediados de Septiembre del mismo año, utilizando una grada de discos.

pH en agua:	8.1	Carbonatos (%):	20.0
M.O. (%):	1.15	C.I.C. (mmol _c /kg):	105
Textura:	franca	Fósforo (ppm):	10.2

Tabla II. Características del suelo usado en el ensayo.

El muestreo de suelo utilizado en este trabajo, se realizó en las parcelas destinadas al cultivo de girasol, previamente a efectuar la siembra, en Marzo de 1995. Se obtuvieron muestras compuestas procedentes de los treinta primeros centímetros de las parcelas correspondientes al mismo tratamiento. Se determinó el valor de pH, el contenido de materia orgánica (oxidación por dicromato) y nitrógeno orgánico (digestión Kjeldahl), la capacidad de intercambio catiónico (por saturación con sodio) y niveles de calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiables (extraídos con acetato amónico).

Parámetros	Suelo T	Suelo A	Suelo B
pH en agua	8.12	8.15	8.11
M.O. (%)	1.11	1.29	1.41
N.org. (%)	0.064	0.078	0.084
C.I.C. (mmol _c /kg)	10.7	10.9	12.5
Ca (mmol/kg)	135	129	135
Mg (mmol/kg)	9.3	11.0	9.5
K (mmol/kg)	5.6	5.9	5.9
Na (mmol/kg)	2.1	2.3	2.2

Tabla III. Análisis de las muestras utilizadas en el trabajo.

Para evaluar la disponibilidad de los metales en estudio se procedió, por un lado, a fraccionar de los mismos en los suelos en cuestión y, por otro, a obtener las curvas de adsorción de cada metal en los mismos.

2.1. Fraccionamiento de cobre y zinc.

El fraccionamiento de cobre y zinc en distintas formas químicas presentes en las muestras se efectuó siguiendo el método propuesto por Sposito *et al.* (1982) para suelos tratados con lodos de depuradora (10), y seguido en trabajos sobre asimilación de metales pesados por cultivos y distribución en suelos (11,12,13). Este método consiste en una extracción secuencial en muestras dobles de 4 g de suelo con 50 ml de NO₃K, H₂O, NaOH, EDTA y NO₃H sucesivamente, para determinar, respectivamente, las fracciones de metales intercambiable, soluble en agua, orgánica, asociada a carbonatos y residual. Durante cada extracción las muestras fueron agitadas, tras lo cual se centrifugaron y el sobrenadante fue decantado y filtrado. Los extractos de suelo así obtenidos fueron analizados para obtener las concentraciones de cobre y zinc, mediante espectrofotometría de absorción atómica. La cantidad de un metal extraída por un determinado reactivo fue calculada de acuerdo a la ecuación:

$$\mu\text{g extraídos} = c \cdot (50 + v) - c' \cdot v \quad [1]$$

donde c es la concentración ($\mu\text{g/ml}$) del metal en el extracto en cuestión, c' la concentración ($\mu\text{g/ml}$) del metal en el extracto obtenido en el paso anterior de la secuencia, y v el volumen de dicho extracto anterior remanente en la muestra de suelo.

2.2. Curvas de adsorción de cobre y zinc.

Para llevar a cabo el ensayo de adsorción se mezclaron 5 g de cada suelo con 25 ml de solución con diferentes concentraciones de $(\text{NO}_3)_2\text{Cu}$ en un caso, y Cl_2Zn en el otro. Los valores iniciales de estas concentraciones se escogieron de forma que se obtuviera un intervalo de adsorción lo suficientemente amplio. Tras agitarse las muestras durante veinticuatro horas, las suspensiones obtenidas se centrifugaron durante diez minutos y se separaron los sobrenadantes. Se determinó el pH final de estos extractos, y las concentraciones de cobre o zinc, y calcio, magnesio, sodio y potasio fueron medidas mediante espectrofotometría de absorción atómica. A partir de las concentraciones inicial y final del metal, y las finales de los cationes mencionados, se calcularon las cantidades del metal adsorbidas por las muestras de suelo y las liberadas del resto de los cationes.

3. Resultados y discusión.

3.1. Fraccionamiento de cobre y zinc.

La distribución de Cu y Zn en los tres suelos se muestra en la tabla IV. Las cantidades de metal extraídas con KNO_3 y H_2O fueron pequeñas y en la tabla se refleja la suma de ambas fracciones, que representa la parte más móvil y, por lo tanto, más disponible para la planta.

Extractante	Cu (ppm)			Zn (ppm)		
	T	A	B	T	A	B
$\text{NO}_3\text{K} + \text{H}_2\text{O}$	0.4	0.5	0.5	1.1	1.3	0.8
NaOH	3.3	4.4	5.2	0.7	0.8	1.1
EDTA	2.7	2.5	2.8	4.2	5.7	7.9
NO_3H	13.9	14.9	15.3	53.4	56.6	58.5
Suma:	20.3	22.2	23.7	59.3	64.4	68.3

Tabla IV. Concentraciones de Cu y Zn en las diferentes fracciones de suelo.

Las cantidades de Cu y Zn extraídas con NO_3K y H_2O suponen un porcentaje sobre el contenido total de cada metal alrededor del 2% e inferiores, en cualquier caso, al 2.5%, no observándose tendencia alguna con respecto a la dosis de lodo aplicada.

Las figuras 1 y 2 muestran, respectivamente, los datos de la tabla IV para Cu y Zn, expresados como porcentaje sobre el contenido total de cada metal. En el caso del cobre, la incorporación de lodos ha incrementado las concentraciones de la fracción orgánica y residual; no obstante, si se estudian las variaciones en la distribución de porcentajes de la figura 1, se puede observar el efecto de los lodos sobre la fracción orgánica de Cu, incrementándose el porcentaje de esta y disminuyendo el porcentaje de la fracción residual sobre el total. Esto es consistente con la manifiesta afinidad del cobre hacia la formación de enlaces con la materia orgánica. El orden en el que el contenido de Cu del suelo se reparte en las distintas fracciones es $\text{NO}_3\text{H} > \text{NaOH} > \text{EDTA} > \text{NO}_3\text{K} + \text{H}_2\text{O}$, para las tres muestras en estudio.

El caso del Zn es diferente, observándose algún incremento de la concentración del metal en la fracción orgánica, e incrementos apreciables de las correspondientes a la fracción ligada a carbonatos y a la residual (ver tabla IV). Si se trabaja con los porcentajes sobre el contenido total de Zn, la figura 2 refleja cómo disminuye el porcentaje de la fracción residual frente al relativo a la fracción de carbonatos. El orden en el que el contenido de Zn del suelo se reparte en las distintas fracciones es $\text{NO}_3\text{H} > \text{EDTA} > \text{NaOH} > \text{NO}_3\text{K} \sim \text{H}_2\text{O}$, para los tres casos, es decir, con independencia de la dosis de lodos.

Si se calcula la distribución de las cantidades de cada metal añadidas al suelo en las distintas fracciones, el orden de estas sería $\text{NaOH} > \text{NO}_3\text{H}$ para el cobre, y $\text{NO}_3\text{H} > \text{EDTA} > \text{NaOH}$ para el zinc.

Se ve, pues, cómo el comportamiento de ambos metales en el suelo difiere entre sí y cómo el aporte de lodos altera la distribución de los mismos en las distintas fracciones estudiadas, si bien, no llega a variar el orden de las mismas en el suelo original.

La escasa concentración tanto de cobre como de zinc en los extractos obtenidos con NO_3K y agua, apunta a un incremento poco significativo a corto plazo de la disponibilidad de estos metales para la planta, debido tanto a un contenido de los mismos moderado en los lodos utilizados, como a las condiciones del suelo receptor, fundamentalmente en lo que a pH se refiere, que dificulta la solubilización de estos elementos. Esto es corroborado por las concentraciones de cobre y zinc en los cultivos cosechados en estas parcelas, mostradas en la tabla V. En el caso del cobre, no hay diferencias entre los valores correspondientes entre las parcelas testigo y las tratadas con lodos, existiendo una ligera tendencia al alza en las concentraciones de zinc, imputable más bien a la mejora del estado nutricional de la planta. No hay que olvidar que ambos metales, en concentraciones bajas, son elementos micronutrientes para los cultivos.

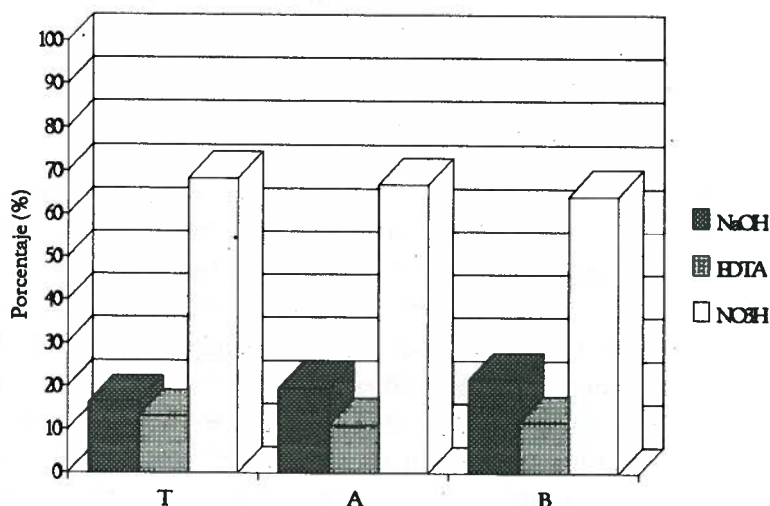


Fig. 1. Distribución del Cu en el suelo.

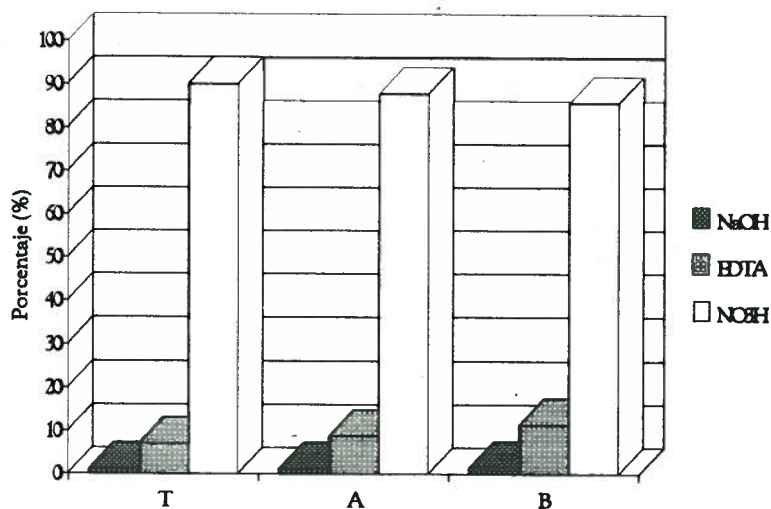


Fig. 2. Distribución del Zn en el suelo.

Suelo	Cu (ppm)		Zn (ppm)	
	Semilla	Tallo	Semilla	Tallo
T	17.5	6.6	46.2	12.1
A	17.7	6.9	52.9	16.3
B	17.8	6.5	52.4	17.8

Tabla V. Concentración de Cu y Zn en girasol.

3.2. Curvas de adsorción

Las figuras 3 y 4 muestran, respectivamente, las curvas de adsorción de Cu y Zn para los tres casos en estudio. Como se puede observar, la dinámica de adsorción es diferente para ambos metales.

En el caso del cobre, la tendencia de la curva es creciente para los tres suelos, mientras que en la adsorción de zinc se alcanza un nivel máximo. Esto podría explicarse a partir de la mayor afinidad del cobre hacia la formación de complejos estables con la materia orgánica, siendo el zinc, por el contrario, el metal con menor afinidad.

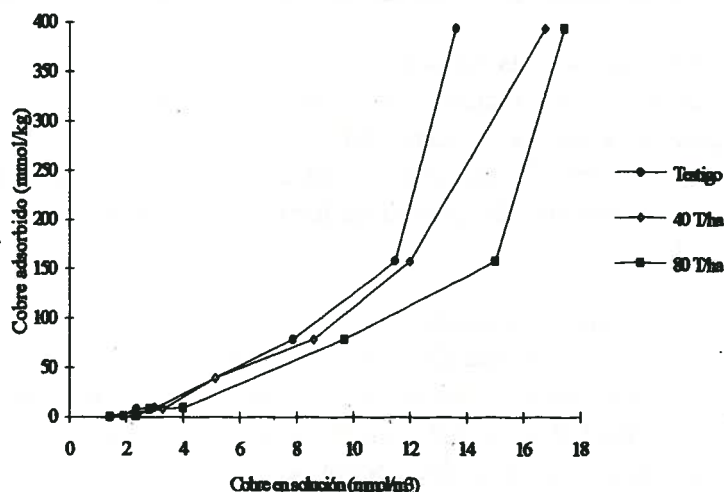


Fig. 3. Curvas de adsorción de Cu.

Sin embargo, la adsorción de cobre es menor a medida que se incrementa la dosis de aplicación de lodos y, por consiguiente, aumenta el contenido de cobre en el suelo. El hecho de que el cobre aportado se halle ligado a la materia orgánica podría ser responsable de esto, haciendo que, aunque el contenido de esta en el suelo sea mayor, no aumente la capacidad de adsorción de cobre del mismo. Para el zinc, la tendencia observada es diferente ya que, si bien en la curva correspondiente al suelo A (dosis menor de lodos) se alcanza un punto a partir del cual la adsorción es menor que la producida en el suelo testigo, en el caso de la dosis mayor la curva reproduce el comportamiento del suelo original. La explicación habría que buscarla tanto en el fraccionamiento de este metal, expuesto en el apartado anterior, como en los valores de C.I.C. de cada suelo, prácticamente iguales para los suelos T y A, y alrededor de un 20% superior para el suelo B (ver tabla III).

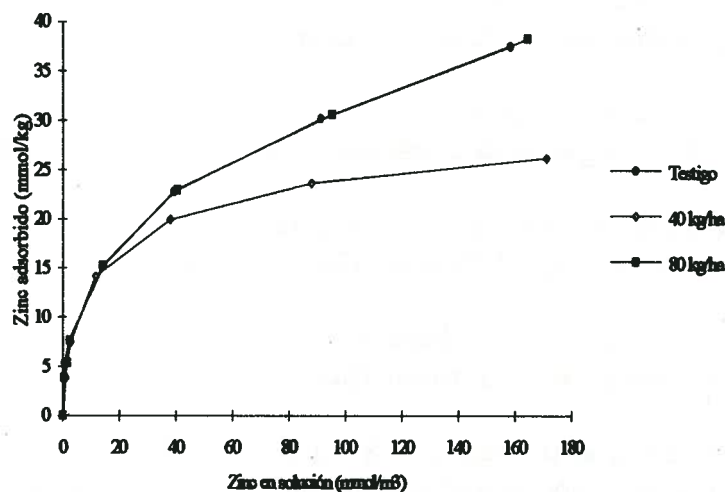


Fig. 4. Curvas de adsorción de Zn.

4. Conclusiones.

Los aportes al suelo de metales realizados por los lodos de depuradora usados en este trabajo no han supuesto un incremento destacado de los niveles de los mismos, en el caso del cobre y el zinc, metales mayoritarios en este caso concreto. Aun cuando este aumento parece no afectar a la disponibilidad de ambos metales para la planta, como corroboran la no observación de cambios producidos en las fracciones soluble e intercambiable, y las concentraciones alcanzadas en los tejidos de los cultivos cosechados en estos suelos, la adición de lodos de depuradora ha alterado la distribución de cobre y de zinc en el suelo receptor, incrementando la fracción orgánica en el caso del cobre, y la fracción ligada a carbonatos en el caso del zinc. Este hecho influye en la dinámica de adsorción de ambos metales, como ha quedado reflejado en las curvas obtenidas para cada metal y cada suelo.

Sin embargo, las diferencias entre el suelo testigo y los tratados con lodos son estrechas en lo que las concentraciones de metales se refiere, e implican, a corto plazo, un riesgo escaso de paso a la planta en cantidades perniciosas para la salud, debido tanto a tratarse de lodos provenientes de un núcleo urbano con escasa actividad industrial (y, por tanto, bajas concentraciones de metales en los lodos) como a las condiciones del suelo (fundamentalmente, pH).

Un aporte continuado y no controlado durante un número elevado de años podría, no obstante, alterar esta situación, alcanzándose concentraciones de metales elevadas en el suelo y acumulándose en cosechas. El control eficiente de la aplicación de lodos, de las condiciones de disponibilidad de metales en el suelo y de la elección de los cultivos implantados, conseguirá una solución para la eliminación de estos residuos que no entrañe riesgos para el medio natural. El seguimiento de las parcelas utilizadas en este estudio en los próximos años permitirá realizar la evaluación de este sistema a largo plazo.

5. Bibliografía.

- (1) Sommers, L.E. 1977. *Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers*. J. Environ. Qual. 6:225.
- (2) Mc Bride, M.B. 1995. *Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective?*. J. Environ. Qual. 2:5-18.
- (3) Dowdy, R.H. and W.E. Larson. 1975. *The availability of sludge born metals to various vegetable crops*. J. Environ. Qual. 4:287-291.
- (4) Lund, L.J., A.L. Page and C.O. Nelson. 1976. *Movement of heavy metals below sewage disposal ponds*. J. Environ. Qual. 5:330-334.
- (5) Silveira, D.J. and L.E. Sommers. 1977. *Extractability of copper, zinc, cadmium and lead in soils incubated with sewage sludge*. J. Environ. Qual. 6:47-52.

- (6) Mahler, R.J., F.T. Bingham, G. Sposito and A.L. Page. 1980. *Cadmium-enriched sewage sludge application to acid and calcareous soils: Relation between treatment, Cd in saturation extracts and Cd treatment*. J. Environ. Qual. 9:359-364.
- (7) Bell, P.F., B.R. James and R.L. Chaney. 1991. *Heavy metal extractability in long-term sewage sludge and metal salt-amended soils*. J. Environ. Qual. 20:481-486.
- (8) Alloway, B.J. and A.P. Jackson. 1991. *The behaviour of heavy metals in sewage-sludge amended soils*. Sci. Total Environ. 100:151-176.
- (9) R.D. 1310/1990 de 29 de Octubre. B.O.E. 262 de 1 de Noviembre de 1990.
- (10) Sposito, G., L.J. Lund and A.C. Chang. 1982. *Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge:I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in solid phases*. Soil Sci. Soc. Am. J. 46:260-264.
- (11) LeClaire, J.P., A.C. Chang, C.S. Levesque and G. Sposito. 1984. *Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge:IV. Correlations between zinc uptake and extracted soil zinc fractions*. Soil Sci. Soc. Am. J. 48:509-513.
- (12) Sims, J.T. and J.S. Kline. 1991. *Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge*. J. Environ. Qual. 20:387-395.
- (13) Taylor, R.W., He Xiu, A.A. Mehadi, J.W. Shuford and W. Tadesse. 1995. *Fractionation of residual cadmium, copper, nickel, lead and zinc in previously sludge-amended soil*. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 26(13&14), 2193-2204.

COMBINACIÓN DE DATOS DE TERRENO, DE SATÉLITE Y METEOROLÓGICOS PARA ESTIMAR EL AGUA DE RIEGO ANUAL POR DISTRITO

Casterad, M^a A. (P); Herrero, J.; Martínez-Cob, A.

Resumen

Los datos agrometeorológicos permiten estimar las necesidades de agua de los cultivos. Estas, combinadas con la superficie ocupada por cada cultivo en un polígono de riego en un determinado año, pueden dar estimaciones del volumen de agua de riego a aplicar en ese año en el regadío. En este trabajo se presentan estimaciones de volúmenes de agua correspondientes a las necesidades hídricas netas de los cultivos para dos años del polígono de Flumen (Huesca), utilizando datos meteorológicos de un año medio. Se obtiene un razonable acuerdo con los volúmenes facturados por la Confederación Hidrográfica del Ebro a los regantes. Se discuten mejoras posibles del modus operandi en las estimaciones y se propone continuarlas en el futuro para poder establecer eficiencias u otros parámetros del manejo del sistema de riego.

Abstract

Control and measurement of irrigation water is an urgent task in arid and semiarid areas, like the central Ebro valley (Northeastern Spain). This article presents two years of estimations of the volume of water corresponding to the net crop water requirements for an irrigation district in the Ebro valley. Net crop water requirements are estimated using agrometeorological data of an average year. These requirements are coupled to the hectarage of each major crop within the irrigation district in each year to estimate the water volume of net crop water requirements. The hectarages are obtained using satellite and ground data. The estimated volumes reasonably agree with the volumes invoiced by the Water Basin Authority to the farmers. Several possible improvements to the method are discussed. Further application of the method can help to establish efficiencies or other management parameters in the irrigation district.

Servicio de Investigación Agroalimentaria. Diputación General de Aragón.
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC).
Apartado 727, 50080 Zaragoza.
Email: tele@mizar.csic.es

Introducción

La rampante disputa por el agua exige conocer su utilización, sobre todo en regiones áridas, como el centro del valle del Ebro. Aquí el riego representa el 88 % de los usos consuntivos del agua (M.O.P.U., 1990), y aún están por completar planes de riego aprobados a principios de este siglo. El conocimiento detallado y objetivo del destino del agua, desglosado por polígonos de riego y por cultivos, permitiría conocer la eficiencia de cada sistema y detectar posibles anomalías o desviaciones del uso del agua. Ello requiere conocer la superficie ocupada por cada cultivo presente en el regadío, y el agua de riego que necesita.

La conjunción de técnicas de muestreo clásicas y datos de satélite (Mergerson, et al., 1982; M.A.P.A, 1992; J.R.C., 1995) produce estadísticas de superficies de cultivos más objetivas que la información indirecta o las estimaciones de expertos, que aún hoy son la base de algunas "estadísticas" oficiales. Además las estadísticas oficiales no dan cifras para demarcaciones, como son los polígonos de riego, no coincidentes con municipios o sus agregaciones. La Unidad de Suelos y Riegos del Servicio de Investigación Agroalimentaria (S.I.A.) de Aragón ha puesto a punto esa nueva metodología para aforar superficies de cultivos en regadío (Casterad et al., 1992). Además la Unidad dispone de experiencia en distintas metodologías de estimación de la evapotranspiración y las necesidades de agua de los cultivos en la cuenca del Ebro a partir de datos meteorológicos (Faci, 1992; Faci et al., 1994; Martínez-Cob et al., 1995).

En este trabajo se combinan datos meteorológicos, para la estimación de necesidades de agua de los cultivos en el regadío de Flumen (Huesca), con estimaciones de sus superficies obtenidas a partir de datos de terreno y satélite. Finalmente se calculan, para dos años, los volúmenes de agua correspondientes a las necesidades hídricas netas de los cultivos en ese regadío y se comparan con las cifras de agua facturadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E.).

Materiales y métodos

El distrito de estudio es el regadío de Flumen (Huesca), con una extensión de 327 km², una vez descontadas las masas de agua y los núcleos urbanos. La media de precipitación anual es de 525 mm, la temperatura media anual es de 14.3°C, y la media de ET₀ anual es de 1304 mm en el observatorio de Grañén Monte Sodeto (Faci y Martínez-Cob, 1991). Hay un acentuado déficit hídrico en los meses estivales.

Este regadío, de unos 50 años de antigüedad, incluye en su perímetro huertas viejas regadas desde tiempo inmemorial (Bolea, 1986) y algunos enclaves de secano. Predominan las parcelas rectangulares y alargadas menores de una hectárea. El sistema de riego más utilizado es el de superficie, si bien pueden encontrarse algunas parcelas con aspersión. Muchos de los suelos están afectados por salinidad (Herrero y Aragüés, 1988). El agua de riego procede del canal del Flumen, excepto en las huertas viejas que se abastecen de azudes de los ríos Flumen y Alcanadre.

La estimación del volumen correspondiente a las necesidades hídricas netas de los cultivos (V_{net}), realizada para 1993 y para 1994, constó de tres fases: i) aforo de las superficies

de los principales cultivos mediante el método del marco areolar y estimador por regresión con datos de satélite (Casterad et al., 1992; Barbosa et al., 1993); ii) cálculo de las necesidades hídricas netas de los cultivos (Doorenbos y Pruitt, 1977); y iii) multiplicación de la superficie de cada cultivo por sus necesidades hídricas netas.

Para el aforo de superficies se inventariaron cada año 44 unidades de muestreo o segmentos de 500 m × 500 m, elegidos al azar. Se repitió un patrón aleatorio de tres segmentos por bloque, en bloques de 5 km × 5 km, resultando una tasa de muestreo del 3.4%. El inventario de campo se hizo en dos etapas. La primera fue en primavera, del 4 al 18 de mayo en 1993 y del 31 de mayo al 9 de junio en 1994, para inventariar las parcelas-uso de los cultivos que se desarrollan durante invierno y las de los cultivos de verano recién emergidos. En la segunda, del 14 al 24 de junio en 1993 y del 11 al 15 de julio en 1994, se controlaron posibles segundas cosechas y se verificó si había algún cambio en las parcelas anteriormente sin cultivo. De ser necesarias predicciones tempranas, estas operaciones podrían realizarse tan pronto como los cultivos hayan emergido o se conozcan las siembras.

La digitización de la información obtenida permitió conocer la superficie de cada parcela-uso y realizar una primera estimación mediante expansión directa de la superficie ocupada por cada cultivo en el regadío. Para ello, se multiplicó la superficie media de cada cultivo en los segmentos por el número de segmentos posibles en toda el área de estudio.

Estas estimaciones se mejoraron a partir de la clasificación multitemporal supervisada de imágenes del satélite Landsat 5 TM, realizada tras la corrección radiométrica y geométrica de las imágenes. Las áreas de entrenamiento se tomaron a partir de la verdad-terreno inventariada y digitizada. La experiencia de trabajos anteriores aconsejó utilizar al menos dos imágenes de satélite, una de primavera para detectar los cultivos de invierno y otra de verano para los cultivos de esta época. La nubosidad, junto con algunos problemas en la recepción de las imágenes de verano, obligó en 1993 a escoger una imagen del 6 de marzo y otra del 12 de julio. En 1994 las imágenes utilizadas fueron del 28 de mayo y del 29 de junio, ya que las imágenes posteriores tenían nubes en el área de estudio.

La aplicación de un estimador de regresión lineal (Cochran, 1977) que combina los datos de campo con los de la clasificación de las imágenes, proporcionó una nueva estimación mejorada de las superficies. Además, tanto en este caso como en el de la expansión, se obtuvieron los coeficientes de variación de las superficies estimadas y, para aquellos cultivos normalmente distribuidos en la muestra, los intervalos de confianza.

Las necesidades hídricas netas de los cultivos para un año medio se calcularon de acuerdo con la metodología propuesta por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977). En una primera etapa se calculó la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), que representa las necesidades hídricas brutas de los cultivos para su desarrollo óptimo. Para este cálculo se determinaron la evapotranspiración de referencia (ET_0) y los coeficientes de cultivo (K_c)

El método seguido para el cálculo de la ET_0 fue el de FAO Blaney-Criddle (Doorenbos y Pruitt, 1977). Según Faci et al. (1994), la ET_0 calculada por este método presenta una buena correlación con la ET_0 medida en el lisímetro del SIA, si bien se observó que el método conducía a una sobreestimación de la ET_0 de un 14%. A falta de lisímetros en el área de estudio, se supuso la misma sobreestimación, y se aplicó un coeficiente corrector de 0.88 a la

ET, calculada. Los K_c se calcularon a partir de valores tabulados por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) y de información sobre ciclos de cultivos obtenida mediante encuestas a agentes de extensión agraria de la zona (Martínez-Cob et al., 1995).

En una segunda etapa, se calcularon las necesidades hídricas netas de los cultivos (NH_n) descontando la precipitación efectiva (PE), es decir la fracción de precipitación que contribuye a satisfacer la ET. Las NH_n representan la cantidad de agua que ha de suministrarse a la zona radicular del cultivo mediante el riego. La PE se calculó mediante el método propuesto por el Soil Conservation Service de los EE.UU. (Cuenca, 1989).

La metodología FAO no es adecuada para el arroz, que se cultiva bajo inundación con agua corriente. Por ello se han tomado como necesidades de riego las cifras establecidas por Tolosa (1990).

Con los datos obtenidos se han estimado los volúmenes de agua correspondientes a las necesidades hídricas netas de los cultivo mediante la fórmula:

$$V_{\text{rnm}} = S \times NH_n \times 10^{-6}$$

donde para cada cultivo V_{rnm} es el volumen correspondiente a las necesidades hídricas netas del cultivo (hm^3); S es la superficie (ha) estimada; y NH_n son las necesidades hídricas del cultivo ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

Si se deseara calcular las necesidades de agua de riego, las NH_n deberían incrementarse en función de la eficiencia del sistema de riego, que incluiría las necesidades de lavado. La cuestión de las eficiencias y la interpretación de estas estimaciones se discuten más abajo.

Resultados y discusión

El Cuadro 1 presenta la estimación de los V_{rnm} de los principales cultivos del polígono. También incluye las necesidades hídricas netas medias y los aforos de superficie de cada cultivo, datos utilizados en el cálculo de los volúmenes. Además de los cultivos indicados se estimaron también los pinares y las superficies sin cultivo, aunque no se incluyen por carecer de interés en la estimación del agua de riego.

El empleo de las superficies obtenidas por expansión permitiría estimar los volúmenes nada más concluir la campaña de campo y además contabilizar el consumo de agua de riego de los cultivos no clasificados y por tanto no aforados mediante el estimador por regresión. Ahora bien, las superficies estimadas por regresión son más precisas que las de expansión, y en Flumen representan entre el 89 y 95% de la superficie total. Se justifica así su empleo para el cálculo de V_{rnm} .

La confusión espectral entre la alfalfa y las pratenses forrajeras no permitió clasificar a estos cultivos por separado, siendo necesario reagruparlos en una clase denominada alfalfa+forrajera. Esto no dificulta el cálculo de V_{rnm} , pues ambos cultivos tienen similares necesidades hídricas.

Algo parecido ocurre con la cebada y el trigo, pero en este caso la fusión de ambas respuestas espectrales en una respuesta única clasificó peor que si se usaban ambas respuestas por separado y se sumaban las superficies así obtenidas. Como el ciclo de ambos cultivos no es del todo coincidente y sus necesidades hídricas diferentes, se optó por establecer la clase cereal de invierno que engloba cebada y trigo. Utilizando el estimador por regresión, la superficie de cereal de invierno es más precisa (coeficiente de variación de 5.6 en 1993 y 6.7 en 1994) que la de cebada y la de trigo (coeficientes de variación de 8.4 y 18.3 respectivamente en 1993 y de 14.4 y 9.1 en 1994). Por ello se ha utilizado la superficie de cereal de invierno para estimar el V_{neto} total, si bien se presentan también las estimaciones obtenidas para cebada y trigo por separado (Cuadro 1).

El V_{neto} para el cereal de invierno se ha calculado a partir de las necesidades hídricas de la cebada y el trigo. Para ello, la superficie de cereal de invierno se ha repartido proporcionalmente a la superficie de cebada y trigo, aplicando las correspondientes necesidades hídricas a las cifras resultantes.

Cuadro 1.- Necesidades hídricas, superficie y porcentaje de esta respecto al total del área de estudio, de los principales cultivos en 32729 ha del regadío de Flumen (Huesca), y volúmenes estimados correspondientes a las necesidades hídricas netas de los cultivos (V_{neto}).

Cultivos	Necesidades ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	Año 1993			Año 1994		
		Superficie (ha)	%	Volumen (hm^3)	Superficie (ha)	%	Volumen (hm^3)
Arroz	15000	2592	7.9	38.9	3275	10.0	49.1
Alfalfa+forrajera	6740	7005	21.4	47.2	6554	20.0	44.2
Cereal invierno		6706	20.5	15.5	6959	21.3	16.8
Cebada	2210	5050	15.4	11.2	3391	10.4	7.5
Trigo	2610	1749	5.3	4.6	3495	10.7	9.1
Girasol	5040	4672	14.3	23.6	2539	7.8	12.8
Maíz	5710	549	1.7	3.1	2537	7.8	14.5
Total		21524	65.8	128.3	21864	66.8	137.4

Para evaluar las estimaciones ha de tenerse en cuenta que el perímetro de riego incluye enclaves de secano no representados en los planos disponibles, y no delimitables con fiabilidad a partir de las imágenes de satélite adquiridas. El resultado es una sobreestimación del volumen de agua que afecta sobre todo a la cebada, como cultivo predominante en estos enclaves.

Otro aspecto a considerar es el incremento de las siembras de girasol respondiendo a la subvención de la Unión Europea. En 1993 parte del girasol se sembró únicamente para la subvención, sin intención de cosecharlo. Es de suponer que este girasol no se regó, y por ello el volumen de riego estará sobreestimado. Este efecto debió ser menor en 1994 porque la Unión Europea exigió ciertos requisitos para obtener la subvención y se controló más este cultivo. Así, la apreciación visual de los encuestadores y la interpretación de la imagen de satélite llevó, ya en 1993, a considerar que la mitad del girasol sembrado no se regó. Esta suposición parece acertada al comparar la superficie de girasol en 1993 con la de 1994 (Cuadro 1).

Además, para comparar los volúmenes estimados con los suministrados desde el Canal del Flumen según la facturación de agua a los regantes por la C.H.E., debe descontarse el agua de riego aplicada en las huertas viejas. Las huertas viejas del Flumen y Alcanadre, aunque se abastecen de azudes sobre dichos ríos, están incluidas en el polígono de riego del Flumen de cuyo Canal toman agua ocasionalmente, sin que se hayan podido obtener cifras de facturación en ningún año. Estas huertas están bien delimitadas en los planos disponibles, sin embargo su poca extensión y su forma alargada hacen que el muestreo efectuado no permita obtener superficies de cultivo en la huerta vieja por el método descrito. Sin embargo, como la clasificación de las imágenes de satélite fue de exactitud aceptable, se han utilizado las superficies de los cultivos así obtenidas para estimar el volumen (Cuadro 2).

Cuadro 2.- Superficies de los principales cultivos presentes en las 3307 ha de la huerta vieja del regadío de Flumen (Huesca) obtenidas por clasificación de imágenes de satélite, porcentaje respecto al total de huerta vieja, y volúmenes de agua estimados correspondientes a las necesidades hídricas netas de los cultivos (V_{neta}).

Cultivos	Año 1993			Año 1994		
	Superficie (ha)	%	Volumen (hm^3)	Superficie (ha)	%	Volumen (hm^3)
Arroz	252	7.6	3.8	112	3.4	1.7
Alfalfa+forrajera	799	24.2	5.4	994	30.1	6.7
Cereal invierno	539	16.3	1.2	526	15.9	1.4
Cebada	432	13.1	1.0	40	1.2	0.1
Trigo	107	3.2	0.3	487	14.7	1.3
Girasol	486	14.7	2.5	192	5.8	1.0
Maíz	34	1.0	0.2	263	8.0	1.5
Total	2110	63.8	13.0	2087	63.1	12.2

El Cuadro 3 recoge los volúmenes de agua facturados por la C.H.E. frente a los estimados una vez descontados los de las huertas viejas y, para 1993, los 11.8 hm^3 del girasol no productivo. Es de esperar una ligera modificación de los volúmenes cuando se disponga de cartografía de los enclaves de secano. No obstante, la relación (C.H.E./S.I.A) entre ambos volúmenes indica una facturación de la C.H.E alrededor de un 25% superior al volumen aquí estimado.

Cuadro 3.- Volúmenes de agua de riego facturados por la Confederación Hidrográfica del Ebro en el regadío del Flumen (Huesca), frente a los volúmenes estimados por el Servicio de Investigación Agroalimentaria correspondientes a las necesidades hídricas netas de los cultivos.

Año 1993			Año 1994		
C.H.E. hm^3	S.I.A. hm^3	C.H.E./S.I.A.	C.H.E. hm^3	S.I.A. hm^3	C.H.E./S.I.A.
127.6	103.5	1.23	158.6	125.2	1.27

La C.H.E. factura sobre sus aforos en las tajaderas de salida del canal del Flumen los volúmenes pedidos por los regantes. En un regadío de esta antigüedad, cabe suponer que un regante experto incluye empíricamente en los volúmenes pedidos, además de las eficiencias, un margen por exceso para asegurarse el poder completar cada uno de sus riegos. Este exceso sería agua en su mayor parte no evaporada y de cuantía muy sensible a las tarifas. Con este enfoque, las diferencias entre nuestras cifras y las de la C.H.E. pueden achacarse, además de a las anteriores consideraciones, a la necesidad de refinar nuestros cálculos, por ejemplo mediante datos lisimétricos locales.

Otro enfoque sería considerar que no hay peticiones por exceso y que las diferencias entre nuestras estimaciones y las cifras de la C.H.E., cuya fiabilidad hemos de admitir, se deben a la eficiencia. El coeficiente C.H.E./S.I.A. del Cuadro 3, reflejaría que la eficiencia de las conducciones secundarias y de aplicación en parcela son superiores en conjunto al 80%. Como los expertos locales en riego preconizan eficiencias promedio inferiores al 70%, este enfoque indicaría que nuestras estimaciones son altas frente a las facturaciones de la C.H.E.

Debe señalarse que los cálculos se han hecho con datos meteorológicos de un año medio. El hacerlos con datos del año en curso no tendría utilidad predictiva, si bien podría mejorar los resultados. En cualquier caso, si la estabilidad del cociente C.H.E./S.I.A. resulta aceptable, o si la aproximación se juzga suficiente, el método puede aplicarse y calibrarse en otros regadíos que dispongan de aforos del agua suministrada. Ello permitirá estudiar la validez del método para conocer el agua aplicada en regadíos carentes de aforos de agua, por tomarla mediante azudes tradicionales, o por no aportar las entidades gestoras o los particulares los datos de bombeo de pozos o de detracciones de cursos superficiales.

Conclusión

Los volúmenes de agua de riego facturados en el regadío del Flumen para 1993 y 1994 han resultado aproximadamente un 25% superiores a los correspondientes a las necesidades hídricas netas de los cultivos, volúmenes estimados por el método descrito usando datos de un año meteorológico medio. Aunque el método admite aún ciertos refinamientos, se propone el calibrarlo sobre otros regadíos y, en los que no dispongan de aforos del agua aplicada, utilizarlo para estimarla.

Agradecimientos

A la Confederación Hidrográfica del Ebro por facilitar los datos de agua facturada y los planos parcelarios. El presente trabajo es un resultado del proyecto INIA 93-056.

Bibliografía

Barbosa, P.M., Casterad, M.A., Herrero, J., Solé, L. 1993. *Tratamiento de dos imágenes Landsat-5 TM de un regadío para la estadística de superficies de cultivos*. XI Jornadas Técnicas sobre Riegos. Valladolid, 2-4 de junio. pp. 254-261.

Bolea, J.A. 1986. *Los riegos de Aragón*. 2ª edición. Grupo Parlamentario Aragonés Regionalista de las Cortes de Aragón. 579 pp.

Casterad, M.A., Arán, M., Herrero, J., y Albizua, L. 1992. *Estimación de superficies de cultivos en pequeños regadíos mediante encuesta de terreno y datos de satélite*. *Agronomie* 12: 661-668.

Cochran, W. G. 1977. *Sampling techniques*, 3ª ed. N.Y. Wiley & Sons. 428 pp.

Cuenca, R.H. 1989. *Irrigation system design: an engineering approach*. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey. 552 pp.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. 1977. *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y drenaje, 24. Roma, Italia. 194 pp.

Faci, J.M. 1992. *Contribución a la medida y cálculo de la evapotranspiración de referencia en Aragón*. Institución Fernando el Católico, Zaragoza. 125 pp.

Faci, J.M. y Martínez-Cob, A. 1991. *Cálculo de la evapotranspiración de referencia en Aragón*. Diputación General de Aragón. Zaragoza. 115 pp.

Faci, J.M., Martínez-Cob, A. y Cabezas, A. 1994. *Agroclimatología de los regadíos del Bajo Gállego*. Diputación General de Aragón. Zaragoza. 231 pp.

Herrero, J. y Aragüés, R. 1988. *Suelos afectados por salinidad en Aragón*. Surcos de Aragón 9: 5-10.

J.R.C. 1995. *Institute for Remote Sensing Application. Annual Report 93*. Report EUR 15953 EN. European Commission. 127 pp.

M.A.P.A. 1992. *Utilización de imágenes de satélite para la estimación de superficies de cultivos en la provincia de Segovia en 1990*. Boletín Mensual de Estadística 3 (92): 72-92.

Martínez-Cob, A., Faci, J.M. y Bercero, A. 1995. *Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón*. X Premio Jordán de Asso de la Diputación Provincial de Zaragoza. Institución Fernando el Católico.

Mergerson, J.W., Hanuschack, G.A., y Cook, P.W. 1982. *Applications of satellite remote sensing for U.S. crop acreage estimation, 1980-81 results*. 16 th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 2-9 June 1982, Buenos Aires, Argentina. pp. 59-70. Environmental Research Institute of Michigan. Ann Arbor, MI

M.O.P.U. 1990. *Plan Hidrológico. Síntesis de la documentación básica*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Obras Hidráulicas. Madrid. 128 pp.

Tolosa, M. 1990. *El cultivo del arroz*. Informaciones técnicas DGPA. Diputación General de Aragón. Zaragoza. 8 pp.

SISTEMA SOPORTE DE DECISIÓN PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE UNA Balsa DE REGULACIÓN DE AGUA PARA RIEGO.

Reca, J.¹, R. López Luque², E. Camacho¹, F.J. Ariza², J. Roldán¹

¹ Grupo de Investigación en Hidrología e Hidráulica Agrícola.

² Grupo de Investigación en Energía y Recursos Renovables.

E.T.S.I.A.M. Avda. Menéndez Pidal S/N. Apdo 3048. Córdoba 14.071.

RESUMEN.

En este trabajo se presenta un modelo soporte de decisión para la ubicación óptima de una balsa de regulación de agua para riego implementado sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG). La utilización del Sistema de Información Geográfica es la manera más eficaz de definir los condicionantes topográficos que la zona impone a la situación de la balsa.

El modelo implementado sobre el SIG (ILWIS 1.4), evalúa los costes tanto energéticos como de amortización asociados a las diferentes alternativas de situación de la balsa y genera mediante las utilidades del SIG mapas de isocoste de ubicación que orientan al proyectista en la toma de decisiones.

ABSTRACT.

In this work, a computer based decision support system for optimal location of a reservoir for an irrigation system is presented. The model is implemented on a Geographic Information System (GIS). The use of a GIS is the best way to take into account the topographical features of the area where the reservoir could be located.

The model implemented on the GIS (ILWIS 1.4), evaluates the energy and investment costs associated with the alternative locations of the reservoir and generates by means of the GIS capabilities iso-cost maps in order to assist the designer in his decision.

1. INTRODUCCIÓN.

El suministro de agua en redes de riego a presión colectivas con distribución a la demanda suele requerir la disposición de un depósito acumulador en cabecera que actúe como elemento regulador. De este modo, en muchos proyectos de sistemas de riego se ha optado por la solución de realizar una impulsión hasta un depósito, frecuentemente elevado, y una distribución posterior del agua a la zona de riego desde el mismo. Esta solución presenta múltiples ventajas entre las que cabe citar:

- Posibilidad de realizar la elevación desde el punto de abastecimiento de agua hasta este depósito con un punto fijo, lo que permite la regulación del funcionamiento del sistema de bombeo de forma que se obtenga un buen rendimiento de los grupos motobomba (Losada, 1.988).

- La capacidad de almacenamiento permite elevar agua en horas en el que el coste energético es más ventajoso, seleccionar la tarifa más adecuada y establecer una política de bombeo acorde con la discriminación horaria impuesta por la tarifa eléctrica en cuestión. (López Luque y col., 1.992).

- El depósito de regulación es indispensable en aquellos sistemas de riego en los que la fuente de suministro es fuertemente estacional permitiendo adaptar la oferta de agua a las demandas de los regantes. (Aragonés, 1.990).

- Por último, el depósito de regulación permite abastecer la zona regable totalmente, o algunos sectores en particular, directamente por gravedad evitando el posterior rebombeo en las redes de distribución.

Diversos autores (Agüera, 1.986; Aragonés, 1.990) han estudiado la optimización de un sistemas de impulsión hasta depósito elevado suponiendo conocida la cota del depósito. Tradicionalmente en la mayor parte de los casos, estos depósitos se han situado en puntos altos que dominan gran parte de la zona regable, siendo la cota un dato más del proyecto. Sin embargo, esta situación reduce el coste energético en la distribución a costa de aumentarlo en la impulsión hasta el depósito. Por tanto, si se pretende una optimización conjunta del sistema impulsión-distribución, la cota de situación del depósito debe ser considerada como una variable a tener en cuenta.

Por otro lado, las diferentes posibles ubicaciones del depósito de regulación dan lugar a muy distintas redes de riego con costes muy dispares (Martínez y col., 1.993).

Por otra parte, la cota del depósito está condicionada por las características topográficas del terreno, ya que las obras que sería necesario acometer caso de tener que modificar artificialmente la cota natural del terreno, no se justifican por la envergadura de las

mismas debido al gran volumen de almacenamiento necesario.

En este trabajo, se presenta un sistema soporte de decisión que orienta sobre la ubicación óptima del depósito de almacenamiento, la superficie abastecida por gravedad y el número de sectores a considerar. Las características del terreno y de la zona regable son tenidas en cuenta mediante un sistema de información geográfica, que permite el almacenamiento y el análisis de la información espacial. Tomando como base la información almacenada y procesada en el SIG y las relaciones espaciales entre la posición del terreno y su cota, se ha implementado un modelo que permite la optimización de las funciones de costes asociadas a la disposición del depósito.

2. METODOLOGÍA.

2.1. Descripción general del modelo.

Para el estudio de la ubicación del depósito se ha procedido a la valoración de los costes tanto energéticos, como de amortización asociados a cada posible situación del mismo.

El modelo de valoración se realizó en un principio considerando que el agua se capta en un punto de coordenadas conocidas (x_{cpt}, y_{cpt}, z_c) , y es elevada hasta el nivel del depósito a la cota z_d .

El modelo cuantifica los costes energéticos para el sistema considerando que todo el caudal es elevado desde la captación hasta la balsa. Desde esta se abastece por gravedad una porción (αS) de la superficie de la zona de riego que es dominada por la misma, mientras que es necesario rebombear el caudal correspondiente a la fracción de superficie restante $[(1-\alpha)S]$.

Mientras que el coste energético en la impulsión principal crecerá linealmente al hacerlo la cota de la balsa, el de bombeo disminuirá en tanto que menor será la altura de elevación así como el caudal necesario a rebombear por disminuir la superficie por encima de la balsa.

De esta forma, el coste energético en la impulsión principal será:

$$C_p = \frac{\gamma Q(z_d + \Delta h_c - z_c)}{\eta_p} P_{EB} t = \frac{\gamma P_{EB} V}{\eta_p} (z_d - z_c + \Delta h_c) \quad (1)$$

Donde:

- γ : Peso específico del agua,
- Q : Caudal impulsado,
- z_d : Cota del depósito,
- Δh_c : Pérdidas de carga en la impulsión,
- z_c : Cota de la lámina libre en el punto de captación,
- η_p : Rendimiento de los grupos motobomba,
- P_{EB} : Precio de la energía en el bombeo principal,
- t : Tiempo de funcionamiento anual,
- V : Volumen elevado durante el año.

Del mismo modo se establece una ecuación del coste de rebombeo como:

$$C_R = \frac{\gamma Q(1-\alpha)(z_{\max} + h_{req} + \Delta h_d - z_d)}{\eta_R} P_{ER} t = \frac{\gamma P_{ER} V}{\eta_R} (1-\alpha)(z_{\max} + h_{req} + \Delta h_d - z_d) \quad (2)$$

en la que:

- z_{\max} : Cota máxima dentro de la zona regable,
- h_{req} : Altura de presión requerida en cada una de las tomas,
- Δh_d : Pérdidas de carga en la distribución,
- η_R : Rendimiento de los grupos motobomba en el rebombeo,
- P_{ER} : Precio de la energía en el rebombeo principal,

En el modelo se ha considerado que el precio de la energía y el rendimiento del bombeo no son los mismos en la impulsión hasta el depósito y en el rebombeo posterior, ya que es de esperar que tanto precio como rendimiento sean más favorables en el primer caso debido a que la política de bombeo es más acorde a la discriminación horaria y el funcionamiento de los grupos de bombeo se ajustará a un punto de mejor rendimiento.

La fracción $(1-\alpha)$ se estima a partir de la función de distribución de cotas dentro de la zona regable, ya que $F(z)$ indica, para una determinada z , la fracción de superficie dentro de la zona regable con cota igual o inferior a z . Así, la porción α que se puede abastecer por gravedad vendría dada por:

$$\alpha = F(z_d - h_{req} - \Delta h_d) \quad (3)$$

Esta función es obtenida mediante las utilidades del SIG, como se explica en el apartado 2.2.

De este modo la expresión (2) se podrá expresar como:

$$C_R = \frac{\gamma P_{ER} V}{\eta_R} [1 - F(z_d - h_{req} - \Delta h_d)] (z_{max} + h_{req} + \Delta h_d - z_d) \quad (4)$$

Fruto del estudio de optimización de diámetros para diferentes trazados alternativos de la impulsión se ha establecido la proporcionalidad del coste de amortización con la longitud del segmento recto que separa los extremos. Esta relación se ha establecido mediante análisis de regresión; por tanto, su validez debe quedar sujeta a una comprobación posterior de sus predicciones. De este modo:

$$C_A = K_A \sqrt{(x_d - x_{cpt})^2 + (y_d - y_{cpt})^2} \quad (5)$$

De igual modo, mediante la optimización en diámetros de los trazados surgidos al ir cambiando los puntos de cabecera, se estudiaron los costes de las redes de distribución. No se observa una tendencia espacial en el coste de las redes de distribución al variar las coordenadas de los puntos de cabecera dentro de la zona regable. Las variaciones en estos costes se han atribuido al grado de erraticidad asociado a la elección de los trazados (Martínez, 1.993). Sí se observa una tendencia cuando el punto de cabecera se encuentra fuera del recinto regable. Dicha tendencia es de carácter creciente conforme el punto de cabecera se aleja de la zona regable y ha podido ser satisfactoriamente descrita como

$$C_D = K_A \text{dis}(D, ZR) \quad (6)$$

siendo :

C_D : Coste de amortización de las redes de distribución

K_A : Constante de proporcionalidad utilizada en (5),

$\text{dis}(D, ZR)$: Mínima distancia entre un punto externo a la zona regable y ésta.

De este modo la función económica o de coste anual que se considera es

$$C(x, y, z_d) = C_P + C_R + C_A + C_D \quad (7)$$

La metodología anteriormente expuesta puede ser utilizada para valorar la posibilidad de considerar varios sectores en el rebombeo. Así, en el caso de que sean dos los sectores para el rebombeo, la expresión de los costes de rebombeo será

$$C_R = C_{R1} + C_{R2} \quad (8)$$

donde:

C_{R1} : Coste energético para el rebombeo del primer sector, cuyas cotas están comprendidas entre z_d y una cota z_1 intermedia entre la del depósito y la máxima, y

C_{R2} : Coste energético para el rebombeo del segundo sector, cuyas cotas están comprendidas entre z_1 y z_{max} .

Las expresiones desglosadas para C_{R1} y C_{R2} son

$$C_{R1} = \frac{\gamma P_{ER} V}{\eta_R} [F(z_1) - F(z_d - h_{req} - \Delta h_d)] (z_1 + h_{req} + \Delta h_d - z_d) \quad (9)$$

$$C_{R2} = \frac{\gamma P_{ER} V}{\eta_R} [1 - F(z_1)] (z_{max} + h_{req} + \Delta h_d - z_d) \quad (10)$$

La cota de separación entre los dos sectores de rebombeo z_1 deberá elegirse de modo que $(C_{R1} + C_{R2})$ resulte mínimo.

2.2. Tratamiento de la información espacial.

Debido a que la topografía y el perímetro de la zona regable son dos condicionantes básicos a la hora de analizar el sistema y de encontrar la solución más favorable, se han tenido en cuenta estos dos factores introduciendo esta información espacial en un sistema de información del territorio (SIG). Los sistemas de información del territorio están especialmente

diseñados para la adquisición, almacenamiento, procesamiento y análisis de la información espacial así como para la generación de mapas (Meijerink, 1.994).

La primera decisión a adoptar fue utilizar un SIG vectorial o un SIG teselar, eligiéndose este último debido a su mayor simplicidad en los análisis topológicos que se requieren en el estudio.

Para la realización del estudio se utilizó ILWIS 1.4 (ITC ,1.993). Se trata de un SIG de naturaleza teselar que incorpora tanto funciones de análisis espacial como de procesamiento digital de imágenes. Presenta también la ventaja de que está diseñado para funcionar sobre ordenadores personales.

El tratamiento de la información cartográfica consistió en la digitalización del perímetro de la zona regable y de las curvas de nivel a partir de un mapa topográfico a escala 1:10.000 del Servicio Cartográfico del Ejército. La digitalización se realizó mediante el programa de diseño gráfico AUTOCAD, obteniéndose un mapa con información vectorial.

Esta información vectorial se importó a formato ILWIS mediante los ficheros de intercambio DXF. Se obtuvieron dos ficheros resultantes vectoriales, uno con la información de curvas de nivel y otro con el contorno de la zona regable.

Posteriormente el mapa de curvas de nivel se transformó a formato teselar (raster), como paso previo a realizar la interpolación y generar el Modelo Digital del Terreno (MDT), en el cada celdilla del mapa lleva información relativa a su cota topográfica (ver figura nº 1).

El mapa del contorno de la zona regable, inicialmente constituido por un conjunto de líneas sin topología, fue sometido a un análisis espacial que generó una topología de polígonos, con lo se pueden determinar los puntos pertenecientes a la zona regable. Este mapa de polígonos inicialmente vectorial se transformó en mapa teselar para el posterior procesamiento de la información.

A partir de disponer de los mapas teselares con el modelo digital del terreno y la zona regable, el proceso de análisis de la información consistió en generar un modelo de

elevaciones de los puntos pertenecientes a la zona de riego utilizando el mapa de la misma como máscara, con lo que fue posible obtener la función de distribución de las cotas de los puntos de la zona de riego mediante el análisis del histograma del MDT (ver figura nº 2). Esta función será utilizada por el modelo desarrollado para determinar el área susceptible de ser regada por gravedad y el área que requiere rebomeo para cada cota de depósito (ver apdo 2.1).

Del mismo modo, el modelo requiere generar un mapa de distancias de los puntos exteriores a la zona de riego a la misma que fue obtenido mediante las utilidades de análisis del SIG (ver figura nº 3).

Los mapas: Modelo Digital del Terreno de la zona susceptible de ser utilizada para ubicar el depósito y Mapa de distancias a la zona de riego, así como la función de distribución de cotas de la zona de riego, son los elementos básicos que definen la topografía de la zona y la información que se va a utilizar en el modelo de decisión (ver apdo 2.1).

3. APLICACIÓN A UN CASO PRÁCTICO

La metodología descrita fue desarrollada para una zona regable de 2.500 ha para la que se diseñó un riego a la demanda. En la figura 1 se muestra el contorno de dicha zona así como el modelo digital del terreno realizado con un tamaño de celda de 20 m. La cota máxima de la zona regable es de 550 m y la mínima de 350 m. Para la determinación de los costes C_p se tomaron los valores:

$$\Delta h_c = 0.004 \text{ (m.c.a./m)} \quad L \text{ (m)}$$

$$z_c = 400 \text{ m}$$

$$\eta_p = 0.75$$

$$P_{EB} = 7 \text{ ptas/kW-h}$$

$$V = 3500000 \text{ m}^3/\text{año.}$$

$$z_{max} = 550 \text{ m}$$

$$h_{req} = 25 \text{ m.c.a.}$$

$$\Delta h_d = 7 \text{ m.c.a.}$$

$$P_{ER} = 11 \text{ ptas/kW-h,}$$

$$K_A = 3100 \text{ ptas/m/año}$$

La función $F(z)$ fue obtenida a partir del modelo digital del terreno. Su representación

se muestra en la figura 2.

En la figura 3 y 4, se muestran los mapas de la función de costes, $C(x,y,z_d)$, para el caso de un único sector de bombeo y de dos sectores de bombeo respectivamente.

4. CONCLUSIONES

Mediante la metodología expuesta es posible obtener una estimación de los costes energéticos y de amortización derivados de las diferentes posibles ubicaciones del depósito. Las utilidades propias de un SIG raster resultan en este caso fundamentales tanto para poder determinar $C(x,y,z_d)$ como para el estudio de su variabilidad espacial. De este modo la imagen obtenida como representación de costes podrá ser utilizada para tomar una decisión inmediata de dónde ubicar el depósito siempre que no existan otros limitantes (geológicos, de uso, ...). En el caso de existan otros criterios cuantitativos para la ubicación, estos se podrán operar mediante el algebra de mapas conjuntamente con la imagen anteriormente obtenida.

Evidentemente las estimaciones obtenidas serán tanto más precisas cuanto más lo sean la de los parámetros de entrada del modelo. Lo que nos conecta con otras líneas de investigación en las que convendrá seguir avanzando, como es el caso del uso económico de la energía, del conocimiento de los hábitos de los regantes en los sistemas de riego a la demanda o la optimización de los sistemas de distribución.

5. BIBLIOGRAFIA

- Agüera, J. 1986. *Estudio sobre el diámetro más económico de una impulsión*. E.U.I.T. Industriales. Universidad de Córdoba.
- Aragonés, F. 1990. *Optimización de abastecimientos de agua, método de los costes anuales actualizados mínimos. Aplicación al plan de transformación a la zona regable de Palma del Río (Córdoba)*. E.T.S.I. Agrónomos y Montes. Universidad de Córdoba.
- ITC. 1993. *ILWIS 1.4, The integrated land and water information system. User's Manual*. The Netherlands.

- López Luque, R; J. Reca y J. Roldán. 1.992. *Algoritmo de selección y gestión de las tarifas de energía eléctrica en los sistemas de impulsión de agua*. XI Jornadas Técnicas sobre Riegos. Valladolid.
- López Luque R.; J. Reca; E. Camacho; J. Roldán y M. Alcaide. 1993. *Aplicación de las hipótesis de Clement al dimensionamiento óptimo y valoración energética de sistemas de impulsión*. XII Jornadas Técnicas sobre Riegos. Pamplona.
- Losada, A. 1988. *El riego. Fundamentos hidráulicos*. Mundi-Prensa. Madrid.
- Martínez, J. 1993. *Optimización del trazado de tuberías de distribución de agua en grandes zonas regables*. Trabajo Profesional fin de carrera. E.T.S.I.A.M., Universidad de Córdoba.
- Meijerink, A.M.J.; H.A.M. de Brouwer; C.M. Mannaerts; C.R. Valenzuela. 1.994. *Introduction to the use of Geographic Information Systems for practical hydrology*. ITC. The Netherlands.

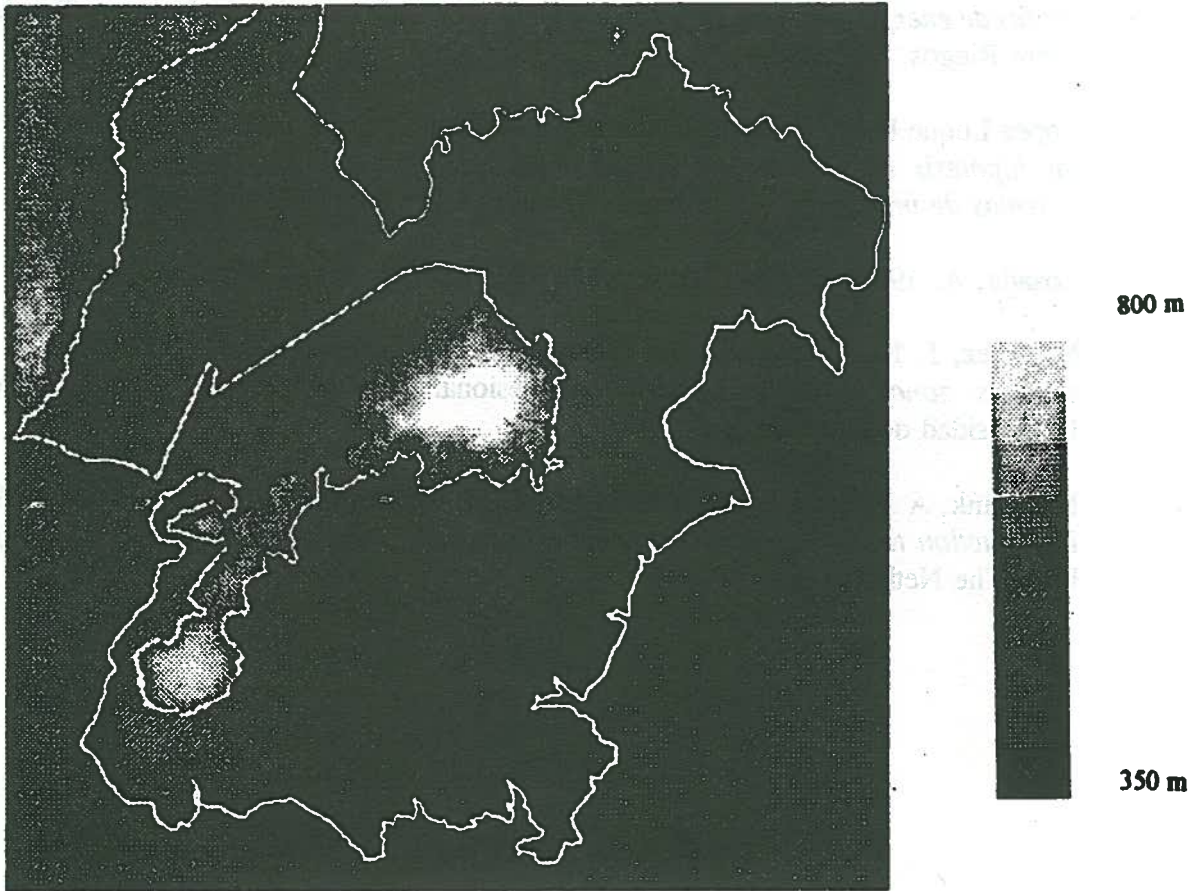


Figura 1. Modelo Digital del Terreno.

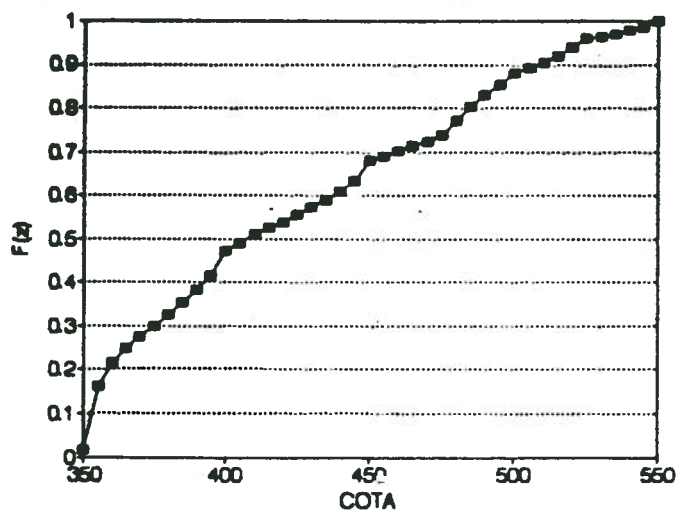
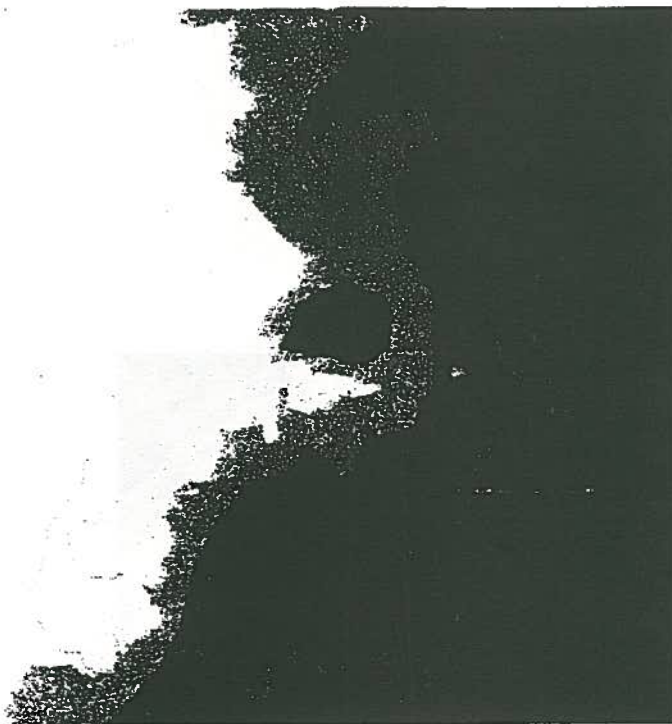


Figura 2. Función de la distribución de cotas.



Figura 3. Modelo Digital de Distancias a la Zona Regable.



ISOCOSTES ANUALES PARA UN BOMBEO

Costo	10 000	Planano
Costo	15 000	Planano
Costo	20 000	Planano
Costo	25 000	Planano
Costo	30 000	Planano
Costo	35 000	Planano
Costo	40 000	Planano

Figura 4. Modelo de Isocostes anuales bajo la consideración de un rebomdeo.



ISOCOSTES ANUALES PARA DOS BOMBEO

Costo	30 000	Planano
Costo	35 000	Planano
Costo	40 000	Planano
Costo	45 000	Planano
Costo	50 000	Planano
Costo	55 000	Planano
Costo	60 000	Planano

Figura 5. Modelo de Isocostes anuales bajo la consideración de dos rebomdeos.

AHORRO ENERGETICO EN EL DISEÑO DE UNA RED DE IMPULSION Y DISTRIBUCION DE AGUA PARA RIEGO

Pulido, I.(P) y J. Roldán.

Departamento de Agronomía. E.T.S.I.A.M. Universidad de Córdoba. Apdo. 3048. 14080 Córdoba.

RESUMEN

La influencia del ahorro y de la eficiencia energética en el diseño de una red de impulsión y distribución de agua para riego ha sido el objeto principal de este trabajo. El estudio consta de dos bloques fundamentales. El primero se basa en la determinación de la tarifa eléctrica más apropiada y en la elección de la discriminación horaria que sea más favorable. En el segundo se acomete la optimización de la red incorporando, como novedad al proceso, los resultados anteriores.

Para la elección de la tarifa se ha realizado una comparación de las facturaciones posibles según las disposiciones vigentes. Se concluye que, tanto en baja como en alta tensión, las tarifas R. de riegos agrícolas son las más económicas. Las comparaciones necesarias para decidir la modalidad de discriminación horaria más conveniente dependerán del régimen de funcionamiento de la instalación. Teniendo en cuenta lo anterior, se ha realizado un análisis de sensibilidad del coste de la red a la variación del tiempo de aplicación del riego. El resultado aconseja utilizar frecuentemente en los períodos de consumo punta tanto las horas de coste bajo como las de medio.

La optimización de la red incluye tanto tuberías como grupos de bombeo. El funcionamiento de los grupos de bombeo se adapta al caudal demandado por la red, mediante la incorporación de accionamientos de velocidad variable. Así se suministran todos los caudales con la presión necesaria funcionando cada una de las bombas con un rendimiento aceptable.

ABSTRACT

The influence of energy efficiency and energy savings in the design of a distribution network for irrigation water is the main objective of this work. This study is constituted of two main parts. The first one deals with the determination of the most appropriate electrical rate and the choice of the best hours for electricity consumption. In the second one, the network design is studied having into account the previous results in the optimization process.

The selection of electrical rate has been done considering the several possibilities that are legally allowed. Results show that the R. rates are more economical for both high and low voltages. The comparisons we have to do in order to decide about the best hours for electricity consumption will depend on the working regime of the pumping plant. Having into account the former, a sensitivity analysis of network cost to irrigation application time has been done. Results demonstrate that water has to be usually applied as in low cost hours as in those of medium cost during peak demand periods.

The optimization process of irrigation network considers both pipelines and pumps. The use of variable speed pumps allows pumps to give the exact flow discharge requested by the irrigation network. In this way, all flow discharges were supplied with the required pressure while pumps work with a good efficiency.

1. INTRODUCCION

Los gastos de energía eléctrica en la agricultura suelen ser en la actualidad de gran magnitud, condicionando la rentabilidad de muchos cultivos. Una adecuada política de ahorro y eficiencia energética en este sector permitirá:

- Ahorro de recursos naturales y reducción de impactos ambientales.
- Importantes ahorros en la facturación energética de los consumidores.
- Alargar la vida útil de las centrales eléctricas y racionalizar la utilización de las redes de transporte y distribución, evitando así que se tengan que realizar nuevas inversiones en generación o en el trazado de líneas, que, por otro lado, repercutirían asimismo, en el coste para los usuarios.

Este estudio se centra en la aplicación de medidas de fomento del ahorro y la eficiencia energética en el diseño de una red de impulsión y distribución de agua para riego. Debido a que el diseño de una red depende de una serie de variables y parámetros que son función de las características de la zona regable, se ha seleccionado a título de ejemplo la zona regable de Fuente Palmera, ubicada en el término municipal que le da nombre en la provincia de Córdoba.

Los objetivos que se han pretendido cubrir son los siguientes:

- Determinación de la tarifa eléctrica que sea más favorable de forma general en las zonas regables, ya que el tipo de contrato que se suscriba con la compañía suministradora de energía eléctrica tiene una influencia decisiva en el coste final del kWh.
- Análisis de sensibilidad del coste de la red a la variación del tiempo de aplicación del riego, parámetro de diseño que afecta significativamente al modelo de tarificación eléctrica.
- Optimización de la red de impulsión y distribución de agua que incluirá tanto tuberías como grupos de bombeo. En el segundo caso, para aprovechar ventajosamente la tarifa eléctrica diferencial, se analiza la incorporación de grupos de velocidad variable, procurando que el bombeo se ajuste, en lo posible, a la demanda.

2. METODOLOGIA

2.1. Determinación de la tarifa eléctrica y elección de la discriminación horaria

Existe la posibilidad de contratar distintos tipos de tarifa según sea el suministro en alta o en baja tensión (tensiones superiores o no a 1000 V). No obstante, algunas no están indicadas por sus características para uso agrícola y otras tienen poca generalidad.

Con las tarifas posibles se ha realizado una comparación de las facturaciones según las disposiciones vigentes, usando los precios de los términos de potencia y energía actualmente vigentes (O.M. 12-1-1995). En los diversos supuestos, se ha considerado que se han adoptado las medidas oportunas para compensar el factor de potencia hasta un valor de 0.9, por lo que no existirán recargos ni descuentos por energía reactiva.

Las comparaciones necesarias para decidir la modalidad de discriminación horaria más conveniente en una red colectiva de riego, dependerán de que se conozca el régimen de funcionamiento de la instalación. Por ello, se plantean dos hipótesis diferentes:

- El riego se realiza por el día indicando el valor mínimo (aprovechar todas las horas llano) y el valor máximo del término de energía (utilizando todas las horas punta).
- El riego se realiza por la noche utilizando las horas valle y, si es necesario, algunas horas llano.

Asimismo, se analizan tres alternativas posibles del parámetro tiempo de aplicación del riego: 8, 12 y 16 horas.

2.2. Redes de distribución

El sistema de impulsión de agua (grupos de bombeo más red principal de distribución) se ha diseñado para utilización a la demanda, donde el agua permanece a disposición del agricultor durante las 24 horas del día.

El sistema de regulación clásico para aspersión a la demanda, es el uso de un depósito intercalado entre la estación de bombeo y la red de distribución, que compensa, relativamente, los déficits de caudal entre oferta (fija) y demanda (variable). En la zona regable donde se aplica la metodología desarrollada (Fuente Palmera), la búsqueda de un emplazamiento con cota suficiente para distribuir posteriormente por gravedad a la red aleja excesivamente el depósito de la zona de consumo. Por ello, se ha recurrido a la solución de inyectar directamente a red. No obstante, se ha adoptado la alternativa de la división de la impulsión en dos etapas, lo que permite alturas más usuales para la segunda impulsión, paliar los problemas que un NPSH elevado pueden plantear en la captación del río Guadalquivir al aumentar el caudal de elevación, reducir timbrajes en las tuberías, el uso de bombas más simples y abaratar los costes de energía. La primera etapa, se realiza hasta un depósito fijo que, a su vez, se constituye en cámara de aspiración de la segunda impulsión.

En el diseño de la red surgen multitud de opciones para el dimensionamiento de los elementos constituyentes de la instalación. En este trabajo se ha utilizado un programa de ordenador de optimización de redes ramificadas (López Luque y col., 1992) para el dimensionamiento de las tuberías que proporciona la curva poligonal coste de tuberías-altura piezométrica en cabecera. Para decidir cual es la distribución de diámetros más económica es preciso determinar la altura en origen más interesante. Esta altura se ha calculado mediante un estudio económico independiente, ya que se incluye en el coste energético de la red de distribución el término de potencia y las posibles discriminaciones horarias que en el anterior programa no eran consideradas.

A menores tiempos de riego, mayores serán los caudales circulantes por cada tramo de la red colectiva, lo que supondrá un encarecimiento de la instalación (mayor diámetro de tuberías y mayores grupos de bombeo). En contrapartida, este menor tiempo de riego

permitirá utilizar sólo las horas bonificadas de tarifa eléctrica y, por tanto, el coste energético disminuirá. Por ello, se realiza un análisis de sensibilidad del coste de la red a la variación de dicho tiempo de riego.

2.3. Diseño de la estación de puesta en carga de la red

La estación de bombeo de toma impulsa a una altura prácticamente constante (depósito), siendo el carácter de funcionamiento automático en función de los niveles de agua en el depósito regulador.

Para la valoración energética de la estación de puesta en carga de la red es necesario caracterizar el caudal demandado por la red en la campaña de riego. La función de probabilidad asociada al caudal en toda la campaña se obtiene aplicando la metodología propuesta por López Luque y col. (1995).

La campaña se ha dividido en períodos mensuales los cuales tienen unas determinadas necesidades de riego que son inferiores a las necesidades del período punta para el que se diseña el sistema de impulsión. Por tanto, las probabilidades de funcionamiento del sistema son diferentes en cada período considerado.

El caudal demandado por cada período ($f_j(Q)$) se adapta a una función de distribución normal, cuyas media (μ_j) y varianza (σ_j^2) vienen dadas por:

$$\mu_j = \frac{N_j}{t} \cdot S_t \quad (1)$$

$$\sigma_j^2 = (p_j - p_j^2) \cdot \frac{N^2}{t'^2} \cdot \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (2)$$

donde: N_j = necesidades de riego en el período j.
 S_t = superficie de riego total.
 t = tiempo disponible para riego.
 p_j = probabilidad de funcionamiento de la red en el período j.
 N = necesidades en el mes punta.
 t' = tiempo de riego en el período punta.
 S_i = superficie asociada a la boca i.

Una vez conocidas las funciones de densidad asociadas al caudal en cada período, la función de densidad asociada al caudal para toda la campaña de riego se obtiene como media de $f_j(Q)$, al ser los períodos considerados homogéneos.

La estación de puesta en carga de la red debe constar de los elementos necesarios para suministrar un caudal variable en función de la demanda que experimente la red de riego. La impulsión directa obliga a fraccionamientos excesivos de la potencia para mantener altos rendimientos de operación. Esto se puede paliar con la incorporación de accionamientos de variación de velocidad en los grupos motor-bombas, que además permiten aprovechar ventajosamente las reducciones de tarifa eléctrica en función de la discriminación horaria seleccionada.

Las curvas características de una bomba girando a velocidad diferente a la usual indicada en el catálogo, se puede obtener haciendo uso de la teoría de la semejanza. En función de la relación entre velocidad de giro y la velocidad de giro nominal (α), las curvas características de una bomba se ven modificadas de manera que las expresiones a utilizar son:

$$H = A \cdot \alpha^2 + B \cdot Q \cdot \alpha + C \cdot Q^2 \quad (3)$$

$$\eta = \frac{D}{\alpha} \cdot Q + \frac{E}{\alpha^2} \cdot Q^2 \quad (4)$$

donde A, B, C, D y E son los coeficientes de los polinomios de segundo grado que se obtienen mediante análisis de regresión a partir de los puntos obtenidos de las curvas dadas por el fabricante.

La regulación en sistemas con bombas de velocidad variable se basa en la modificación "continua" de la velocidad de giro de las bombas, a fin de adaptarse a la curva característica del sistema de distribución. Dicha regulación se puede efectuar con todas las bombas de velocidad variable girando a la misma velocidad de rotación (regulación compartida), o variando sólo la velocidad de giro de una de las bombas instaladas mientras los demás son grupos de velocidad constante que permanecen en funcionamiento a velocidad nominal o parados (regulación escalonada). Asimismo, se pueden combinar los dos casos anteriores: utilizando sólo bombas de velocidad variable de modo que conforme aumenta el caudal van entrando en funcionamiento los grupos en reposo en el momento que los grupos en funcionamiento lleguen a las velocidades máximas de giro (García-Serra y Moreira, 1992).

El rendimiento de los equipos según se utilice una u otra forma de regulación variará, por lo que el resultado final (en lo que se refiere a costes energéticos) será diferente. Es por ello por lo que se han probado diferentes soluciones, realizando una simulación de costes energéticos. Para ello se ha utilizado una modulación de una supuesta demanda diaria que representa un ciclo de altos consumos (Wood y Reddy, 1994).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Tarifa eléctrica y discriminación horaria

Después de efectuar las comparaciones citadas en el apartado 2.1, se concluye que en baja tensión siempre resulta más beneficiosa la facturación en la tarifa R.0. En alta tensión, las tarifas de riegos agrícolas (R.) son las más beneficiosas hasta alcanzar un límite de funcionamiento que depende del valor del coeficiente de discriminación (K_p) prefijado (unas 500 horas mensuales para $K_p = 0$, mayor de 500 horas mensuales para $K_p < 0$ y menor a 500 horas mensuales para $K_p > 0$), punto a partir del cual serán más económicas las tarifas generales de larga utilización (3.).

Los mejores valores de K_p para reducir la facturación serán los negativos, a los que corresponde un límite de funcionamiento entre tarifas R. y tarifas de larga utilización (3.) mayor a 500 horas mensuales. Dado que el tiempo de funcionamiento de la red en zonas de riego no va a alcanzar las 500 horas mensuales, se deduce que es preferible contratar la tarifa R.

El sistema de discriminación horaria más adecuado es el contador de triple tarifa con discriminación de sábados y festivos (discriminación tipo 4). Procurando no utilizar la energía en punta y siempre en valle se pueden obtener ahorros entre el 20 y el 40% del término de energía de la facturación.

3.2. Análisis de sensibilidad

El resultado obtenido realizando el análisis de sensibilidad es que la función de costes es menor para un tiempo de riego de 16 horas. En la tabla 1 se relacionan las soluciones más económicas para cada uno de los tiempos de riego analizados.

t' (h)	H (m)	Q (m ³ /s)	Ctuberías (pta/año)	Cbombeo (pta/año)	Cenergía (pta/año)	Ctotal (pta/año)
8	103.68	5.23	52761787.8	145 282.9	69453224.8	133666295.5
12	101.3	3.48	43476607.4	7444681.9	82203858.0	133125147.3
16	99.99	2.61	37144048.9	5911306.8	88230375.1	130885730.8

Tabla 1. Resultados del análisis de sensibilidad

De este modo se demuestra que en riego a la demanda, si los regantes conocen los ahorros en horas bonificadas de tarifa eléctrica podrán compensar los gastos de instalación e incluso beneficiarse. No obstante, si todos los regantes usan sólo las horas valle (8 horas) se limita en gran medida su libertad a la vez que se encarece la instalación, en parte por la simultaneidad y en parte porque el tiempo de riego es escaso. La solución más adecuada es utilizar sólo las horas de tarifas más bajas cuando el número de horas de funcionamiento es bajo, y por el contrario, cuando el número de horas de funcionamiento es elevado habrá que considerar la alternativa de tener que utilizar frecuentemente tanto las horas de coste bajo como las horas de coste medio.

3.3. Coste energético de la instalación de bombeo de carga con diferentes posibilidades de regulación de los grupos

En la figura 1 se representan las funciones de densidad de los meses de abril a octubre de la campaña de riego y la función de densidad asociada a la distribución de caudales para toda la campaña, calculadas de acuerdo a lo expresado anteriormente en el apartado 2.3. Se verifica la gran variabilidad del caudal demandado por la red y, por tanto, la consecuente necesidad de una regulación adecuada de los grupos motor-bombas de la estación de puesta en carga de la misma.

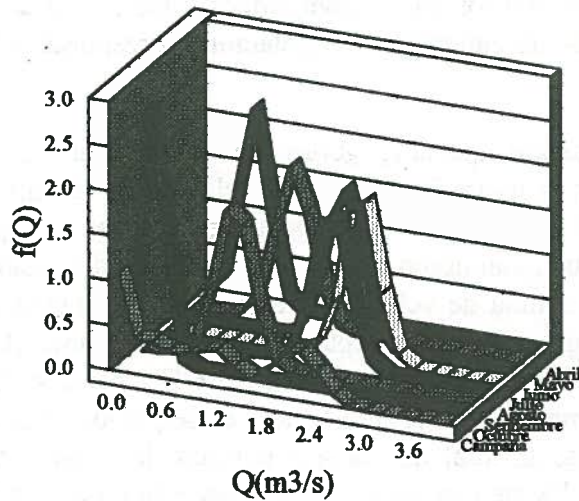


Figura 1. Caracterización de caudales

La reducción del consumo de energía es el punto más evidente del ahorro en costes al usar los accionamientos de variación de velocidad. Sin embargo, los ahorros pueden proceder de otras áreas, tales como mantenimiento, productividad, fiabilidad y longevidad del equipo (Karassik y Petraccaro, 1990), que compensarán al mayor coste de inversión en los grupos al haber incluido los variadores de velocidad —un accionamiento de frecuencia variable tiene un precio alto, ya que su coste es muy similar al del grupo motor-bomba al que acompaña—. El mantenimiento del valor del rendimiento próximo al punto óptimo de diseño supone menor carga en cojinetes, menor deflexión en el eje, menor desgaste de la empaquetadura y, en general, mayor duración de todas las piezas sometidas a desgaste. Ello conduce directamente a la reducción de costes de mantenimiento, y de modo indirecto, a través de la mayor fiabilidad, a una mejor productividad.

En la tabla 2 se relaciona el coste del término de energía para un día laborable con diferentes posibilidades de regulación.

Regulación	Coste (pta/día)
Compartida	614836
Combinada	546309
Escalonada	561795
Fija	580785

Tabla 2. Coste diario del término de energía con diferentes posibilidades de regulación

Se elige la alternativa de la regulación escalonada, con una bomba de velocidad variable y cinco bombas de velocidad fija, al ser la solución que equilibra los costes de inversión de la instalación con los costes energéticos y los costes de explotación. Dentro de cada uno de los intervalos de caudales, la regulación corresponde a la bomba de velocidad variable.

El suministro de caudales queda asegurado en todo instante con valores de rendimiento aceptables como se ve en la figura 2. A partir de velocidades de giro iguales o superiores al 85% de la velocidad de giro nominal, se puede ver que las dos primeras "zonas útiles" (correspondientes al funcionamiento con una bomba de velocidad variable, y al funcionamiento con una bomba de velocidad variable y una bomba de velocidad constante, respectivamente) (ver figura 3) están separadas por una franja (0.435 a 0.62 m³/s). El rendimiento en esta zona no es aceptable (menor al 60%; Mataix, 1975), pero dado que el caudal que trasiega la bomba de velocidad variable es pequeño, y por lo tanto la potencia que está consumiendo respecto al total de las seis bombas, los costes energéticos no se verán excesivamente afectados. Existe una forma de soslayar este problema haciendo funcionar a la bomba de velocidad variable hasta el caudal de 0.62 m³/s a una velocidad de giro superior a la nominal, para lo que sólo es necesario una elección adecuada de dicho grupo.

4. CONCLUSIONES

Las tarifas eléctricas más económicas para una red colectiva de riego son las tarifas R de riegos agrícolas.

Los discriminadores horarios tipo 4 son los más adecuados cuando se pueda evitar el consumo en horas punta ya que entonces el recargo es del 100%.

Cuando el número de horas de funcionamiento de la instalación es elevado habrá que utilizar frecuentemente tanto las horas de coste bajo como las horas de coste medio.

El uso de bombas equipadas con motores de frecuencia variable proporciona la capacidad para conseguir mejoras significativas en la explotación eficiente de sistemas de distribución de agua, lo que vendrá acompañado de un ahorro energético y de una disminución de los costes de explotación.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido posible gracias al convenio específico firmado en Abril de 1995 entre la Fundación Sevillana de Electricidad y la Universidad de Córdoba.

En el apoyo informático se agradece la colaboración de Juan Carlos Gutiérrez Estrada.

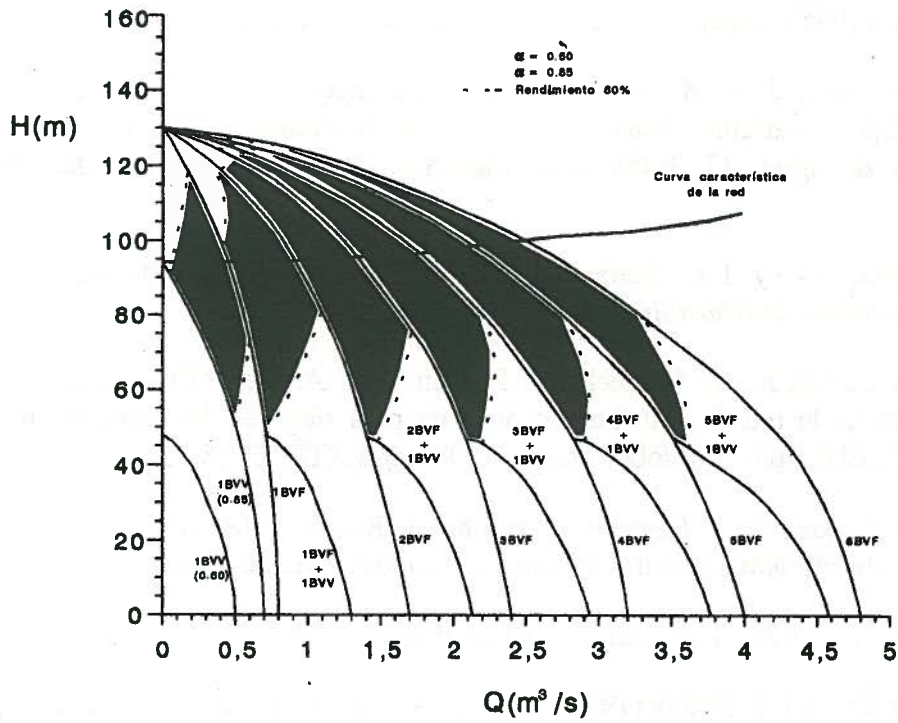


Figura 2. Curvas características de la red y de las bombas con $\alpha=0.60$

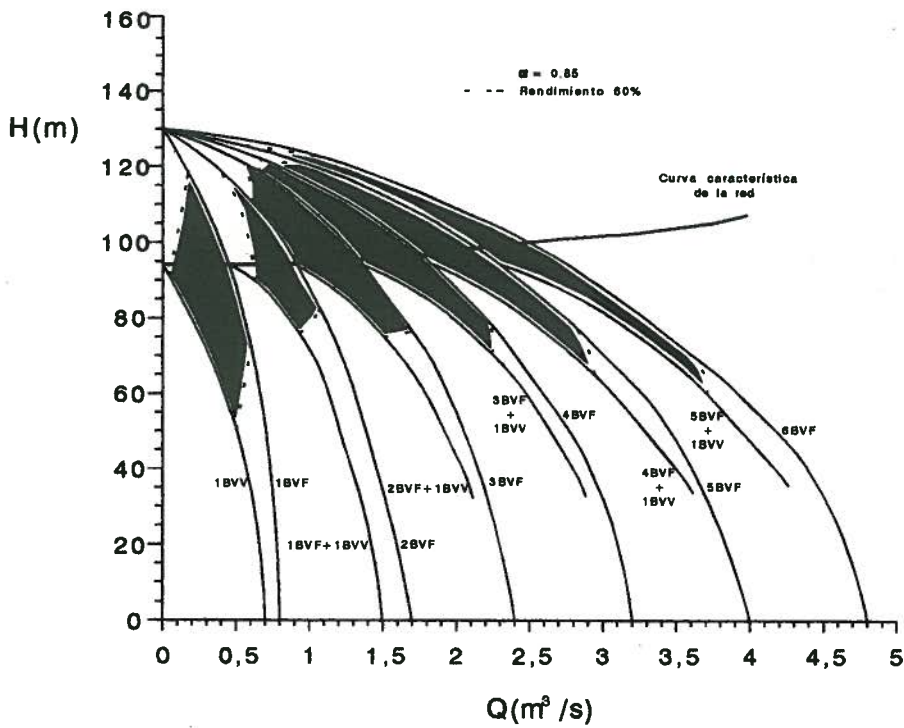


Figura 3. Curvas características de la red y de las bombas con $\alpha=0.85$

6. BIBLIOGRAFIA

- B.O.E. (1995). Orden Ministerial del 12 de enero. *Tarifas eléctricas*, 238-273.
- García-Serra, J. y M. Moreira (1992). La inyección directa a red con grupos de velocidad fija y variable. *Curso de ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua*, 17. Edita U.D. Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia.
- Karassik, I.J. y L.L. Petraccaro (1990). Accionamientos de frecuencia variable. *Separatas técnicas de Whorthington*.
- López Luque, R.; E. Camacho; J. Roldán y M. Alcaide (1992). Metodología para la optimización de la red de distribución de agua para riego en los términos municipales de Villafranca y El Carpio (Córdoba). *Riegos y Drenajes XXI*, 65: 18-22.
- López Luque, R.; J. Reca; E. Camacho; J. Roldán y M. Alcaide (1995). Valoración energética y diseño óptimo de impulsiones con caudal variable. *Ingeniería del agua*, 2: 19-24.
- Mataix, C. (1975). *Turbomáquinas hidráulicas*. I.C.A.I., 1371 pp.
- Wood, D.J. y L.S. Reddy (1994). Control de bombas de velocidad variable y modelos en tiempo real para minimizar fugas y costes energéticos. *Mejora del rendimiento y de la fiabilidad en sistemas de distribución de agua*, 177-207. Edita E. Cabrera; U.D. Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia; A.F. Vela y Universidad Jaime I de Castellón.

LA UTILIZACIÓN DE GEOTEXILES EN LA CONSTRUCCIÓN DE EMBALSES.

por

José Antonio Baso López ¹

Resumen:

El frecuente empleo de los geotextiles en las obras de aprovechamiento hidráulico contrasta con la ausencia de una normativa específica relativa a las características de estos materiales y a su puesta en obra.

En el presente trabajo se exponen algunas conclusiones sobre especificaciones técnicas recomendadas para los materiales, instrucciones de trabajo y control de ejecución, dictadas por la dilatada experiencia de uso de los geotextiles en presas de materiales sueltos e impermeabilización de embalses. En el primer caso han sido empleados como filtros bajo escolleras en el talud de aguas arriba y en la envuelta de capas drenantes; en el segundo caso se han empleado para la protección de geomembranas.

Summary:

Geotextiles are frequently used in hydraulic regulation projects. This fact is in opposition with the lack of prescriptions about specific standards and employment of this materials.

This article exposes some conclusions about technical characteristics recommended for the materials, work instructions and quality control, obtained from the long experience in their employment in earth dams and reservoirs impermeability. The main applications in dams are as separators under the rip-rap on the upstream face and filter structures. Geotextiles are too employed for physical protection of geomembranes.

1. Introducción

A mediados de los años 80 se generalizó el empleo de geotextiles en las obras de aprovechamientos hidráulicos, especialmente como filtros bajo escolleras en paramentos del talud de aguas arriba de presas de materiales sueltos y en función de filtro en torno a capas drenantes en las mismas (drenes de pie y de chimenea). Otro uso muy frecuente ha sido para la protección de geomembranas de impermeabilización en embalses para riego y lagunas de estabilización de aguas residuales.

La experiencia de TRAGSA, como empresa constructora en el empleo de estos materiales en los usos descritos permiten formular unas ciertas recomendaciones que en este trabajo exponemos, considerando de interés su divulgación dada la ausencia de criterios normalizados en relación con las prescripciones de estos materiales y su puesta en obra.

¹ Ingeniero Agrónomo. Empresa de Transformación Agraria, S.A. (TRAGSA). Dirección de Producción - Madrid.

2. Conceptos

Los geotextiles son productos geosintéticos constituidos principalmente a partir de fibras de polímero (polipropileno ó poliéster) estiradas y unidas por diferentes procedimientos, cuyas propiedades hidráulicas y mecánicas hacen de los mismos materiales aptos para una amplia gama de usos en la ingeniería civil.

Se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Tejidos.
 - De hilos:
 - * De monofilamentos.
 - * De multifilamentos.
 - De cintas.
- No tejidos.
 - De filamento continuo:
 - * Agujeteados.
 - * Termosoldados.
 - De fibra corta:
 - * Agujeteados.
 - * Termosoldados.

Las funciones que hacen los geotextiles pueden ser:

- Separación de dos materiales de diferentes Propiedades físicas, evitando de forma permanente su mezcla.
- Filtración, reteniendo las partículas finas al fluir agua de una capa de grano fino a otra de grano grueso, ambas separadas por el geotextil.
- Drenaje o facultad de conducción de líquidos y gases, permitiendo su evacuación del suelo.
- Refuerzo, mejorando la capacidad portante del suelo y la estabilidad de la construcción de taludes y muros.
- Protección mecánica de geomembranas.
- Impermeabilización, mediante la formación de una capa que impida el paso de líquidos al impregnar el geotextil con determinados productos.

3. Campos de aplicación y funciones específicas

3.1. *Presas de Materiales sueltos*

En sustitución de filtros naturales y como separador de materiales.

- Campos de aplicación específicos en presas de materiales sueltos:

Filtros bajo escollera, en el paramento aguas arriba.

- Separación de zonas de diferente granulometría en el cuerpo de presa (por ejemplo, el núcleo y los espaldones).
 - Filtros en torno a capas drenantes (por ejemplo, drenes horizontales, drenes tipo chimenea y drenes de fondo).
- Funciones del geotextil: Separación y filtración.
 - Tipos de geotextil que pueden emplearse: Tejidos, tanto de hilos (monofilamentos y multifilamentos) como de cintas, y no tejidos de filamento continuo agujeteados.

3.2. Impermeabilización de balsas

Para protección de las geomembranas, drenaje de aguas infiltradas y evacuación de gases.

- Funciones del geotextil: Refuerzo, drenaje y protección.
- Tipos de geotextil que pueden emplearse: No tejido de filamento continuo agujeteado, (el de poliéster no se empleará si hay contacto con hormigones ó morteros, ni en vertederos).

4. Especificaciones técnicas

Dada la amplia experiencia de que se dispone en el empleo de estos productos, existen unas recomendaciones comúnmente admitidas en cuanto a especificaciones en los usos más frecuentes, para los geotextiles de filamento continuo agujeteados de polipropileno y de poliéster, que se exponen en el Anejo nº 1.

Los geotextiles serán suministrados a obra siempre en rollos, protegidos con una envoltura externa de material plástico impermeable.

Desde su recepción en obra hasta su empleo, se almacenarán en condiciones que garanticen que no se destruirá su envoltura.

El lugar de almacenamiento deberá contar con condiciones de seguridad, dada la frecuencia de los hurtos de este tipo de material.

Durante el almacenamiento se preservará al material de la lluvia y se evitará la exposición de los geotextiles de polipropileno, durante largos períodos, a los rayos solares, ya que pueden ser dañados por la radiación ultravioleta.

En la manipulación de los rollos, dado el elevado peso de los mismos, se emplearán medios adecuados (carretillas elevadoras preferentemente), evitando su arrastre. Si se utilizan otros medios, tales como palas cargadoras o

retroexcavadoras, la suspensión de los rollos se hará empleando un eje eslingado por sus extremos.

5. Procedimientos de Ejecución de las operaciones

5.1 Presas de materiales sueltos

El geotextil se desenrollará directamente sobre la superficie a cubrir. Las uniones entre bandas se harán solapando, cosiendo ó soldando (esto último no se hará con geotextiles de poliéster). Las tiras solapadas se colocarán cubriendo la pendiente. El solape mínimo será de 30 cm. sobre superficies regularizadas y de 50 cm. sobre superficies irregulares o materiales de baja consistencia. En las uniones transversales se colocará el extremo del nuevo rollo por debajo del extremo del rollo anterior. Deben evitarse las uniones en sentido longitudinal. Si la unión se realiza por soldadura se solapará un mínimo de 10 cm, sin importar el sentido de las juntas y la dirección de colocación; se acercará la llama de gas (ancha y de baja temperatura) hasta 20 cm. aproximadamente del geotextil; los rollos se desenrollarán y soldarán de forma continua, presionando inmediatamente el geotextil mediante rodillo.

Los materiales se extenderán sobre el geotextil con los medios mecánicos existentes, con el cuidado necesario para no dañar el geotextil. Cuando se trate de descarga de piedras que, por su tamaño, pudieran quedar retenidas en un enrejado de 50x50 cm., se recomienda colocar sobre el geotextil una capa protectora de grava cuyo tamaño medio sea la cuarta parte del de las piedras.

La compactación del material sobre el geotextil será estática o vibratoria según sea la naturaleza de la subrasante y de dicho material.

5.2 Impermeabilización de balsas

En protección de geomembranas, si la unión entre bandas del geotextil se hace por soldadura, el solape será de 10 cm. y si es por simple solape, deberá ser de 30 cm. como mínimo. El anclaje en la coronación deberá hacerse, junto con la geomembrana, en zanjas de anclaje, a más de 75 cm. de la arista superior del talud, con una profundidad mayor de 60 cm. y una anchura que supere los 40 cm.

6. Control de calidad

6.1 Inspecciones y ensayos

En el anejo nº 2 se exponen las inspecciones y ensayos necesarios según el campo de aplicación del geotextil. A continuación se enumeran las inspecciones y ensayos que pueden efectuarse.

* Control visual a la recepción

- Parámetros:
 - Marca de identificación comercial
 - Marca de masa (peso) por unidad de superficie.
 - Dimensiones de los rollos que figuran en la documentación que acompaña al lote (ancho y longitud total del geotextil que va en cada uno).
 - Estado de la envoltura externa.
- Procedimiento: No se reseña.
- Tipo: Inspección visual
- Frecuencia: Esta inspección se realizará sobre el total de los materiales recibidos.

* Masa por unidad de superficie

- Parámetro: Masa por unidad de superficie.
- Procedimiento:
 - Preferentes: Normas DIN 53854 y ASTM D3776.
 - Otros: Norma NFG 38013.
- Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
- Frecuencia: Un ensayo cada 2.000 m² y siempre uno por lote.

* Resistencia al punzonamiento

- Parámetro: Resistencia al punzonamiento.
- Procedimiento:
 - Preferentes: Normas DIN 54307 y ASTM D 751-mod.
 - Otros procedimientos: Normas SN 640 550 y BS 6906/4.
- Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
- Frecuencia: Un ensayo cada 5.000 m² y siempre uno por pedido.

* Resistencia al reventón

- Parámetro: Resistencia al reventón.
- Procedimiento:
 - Preferentes: Norma ASTM D 3786.
 - Otros: Normas DIN 53861 Y NFG 07-112.
- Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
- Frecuencia: Uno por pedido siempre que su cuantía sea superior a 5.000 m².

* Alargamiento a la rotura

- Parámetro: Alargamiento a la rotura, en sentido longitudinal y transversal.
- Procedimiento:
 - Preferente: Norma DIN 53857/2.
 - Otros: Normas ASTM D 4595, ASTM 1682, NFG 38014, NFG 07001, BS 6906/1 y SN 198461.

- Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Un ensayo cada 5.000 m² y siempre uno por pedido.
- * Resistencia a la propagación de la rotura
- Parámetro: Resistencia a la propagación de la rotura.
 - Procedimiento:
 - Preferente: Norma DIN 53363.
 - Otros: Normas ASTM D 1117 y NFG 38015.
 - Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Uno por pedido siempre que su cuantía sea superior a 5.000 m².
- * Perforación por caída de cono
- Parámetro: Perforación por caída de cono (indicador de la resistencia a la caída de piedras).
 - Procedimiento:
 - Preferentes: Normas TCR y BS 6906/6.
 - Otros: Normas SF, Sørliie y Nordtest Method NT Build 243.
 - Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Un ensayo cada 5.000 m² y siempre uno por pedido.
- * Abertura eficaz de poro
- Parámetro: Abertura eficaz de poro.
 - Procedimiento:
 - Preferente: Norma del Instituto Franzius.
 - Otros: Normas DIN 53935, NFG 38017 y U.S. Corps of Engineers CW-02217 mod.
 - Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Un ensayo por pedido, siempre que su cuantía sea superior a 2.000 m²
- * Espesor bajo presión de 2 KN/m²
- Parámetro: Espesor bajo presión de 2 KN/m².
 - Procedimiento:
 - Preferente: Norma ASTM D 1777.
 - Otros: Normas DIN 53855 y NFG 38012.
 - Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Un ensayo por pedido siempre que su cuantía sea superior a 5.000 m²
- * Espesor bajo presiones de 100 y 200 KN/m²
- Parámetro: Espesores bajo presiones de 100 y 200 KN/m².
 - Procedimiento:

- Preferente: Norma ASTM D 1777.
 - Otros: Normas DIN 53855 y NFG 38012.
 - Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Un ensayo por pedido siempre que su cuantía sea superior a 8.000 m²
- * Permeabilidad perpendicular bajo presión de 2 KN/m²
- Parámetro: Permeabilidad perpendicular a la superficie del geotextil bajo presión 2 KN/m².
 - Procedimiento:
 - Preferente: Norma del Instituto Franzius.
 - Otros: Normas EMPA, ITF y SN 640 550.
 - Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Un ensayo por pedido siempre que su cuantía sea superior a 2.000 m²
- * Permeabilidad horizontal bajo presiones de 2 KN/m²
- Parámetro: Permeabilidad horizontal bajo presión de 2 KN/m².
 - Procedimiento:
 - Preferente: Norma del Instituto Franzius.
 - Otro: Norma SN 640 550.
 - Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Un ensayo por pedido siempre que su cuantía sea superior a 2.000 m²
- * Permeabilidad horizontal bajo presiones de 100 y 200 KN/m²
- Parámetro: Permeabilidades horizontales bajo presiones de 100 y 200 KN/m².
 - Procedimiento:
 - Preferente: Norma del Instituto Franzius.
 - Otro: Norma SN 640 550.
 - Tipo: Ensayo en laboratorio homologado.
 - Frecuencia: Un ensayo por pedido siempre que su cuantía sea superior a 5.000 m²
- * Control visual de las uniones
- Parámetro: Estado de las uniones (solape, soldadura o costura).
 - Procedimiento: No se reseña.
 - Tipo: Inspección visual.
 - Frecuencia: Se efectuará sobre la totalidad de las uniones.

6.2 Criterios de aceptación y rechazo en geotextiles

El control de calidad de los geotextiles tendrá como finalidad la comprobación de que los productos suministrados cumplen las especificaciones expuestas por los fabricantes en cuanto a características y propiedades, debiendo estar todo ello en consonancia con el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares de la obra.

Debe tenerse en cuenta que, si se realizan pruebas únicas en los ensayos, pueden presentarse, debido a desviaciones en los aparatos de medida, variaciones en los valores obtenidos, que pueden llegar a ser hasta de un 18% en los parámetros mecánicos y hasta un 30% en los hidráulicos. Para reducir el riesgo de posibilidades de desviación, solo cabe aumentar el número de determinaciones en cada ensayo y obtener el valor medio de sus resultados. Para un valor medio correspondiente a 5 determinaciones de un ensayo concreto, la desviación admisible sería nula.

No se aceptarán aquellas uniones en las que el solape sea inferior al prescrito ni aquellas que presenten interrupciones en la línea de soldadura o costura.

7. Bibliografía

- " La experiencia francesa en materia de geotextiles y geomembranas", Institute des Sciences et des Techniques de l'Environnement pour le Developpement, ISTED, Bagneux (Francia), 1987.
- " Los geotextiles, concebir y dimensionar", O. Gicot y J. Perfetti, Rhône - Poulenc.
- " Los geotextiles y las geomembranas", P. Delmas, O. Artieres y A. Nancay, ÖMV.
- " Manual de cálculo para aplicación de geotextiles", H. Schneider, Chemie Linz AG, Linz (Austria), 1987.
- " UTF Geosynthetics Manual", P.R. Rankilor, UCO, Lokeren (Bélgica), 1994.

Anejos:

- 1.- 1.A.- Especificaciones técnicas recomendadas para geotextiles de filamento continuo, agujeteados, de polipropileno.
 - 1.B.- Especificaciones técnicas recomendadas para geotextiles de filamento continuo, agujeteados, de poliéster.
- 2.- Inspecciones y ensayos.

Anejo 1.A: Especificaciones técnicas recomendadas para los geotextiles de filamento continuo, agujeteados, de polipropileno

Campo de aplicación:

-----Drenajes-----
 -----Caminos-----
 -----Balsas, vertederos, túneles-----

	Unidad	Norma	90	110	130	140	180	200	235	280	350	400
Masa	gr/m ²	ASTM D 3776	90	110	130	140	180	200	235	280	350	400
Resistencia al punzonamiento	N	SN 640 550	980	1140	1350	1450	1875	2100	2500	3000	3400	3550
Resistencia a la tracción	KN/m	ASTM D 4595	5,9	7,2	8,3	9,2	11,8	13,0	15,1	18,0	21,5	24,0
Alargamiento a la rotura	%	ASTM D 4595	---	---	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80	50-80
Resistencia a la caída de piedras (perforación por caída de cono)	mm.	TCR, SF	25	21	17	16	14	12	11	10	9	7
Abertura eficaz de poro	mm.	FRANZIUS	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	---	---	---	---
Espesor a 2 KN/m ²	mm.	ASTM D 1777	1,1	1,2	1,4	1,5	1,8	2,0	2,2	2,6	3,0	3,3
Permeabilidad perpendicular a 2 KN/m ²	10 ⁻³ m/s	FRANZIUS	5	5	5	5	5	5	---	---	---	---
Permeabilidad horizontal a 2 KN/m ²	10 ⁻⁴ m/s	FRANZIUS	---	---	---	---	---	---	9	9	8	8

Anejo nº 1.B: Especificaciones técnicas recomendadas para los geotextiles de filamento continuo, agujeteados, de poliéster.

Campo de aplicación:

-----Drenajes-----
 -----Base de terraplenes-----
 -----Protección de geomembranas-----

	Unidad	Norma	100	130	160	180	235	275	3380	180	235	275
Masa	gr/m ²	ASTM D 3776	100	130	160	180	235	275	3380	180	235	275
Resistencia al punzonamiento	N	DIN 54307	---	---	---	2070	2890	60	60	60	60	60
Alargamiento a la rotura	%	DIN 53857/2	---	---	---	60	60	60	60	60	60	60
Resistencia a la caída de piedras (caída de cono)	mm.	TRC, SF	20	16	14	14	12	11	11	12	11	10
Abertura e'G a 2 KN/m ²	mm.	DIN 53935	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	---	---	---
Permeabilidad horizontal a 50 KN/m ²	l/m ² x s 10 ⁻⁷ m ² /s	DIN 53855 FRANZIUS NFG 38018	1,1 760 ---	1,3 460 ---	1,6 410 ---	1,7 430 ---	2,2 430 ---	2,3 440 ---	2,3 440 ---	1,7 7 ---	2,2 9 ---	2,3 10 ---

Anejo nº 2: Inspecciones y ensayos.

- 1) Control visual a la recepción.
- 2) Masa por unidad de superficie.
- 3) Resistencia al punzonamiento.
- 4) Resistencia al reventón.
- 5) Alargamiento a la rotura (longt. y transv.)
- 6) Resistencia a la propagación de la rotura.
- 7) Perforación por caída de cono.
- 8) Abertura eficaz de poro.
- 9) Espesor bajo presión de 2 KN/m.²
- 10) Espesores bajo presiones de 100 y 200 KN/m.².
- 11) Permeabilidad perpendicular bajo 2 KN/m.².
- 12) Permeabilidad horizontal bajo 2 KN/m.².
- 13) Permeabilidades horizontales bajo 100 y 200 KN/m.².
- 14) Control visual de las uniones.

Campo de aplicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Presas de materiales sueltos	X	X			X	X	X	X	X		X			X
Impermeabilización de balsas y vertederos	X	X	X	X	X				X	X		X	X	X

ANÁLISIS DEL SISTEMA CUBILLAS-COLOMERA MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

Carvajal Ramírez, F. (P) (1) y Giraldez Cervera, J.V. (2)

Resúmen.

En el presente trabajo se trata de modelizar el comportamiento de las cuencas de los ríos Cubillas y Colomera, (provincia de Granada), en cuanto a erosión y aporte de sedimento a los embalses de igual nombre.

El modelo toma como datos de entrada, la precipitación media anual en una serie de estaciones próximas, los tipos edafológicos de suelos y la cubierta vegetal existentes en la zona y la orografía del terreno, y estimará la cantidad de suelo fértil que se erosiona, clasificando el terreno en diferentes zonas de igual riesgo de erosión, y de ésta, qué cantidad llegará hasta los embalses correspondientes a sendos ríos.

Para la introducción de datos y su análisis se usan los sistemas de información geográfica (S.I.G.) denominados GRASS (DBA Systems. Inc. y U.S. Army corps engineers, 1991), y ARC/INFO (Environmental system research institute. Inc., 1992), disponibles en el Servicio Centralizado de Información del Territorio de la Universidad de Córdoba, y como base teórica, el modelo de erosión y sedimentación diseñado por Dickinson y Rudra (1990), en la Universidad de Gelp, llamado GAMES, modificado y adaptado en algunos aspectos.

Validado el modelo en la medida que la disponibilidad de datos lo ha permitido, se estudia la sensibilidad del modelo a la variación de los distintos parámetros que aparecen.

Terminada la modelización, se han simulado diferentes situaciones ficticias para probar la respuesta de producción y aporte de sedimento de las cuencas a una serie de lluvias torrenciales, de magnitudes crecientes, en un punto localizado de la cuenca del río Cubillas, a una regeneración progresiva de las zonas más susceptibles de mejora en cuanto a protecciones erosivas, y a un abandono escalonado de labores agrarias en las mismas áreas.

Por último se ha determinado un valor umbral comparativo del factor de cultivo que ha de alcanzarse en las parcelas regeneradas, para que dicha operación sea preferible a la instalación de obras protectoras de suelos en las zonas circundantes a los cauces fluviales.

Palabras clave: *Modelo, sistemas de información geográfica, GRASS, ARC/INFO, MDE, tiempo de viaje, coeficiente de entrega, ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), erosión, escorrentía y sedimento.*

Summary.

CUBILLAS-COLOMERA SYSTEM ANALYSIS BY GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS

The hydrological and sedimentological behaviour of the Cubillas and Colomera River basin, (in the Granada province), has been modelled, with special focus on the sediment contribution to the dams located at the outlet of both basins.

The input of the model are the rainfall regime as estimated by the anual average rainfall in the scarce raingages of the area, the soils map, vegetative cover, and the physiography of the basins. The output is the distribution soil loss amount, and the sediment delivery.

A soil loss model, based on the GUELPH, which in its turn was based on the USLE, was developed on GIS like GRASS and ARC/INFO. The sensitivity of the model has been analyzed, determining the reliability of several parameters.

(1) y (2) Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba.

A set of different hypothetical scenarios has been developed, to assess the response of the system to management changes like a concentration of heavy showers, a decay of protective measures, and a progressive abandonment of agricultural practice.

The consequences are discussed. Finally a threshold value of the crop cover factor of USLE, C, for the rational handling of the basins is proposed, to determine whether cultivation or the reinforcement of protective methods on river margins is more convenient to reduce sediment contribution to the reservoirs.

Keywords: *soil erosion models, GIS, DEM, travel time, delivery ratio, USLE, runoff, erosion and sediment yield.*

1. Introducción.

Dado el interés creciente que muestra la sociedad en general, y los técnicos responsables del manejo de recursos naturales en particular, por la estimación y clasificación de las comarcas en zonas de distintos niveles de erosión potencial, y dado el reciente desarrollo tecnológico de equipos informáticos y de programas aplicables al análisis de variables hidrológicas, el objetivo principal del trabajo es el diseño de una metodología de implementación de un modelo de erosión y sedimentación, mediante SIG.

Dicho modelo debe ser capaz de estimar valores de erosión en cualquier punto de la cuenca, así como la cantidad de sedimento erosionado que llega al embalse como consecuencia del arrastre que sufre a través de la red fluvial.

La metodología diseñada ha sido aplicada a las cuencas adyacentes de los ríos Cubillas y Colomera, cuyos embalses abastecen a regantes de la Vega de Granada, y que son considerados por el M.O.P. (1990) como un sistema, por compartir infraestructuras, recursos y criterios de manejo.

Los objetivos específicos son, por un lado, que la metodología desarrollada sea aplicable a cualquier cuenca de río embalsado.

Por otro, que los medios necesarios para dicha aplicación no sean muy complejos e inaccesibles para el técnico, y que los datos de entrada al modelo no sean muy difíciles de conseguir.

Como consecuencia de lo anterior, se debe llegar a conseguir unas buenas estimaciones de erosión y sedimento aportado al embalse, con las cuales poder planificar el óptimo manejo de los recursos disponibles, manteniendo el equilibrio natural del proceso de erosión y edafogénesis.

Por último se tratará de que el modelo admita realizar simulaciones de escenarios que permitan evaluar las consecuencias que podría llegar a tener una situación inesperada e indeseable como una deforestación por incendio o un cambio climático referido a cantidad y frecuencia de precipitaciones.

2. Materiales y métodos.

En esta sección se describen los programas y equipos utilizados para la introducción y análisis de datos, el modelo GAMES y sus modificaciones, y el diseño de su organigrama general de aplicación mediante SIG.

2.1. Materiales.

Los cuatro grupos de datos que el modelo elegido necesita son, como ya se ha indicado, los valores de precipitación media anual en diferentes estaciones meteorológicas, las clases de suelos y de cubierta vegetal que se dan en las cuencas, y la orografía que tiene el terreno.

Los valores medios de lluvia anual en las 25 estaciones interiores o cercanas a las cuencas se han obtenido de De León (1989), y son introducidos a GRASS en un fichero de texto creado con el editor del

sistema operativo.

Tanto los tipos de suelos, como la cubierta vegetal, han sido digitalizados de los respectivos mapas, a escala 1:200000, de Pérez y Prieto (1980), mediante la tableta digitalizadora conectada a una estación de trabajo que tiene acceso al programa de diseño gráfico AUTOCAD.

Los polígonos que definen las clases, y sus categorías, guardados en un fichero de exportación estándar, son pasados por ARC/INFO para su depuración y creación de la topología, para ser tratados en GRASS, en estructura teselar.

De igual forma, la orografía del terreno es introducida por digitalización, en AUTOCAD, de las curvas de nivel interiores a las cuencas, que se representan en las hojas correspondientes del Servicio Geográfico del Ejército, 1991, depuración y creación del soporte topológico en ARC/INFO, y análisis en GRASS.

2.2. Modelo GAMES y sus modificaciones.

Existen dos factores fundamentales a calcular de los que consta el modelo, descritos por Dickinson y Rudra (1990): erosión y coeficiente de entrega.

Para la aplicación al sistema Cubillas-Colomera, la erosión se ha estimado a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, RUSLE, de Dissmeyer y Foster, 1983, ya que se adapta mejor a la orografía del terreno que la Ecuación Universal de pérdida de Suelo, USLE, de Wischmeier, 1976, adoptada originalmente por el modelo GAMES:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

A: Cantidad de suelo producido por erosión en Tn/ha/año.

R: Factor erosividad. Representa la agresividad de la lluvia para erosionar al suelo, en MJ·mm/ha/hora/año.

K: Factor erosividad. Representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, en Tn·ha·hora/MJ/mm/ha.

LS: Factor topográfico. Parámetro, expresado en tanto por uno, que corrige el valor de erosión en función de la pendiente media que tenga la superficie de escorrentía, y de la longitud de dicha superficie. Los resultados de cálculo obtenidos de aplicar la ecuación del factor topográfico de la RUSLE a cada una de las teselas que definen la cuenca en GRASS, han sido corregidos en función de la posición relativa que ocupa cada celda dentro de la ladera de escorrentía, según el criterio de Foster y Wischmeier, 1974, ya que una celda no puede ser considerada teóricamente como la ladera de experimentación sobre la que fué definido el factor topográfico de la RUSLE.

C: Factor de cubierta. Es la relación que existe entre los valores de erosión de una parcela de experimentación con una determinada cubierta vegetal y los valores de erosión de la misma parcela en barbecho y con el suelo desnudo.

P: Factor de protección. Es la cantidad de erosión, en tanto por uno, que se consigue evitar aplicando determinadas técnicas de protección de suelos, como el cultivo en terrazas, disposición de las hileras de siembra según las curvas de nivel, incorporación de restos vegetales procedentes de cosechas anteriores al suelo, etc.

En segundo lugar, el coeficiente de entrega cuantifica la cantidad de sedimento en valores relativos, que llega al río, respecto a la cantidad total que ha sido generada por la lluvia en un determinado lugar, y que ha sido estimada a través de la RUSLE.

$$CE = \alpha \cdot \theta \cdot t^{\beta}$$

CE: Coeficiente de entrega de la parcela en tanto por uno.

α : Parámetro de calibración del modelo.

β y θ : Parámetros de Dickinson y Rudra, que dependen de las características físicas de las parcelas.

t: Tiempo de viaje. Es el tiempo medio, expresado en segundos, que tarda el sedimento disuelto, en suspensión o arrastrado por la carga de fondo, en atravesar todas las parcelas que encuentra a su paso desde cada una de ellas hasta el río.

Multiplicando cada uno de los pares de valores de pérdida de suelo por el coeficiente de entrega, se obtiene el aporte de sedimento para cada subparcela. Acumulando estos valores a lo largo de la red de drenaje, se puede estimar el aporte de sedimento en los puntos de vertido de la red, que en el presente trabajo representan los embalses del sistema.

Para el cálculo del tiempo de viaje, se recurren a relaciones experimentales entre los tipos de cultivos, la pendiente local y la velocidad de escorrentía, dadas por Chow y col. (1987), para evitar los coeficientes hidráulico y de aspereza de Manning, que aparecían en el modelo original.

2.3. Organigrama general.

En el gráfico n°1 se representa, de forma esquemática, la metodología diseñada para la aplicación del modelo GAMES modificado, a cualquier cuenca de río embalsado, mediante SIG.

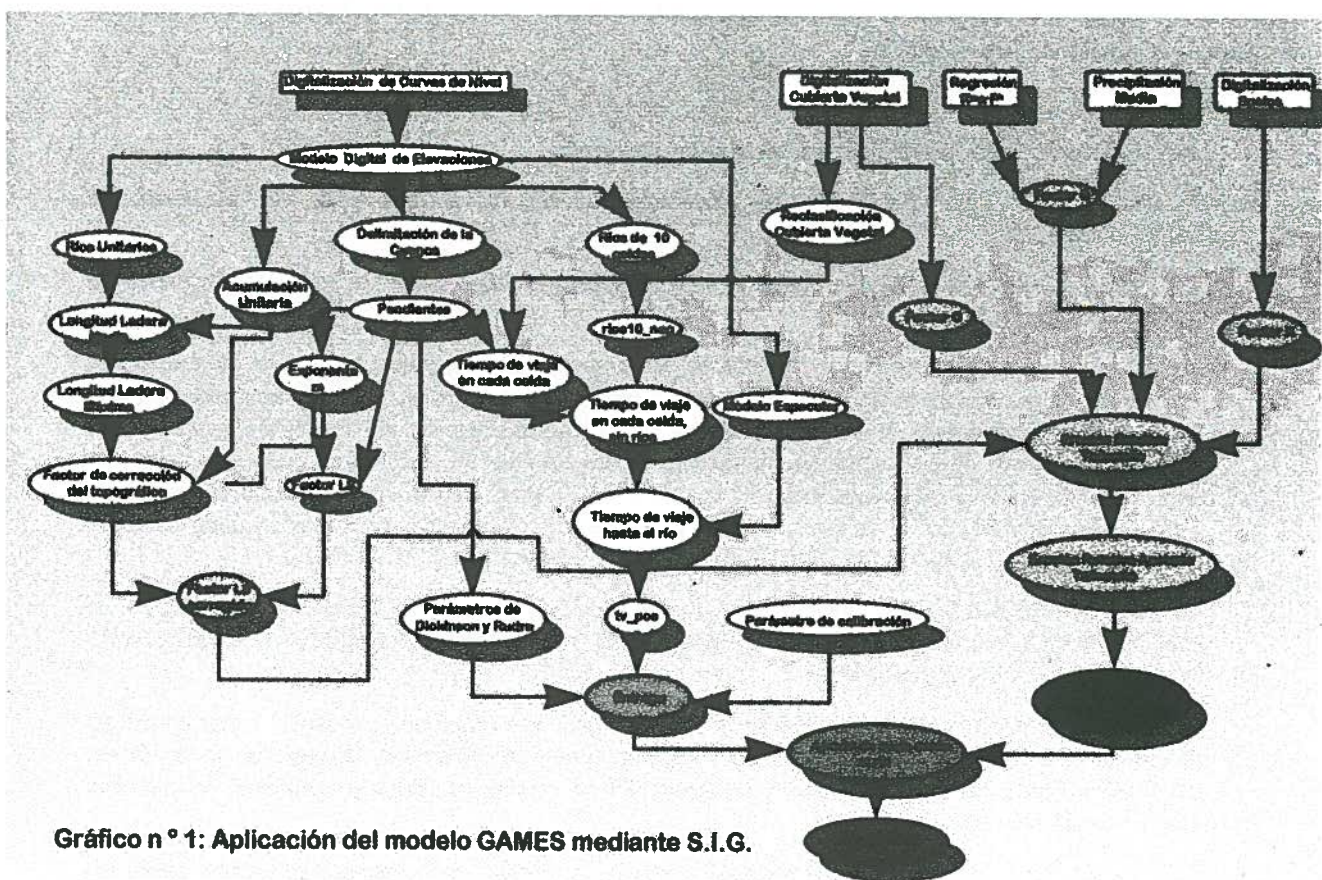


Gráfico n° 1: Aplicación del modelo GAMES mediante S.I.G.

3. Resultados y discusión.

Terminado el proceso de introducción y corrección de datos en GRASS, se puede generar el modelo digital de elevaciones, MDE, y confeccionar los mapas correspondientes a cada uno de los factores de la

RUSLE ya descritos (gráficos 2, 3, 4 y 5).

A partir del MDE, se realiza una simulación de los aspectos de la cuenca para su comparación con fotografía aérea, gráfico n°6, un estudio de pendientes, gráfico n°7, y otra serie de análisis espaciales cuyos resultados parciales son los mapas de estados erosivos potenciales, y la distribución del coeficiente de entrega dentro de la cuenca, gráficos 8 y 9 respectivamente.

Multiplicando los dos últimos mapas referidos se obtiene el mapa de sedimento que cada celda aporta al embalse, gráfico n°10, y realizando una acumulación de estos valores a través de la red de drenaje, se obtiene el mapa de sedimento que cada celda recibe de su subcuenca aportadora, gráfico n°11.

Mediante una consulta a la base de datos de este último mapa a cerca del valor asociado a las celdas que representan los embalses, se ha determinado que el del río Cubillas recibe 3.35 Tn/ha/año, y el del Colomera, 9.60 Tn/ha/año.

Para apreciar la sensibilidad del modelo así diseñado a la variación del parámetro de calibración, se ha trazado la curva del gráfico n°12.

Por otro lado, una disminución del factor de cubierta, producida por regeneración de determinadas parcelas cuyos aprovechamientos son susceptibles de mejora desde el punto de vista erosivo, o un aumento de dicho factor producido por un abandono progresivo de las labores agrarias o por incendios forestales, producen respuestas en el aporte de sedimentos a los embalses que son representados respectivamente en las curvas de los gráficos 13 y 14.

Igualmente, una serie de chubascos torrenciales de diversas intensidades, registrados en la estación de Sierra Umbría de Iznalloz, harían variar el aporte de sedimento a los embalses siguiendo la tendencia representada en el gráfico n°15.

También se diseñó un criterio para la toma de decisiones a la hora de elegir entre la regeneración de parcelas, que puede requerir el uso de unos recursos no disponibles, o la construcción de sistemas de protección contra la erosión en las zonas adyacentes a los cauces fluviales, cuyo resultado se representa en el gráfico n°16.

4. Conclusiones.

Queda demostrada la utilidad de GRASS para la implementación del modelo GAMES, y obtención de valores fiables de producción y aporte de sedimento a partir de datos muy accesibles.

Además, la metodología es aplicable a cualquier otra cuenca de río embalsado cuya extensión sea del mismo orden de magnitud.

En un sentido más restringido, la aplicación de los resultados parciales del modelo pueden ser de gran utilidad para la gestión y planificación de los recursos de la cuenca.

Así, el mapa de estados erosivos, gráfico n°8, ayuda a conocer las zonas que potencialmente son más castigadas por la acción erosiva del impacto de las gotas de lluvia, el mapa de sedimento aportado, mapa n°10, puede aplicarse para definir las zonas de la cuenca que más sedimento aportan a los embalses, y que, por tanto, determinan las áreas de actuación preferente para frenar la colmatación de los embalses.

Simular las consecuencias erosivas de lluvias de diferentes intensidades sobre la producción de sedimentos tiene aplicación para el trazado de planes de emergencia que eviten consecuencias erosivas altamente negativas para los suelos fértiles y la capacidad de almacenamiento de los embalses.

El modelo permite igualmente comprobar la eficiencia de sistemas de protección en aquellas zonas donde existe un alto gradiente del factor de cultivo, introduciendo en el mapa correspondiente, gráfico n°4, un polígono cuya geometría y valor corresponda con el factor de protección probado, y recalculando de nuevo todos los mapas afectados.

Estas y otras muchas aplicaciones del modelo, a través del SIG, son posibles por sencillos procesos de análisis espaciales, en función de las necesidades, objetivos a cubrir, y la imaginación y tiempo empleados.

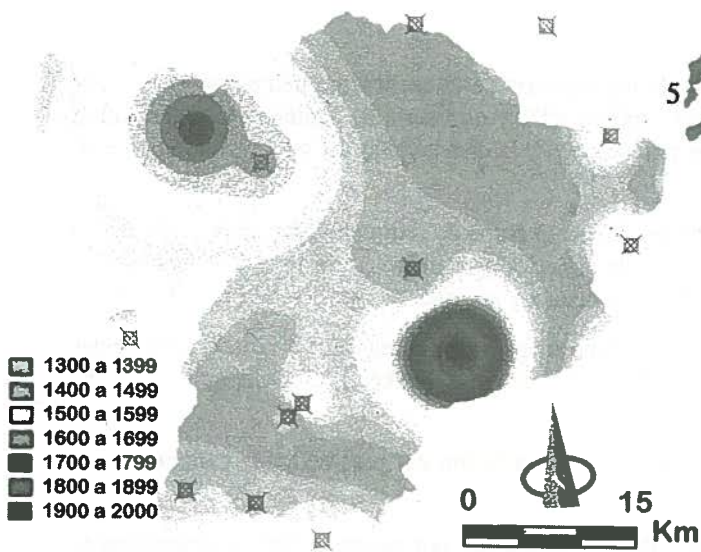


Gráfico nº 2: Erosividad (MJ·mm/ha/h/año)

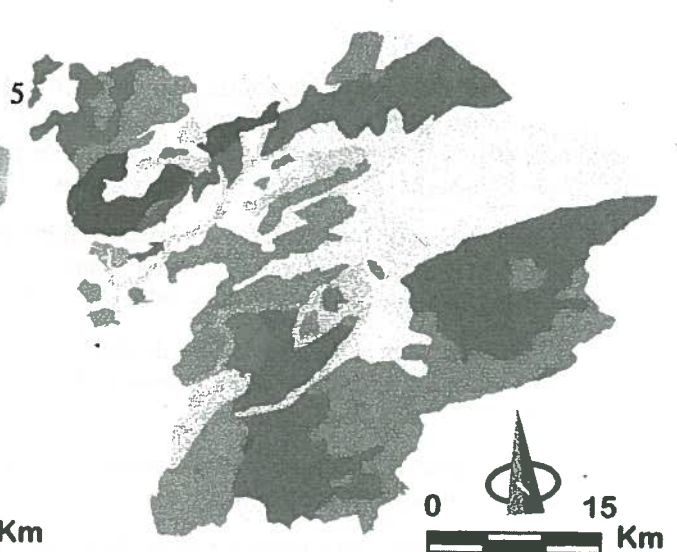


Gráfico nº 3: Erodibilidad

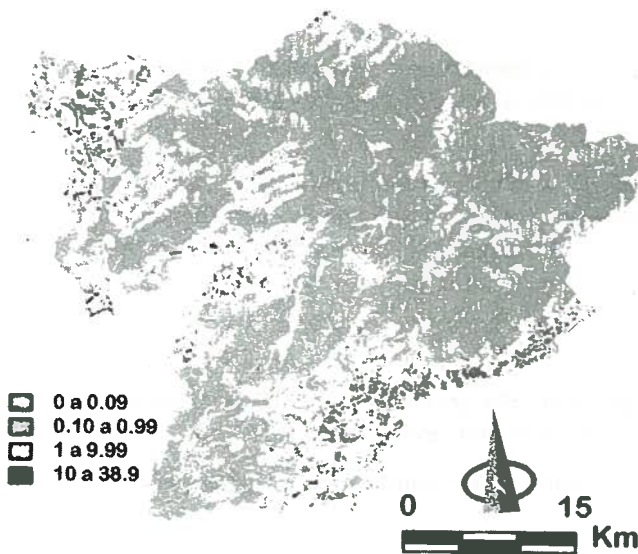


Gráfico nº 4: Factor topográfico (%)

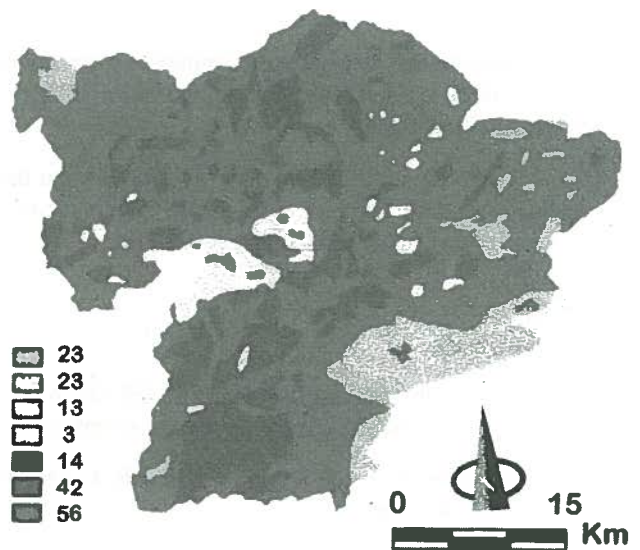


Gráfico nº 5: Factor de Cubierta Vegetal (%)

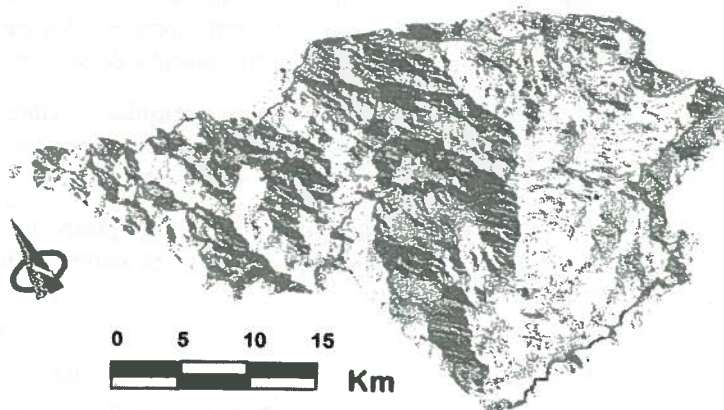


Gráfico nº 6: Simulación en tres dimensiones

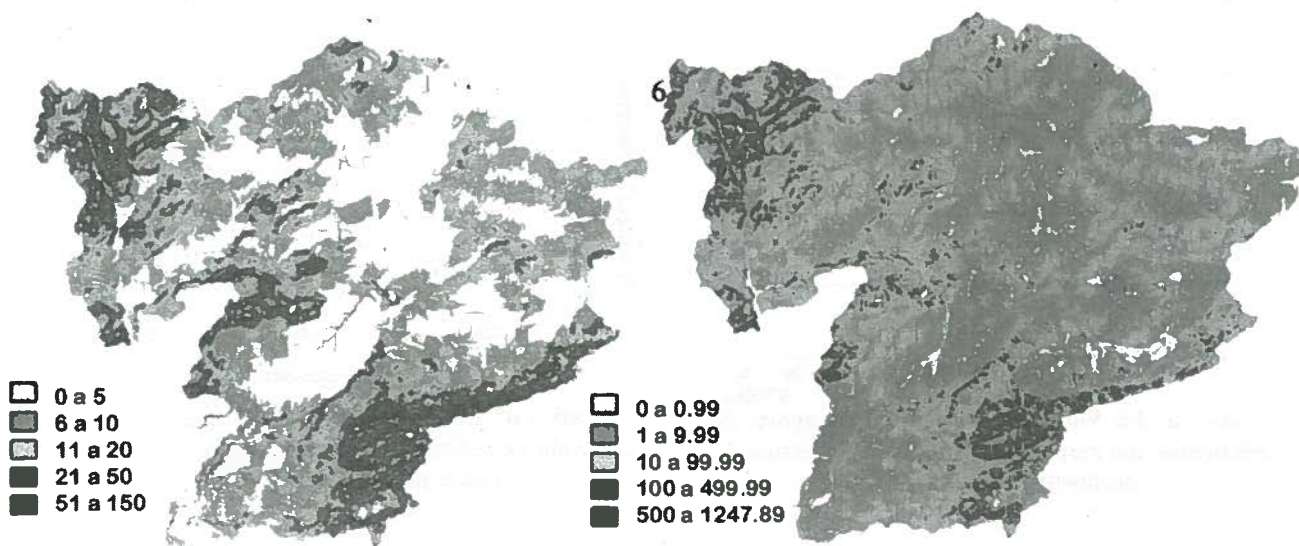


Gráfico nº 7: Pendientes (%)

Gráfico nº 8: Erosión Potencial Relativa (Tn/ha/año)

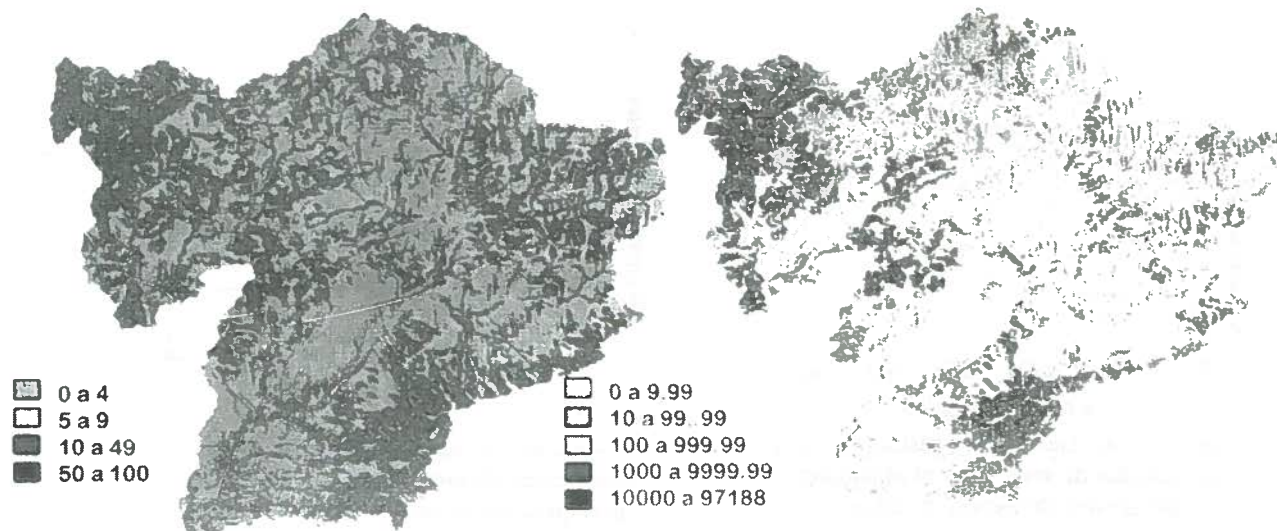


Gráfico nº 9: Coeficiente de Entrega (%)

Gráfico nº 10: Aporte de sedimento

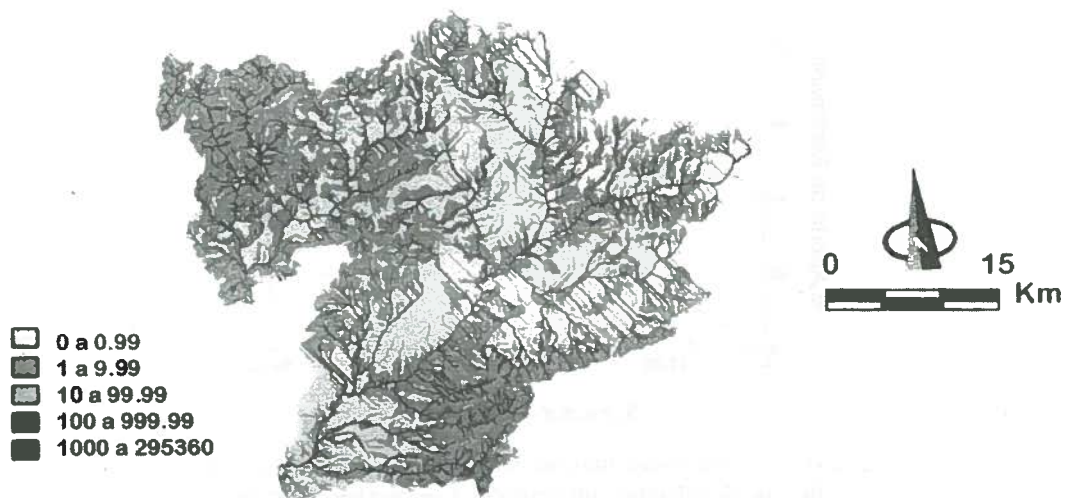


Gráfico nº 11: Acumulación de Sedimento Producido

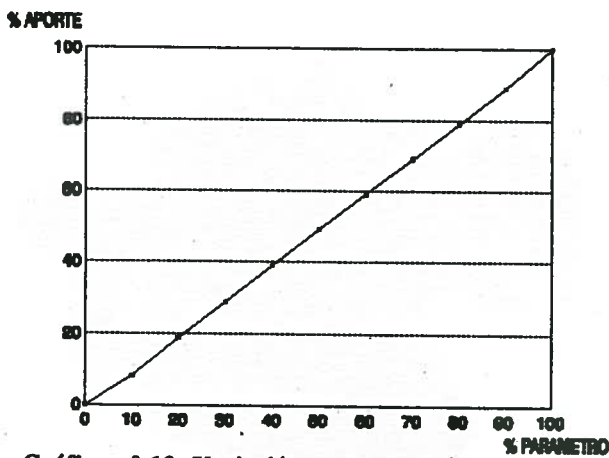


Gráfico nº 12: Variación porcentual del aporte de sedimentos con respecto a variación porcentual del parámetro de calibración.

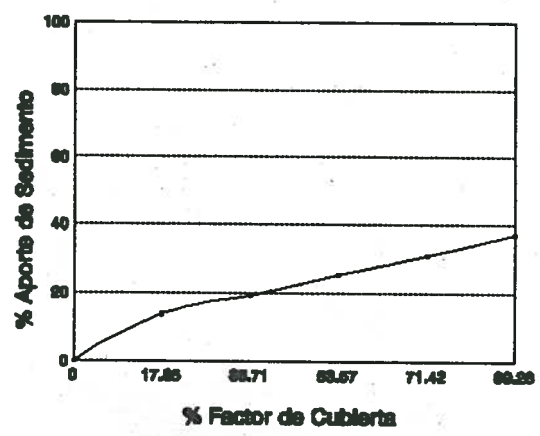


Gráfico nº 13: Análisis de sensibilidad de la producción de sedimento a la disminución del factor de cubierta por regeneración.

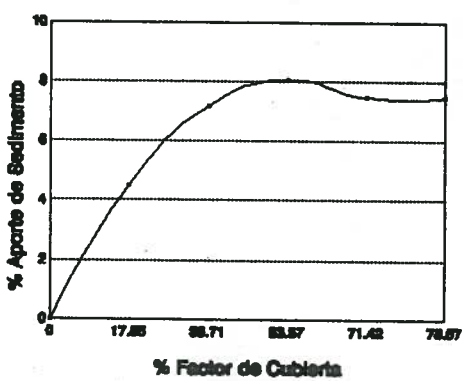


Gráfico nº 14: Análisis de sensibilidad de la producción de sedimento al abandono progresivo de tierras de labor.

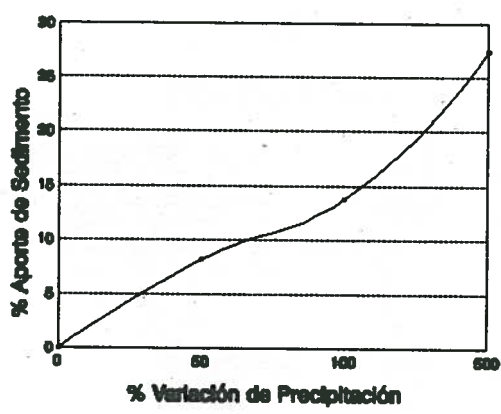


Gráfico nº 15: Análisis de sensibilidad de la producción de sedimentos al aumento de la precipitación en Sierra Umbría (Iznalloz).

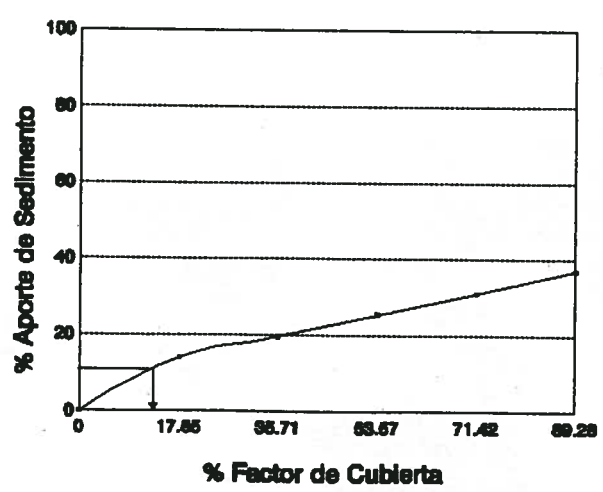


Gráfico nº 16: Valor umbral comparativo de la protección de cauces fluviales con respecto a la regeneración de parcelas.

5. Bibliografía.

- * Chow V.T., Maidment L.W. y Mays L.W. 1987. Applied Hydrology. McGraw Hill, Nueva York.
- * DBA Systems. Inc., U.S. Army corps engineers. Construction engineering research laboratory. 1991. GRASS (Geographical resources analysis support system). Users manual. Arrowhead drive. Virginia.
- * De León A. 1989. Caracterización agroclimática de la provincia de Granada. 105-154. M.A.P.A. Madrid.
- * Dickinson W.T. y Rudra R.P. 1990. Games: The Gelp model for evaluating effects of agricultural management systems on erosion and sedimentation. User's manual. Version 3.01. University of Guelph. School of engineering. Technical Report 126-86.
- * Dissmeyer G.E. y Foster G.R. 1983. Modifying the universal soil loss equation for the forest land. En: Soil erosion and conservation. S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhawer, y A. Lo, eds., S.C.S.A., Ankeny.
- * Enviromental system research institute. Inc. 1992. ARC/INFO Users guide. 380 New York street. USA.
- * Foster G.R. y Wischmeier W.H. 1974. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. Trans., ASAE 17: 305-309.
- * Pérez Pujalte A. y Prieto Fernández P. 1980. Memoria explicativa de los mapas de suelos y vegetación de la provincia de Granada. Estación experimental del Zaidín. Granada.
- * Servicio Geográfico del Ejército. 1991. Mapa militar de España escala 1:50000. Hojas nº 1009, 1010, 991, 992, 969, 970. Madrid.
- * Wischmeier W.H. 1976. Use and misure of the universal soil loss equation. J. Soil Water Cons. 31: 5-9.

GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS A LA MEJORA DE LOS RIEGOS DE LA COMUNIDAD DE REGANTES DE ALMUDÉVAR (HUESCA)

Slatni, A. (P), Playán Jubillar, E.

Resumen :

En los próximos años se va a dedicar una importante cantidad de recursos públicos y privados a la modernización de los regadíos españoles. En este trabajo exponemos los primeros resultados de una metodología destinada a apoyar la toma de decisiones en la modernización de regadíos. El caso de estudio es el de la Comunidad de Regantes de Almudévar, con unas 3.000 ha de riego por superficie. Se presentan mapas de isolíneas de eficiencia de aplicación actual y de un escenario basado en un aumento del caudal de riego de los 84 l s⁻¹ actuales hasta 200 l s⁻¹. El análisis de estos mapas permite identificar zonas donde el aumento del caudal permitirá aumentar sustancialmente la eficiencia. En otras, el análisis permite identificar zonas en las que la consecución de una elevada eficiencia parece ligada al cambio a un sistema de riego a presión.

Summary :

In the upcoming years large public and private investments will be devoted to the modernization of the Spanish irrigation districts. In this work we present the first results of a decision support system for irrigation modernization projects. The case study is the Almudévar irrigation district, located in northeastern Spain, with 3.000 ha of surface irrigation. We present contour line maps of actual and projected application efficiency. The considered scenario is based on an increment of irrigation discharge from the actual 84 l s⁻¹ to 200 l s⁻¹. Analysis of the presented maps permits identification of areas where increased discharge results in increased efficiency. In other areas large irrigation efficiencies can only be attained in practice by adopting a pressurized irrigation system.

Introducción

A pesar de los recientes desarrollos en riego por aspersión y goteo, el riego por superficie continúa siendo el más utilizado en España y en el mundo. Esto es debido a distintos condicionantes de tipo económico, técnico y social. La reciente aprobación del Plan Nacional de Regadíos hace pensar que en los próximos años se van a dedicar abundantes recursos públicos y privados a la modernización de los regadíos tradicionales, entre los que se cuenta la mayor parte de los sistemas de riego por superficie. En este trabajo se presenta sucintamente una metodología para analizar el uso del agua en un sector de riegos, y se aplica al caso particular de la Comunidad de Regantes de Almudévar (Huesca). El objetivo final de esta metodología es asistir al planificador que debe tomar decisiones acerca de la modernización del sistema de riego. Los resultados aquí presentados únicamente permiten conocer la distribución espacial de la eficiencia de aplicación. En el futuro, esta metodología deberá extenderse para aportar información sobre el coste de cada escenario de modernización, la eficiencia global del sector y el impacto social y medioambiental de la transformación a realizar.

Departamento de Genética y Producción Vegetal
Laboratorio Asociado de Agronomía y Medio Ambiente (CSIC-DGA)
Estación Experimental de Aula Dei (CSIC). Apdo. 202, 50080 Zaragoza

La comunidad de regantes de Almudévar está situada en la zona central de la provincia de Huesca. Comprende unas 3.000 ha de regadío, que pertenecen al primer sector de Monegros I. El riego por escurrimiento en tablares cerrados es el sistema que ocupa la casi totalidad de la superficie. La transformación en regadío se realizó entre los años 20 y 50. Los criterios de diseño empleados en la época suponen fuertes limitaciones al desarrollo de una agricultura competitiva en la actualidad. La escasa capacidad de la red de distribución y la falta de regulación interna hacen que el riego se realice 24 horas al día. El bajo caudal de riego actual determina que el riego sea muy lento y poco eficiente.

En la figura 1 presentamos un plano de localización de la zona de estudio. Los canales de Monegros, Violada y Santa Quiteria rodean la Comunidad casi por completo, mientras que la carretera de Zaragoza a Huesca y una cabañera la atraviesan. Cinco enclaves de secano, generalmente fuera de cota de riego se sitúan en el interior del perímetro regado. Una completa red de desagües (barrancos) canaliza los retornos de riego fuera de la comunidad.

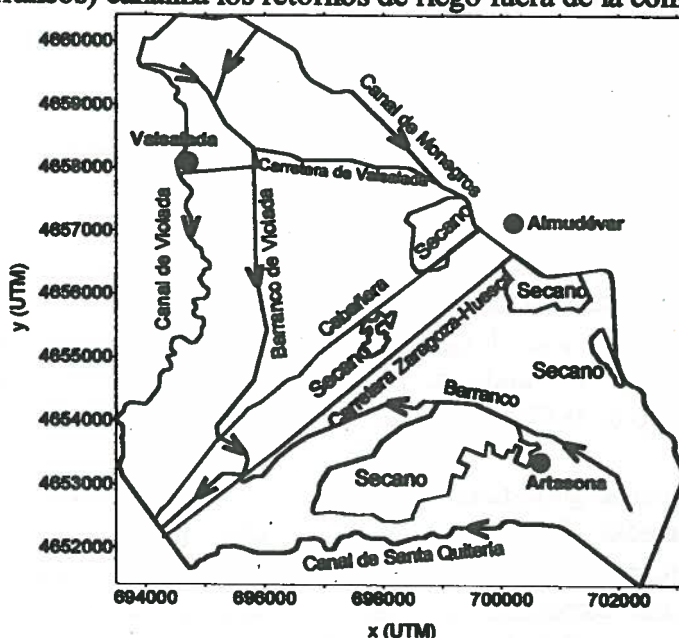


Figura 1. Plano de la comunidad de regantes de Almudévar, con la localización de los principales municipios, redes viarias, canales y barrancos.

Material y métodos

La caracterización del medio físico se basó en la confección de mapas temáticos. Se utilizó como material base el mapa de suelos presentado por Torres (1983). Se hicieron un total de 310 sondeos de barrena, describiendo el perfil del suelo hasta 120 cm. Las propiedades caracterizadas fueron la textura a mano, el porcentaje de elementos gruesos, la geomorfología local, la presencia de acumulaciones de yeso y la profundidad del suelo. Ésta resultó estar frecuentemente limitada por contactos líticos o paralíticos o por capas freáticas. Se tomó una muestra de cada sondeo y se analizó en placas de presión para determinar la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez (PM), para lo que se usaron tensiones de 33 y 1.500 kPa, respectivamente. La combinación de la profundidad del suelo, la pedregosidad y los resultados de la placa de presión permitieron calcular la capacidad de retención de agua disponible del suelo o dosis práctica de riego (67% de la diferencia entre CC y PM). En adelante nos referimos a esta variable como dosis de riego, ya que el objetivo es aplicar una dosis igual a la cantidad de agua que el suelo puede retener.

Se utilizaron las fotografías aéreas del vuelo del M.A.P.A. de 1990 (escala 1:20.000) para estudiar las dimensiones de los tablares de riego. Para ello se delinearon 269 zonas dentro de las que los tablares tenían características similares. En cada una de estas zonas se determinó el área total, el número de tablares y su longitud media. En base a estas observaciones se calculó el área y la anchura media de los tablares de cada zona.

Realizamos 15 evaluaciones de riego repartidas en las distintas unidades de suelos. En ellas se siguió la metodología presentada por Merriam y Keller (1978). El caudal se midió con un minimolinete, y se utilizó un nivel para caracterizar la pendiente del tablar. Se determinó la infiltración media del terreno por ajuste de la curva de avance a los resultados del modelo de simulación SIRMOD (Walker, 1993). Se definieron cuatro clases de infiltración caracterizadas por los parámetros de la ecuación de Kostiakov. Se realizó un mapa temático de infiltración asociando clases de infiltración a unidades de suelos.

Para poder aplicar el modelo SIRMOD a la mejora de los riegos de la comunidad, se dividió la superficie regable en 92 agrupaciones. Estas unidades se corresponden con un conjunto de tablares que tienen una cierta homogeneidad en sus propiedades relacionadas con el riego. La delimitación de las agrupaciones es un proceso subjetivo en el que se consideran el mapa de suelos, la geomorfología, las infraestructuras permanentes, la red de desagüe, el caudal de riego y las dimensiones de los tablares. El siguiente paso fue asignar a cada agrupación un valor de cada una de las propiedades que determinan un tablar de riego por superficie. Estas propiedades son: longitud, anchura, caudal de riego, infiltración, pendiente, rugosidad y dosis de riego. El caudal de riego de cada agrupación se extrajo de la base de datos de gestión del riego de la Comunidad de Regantes de Almodóvar.

Se utilizaron técnicas geoestadísticas (Clark, 1979) para estudiar la variabilidad espacial de las variables analizadas. Así, se calcularon semivariogramas experimentales para siete variables. En ellos se representa la semivarianza (γ) en función de la distancia. En las variables en que se detectó una estructura espacial se ajustó un semivariograma teórico, cuya adecuación se evaluó por validación cruzada. Posteriormente se realizaron mapas de estas propiedades utilizando técnicas de interpolación espacial. Se utilizó el método del inverso de la distancia al cuadrado para las variables sin estructura espacial, y el krigado para aquellas en que se disponía de un semivariograma teórico.

Resultados y discusión

La tabla 1 presenta los resultados del análisis geoestadístico de las variables estudiadas. La profundidad del suelo y la superficie de los tablares no presentaron estructura espacial, tal como se puede apreciar en la figura 2a. Para caracterizar estas variables con propiedad será necesario en el futuro aumentar la densidad de muestreo y/o mejorar los métodos empleados. En las restantes variables, la estructura espacial resulta aparente, tal como se puede observar en la figura 2 (b, c y d). Los parámetros de los semivariogramas esféricos indican que las variables que los poseen se agrupan en zonas homogéneas de 1.000 a 3.000 m de diámetro. Es posible en esta zona que un muestreo con una densidad menor hubiera sido igualmente efectivo para revelar la variabilidad espacial de estas variables. Sin embargo, el efecto pepita tiene en todas ellas una magnitud similar al de la meseta, por lo que muestreos menos densos resultarían poco precisos.

La figura 3 presenta el mapa de profundidad del suelo. En ella se aprecia que en el nordeste de la comunidad de regantes se sitúa una zona de suelos poco profundos. Esto es debido a una plataforma residual culminada por gravas (*saso*, en terminología local). Los suelos situados en vales y glacis se extienden a lo largo de los barrancos (depressiones). Éstos tienen profundidades mayores, en ocasiones limitadas por capas freáticas.

Tabla 1. Principales parámetros de los semivariogramas.

Variable	Unidades	Observaciones	Tipo	Pepita	Meseta	Rango
Profundidad suelo	cm	310	-	-	-	-
Capacidad de campo	%	301	lineal	30	8	2.800
Punto de marchitez	%	301	lineal	20	10	3.200
Dosis de riego	mm	301	esférico	400	560	3.300
Superficie tablar	m ²	269	-	-	-	-
Longitud tablar	m	269	esférico	4.000	3.250	2.000
Eficiencia aplicación	%	92	esférico	400	260	1.000

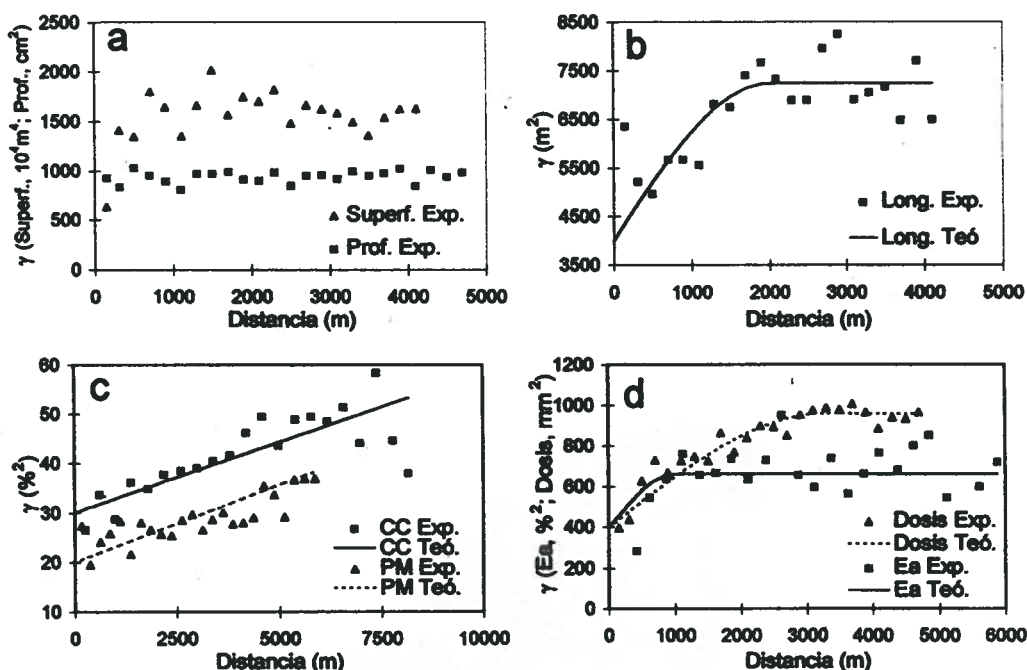


Figura 2. Semivariogramas experimental y teórico correspondientes a las variables: profundidad del suelo (a), superficie del tablar (a), longitud del tablar (b), capacidad de campo (c), punto de marchitez (c), dosis de riego (d) y eficiencia de aplicación actual (d).

Las figuras 4 y 5 presentan los mapas de capacidad de campo y punto de marchitez, respectivamente. En ellas se aprecia que los menores valores se asocian con las zonas de *saso*, mientras que los suelos de val y glacis retienen más agua. La figura 6 presenta el mapa de dosis de riego. Los *sasos* tienen texturas gruesas, abundante pedregosidad y suelos poco profundos, por lo que su dosis de riego es extremadamente baja. Sin embargo, otras zonas (bordeando los barrancos) presentan dosis cercanas a los 100 mm.

Los mapas de longitud y área de los tablares (figuras 7 y 8) presentan similitudes. En general, ambas variables toman valores elevados en las zonas transformadas por el Instituto Nacional de Colonización alrededor de los dos barrancos principales. Se trata de áreas deprimidas y llanas que antes de la transformación estaban mal drenadas y fuertemente

salinizadas. En estas zonas los tablares son predominantemente alargados y estrechos, mientras que en el resto del regadío de la Comunidad los tablares son más pequeños y más cuadrados.

Una vez realizados estos mapas se estimó el valor de las variables en cada agrupación. Estos valores se utilizaron para realizar simulaciones con SIRMOD y obtener estimaciones de la eficiencia de aplicación del riego en cada agrupación. En todos los casos se supuso una pendiente media del 0.0005 y una n de Manning de 0.12. El caudal medio obtenido de la base de datos es de 84 l s^{-1} . Este valor se corresponde con la capacidad nominal media de las acequias de la comunidad, que en general no se alcanza debido a problemas de mantenimiento de las infraestructuras. Esto se muestra por el hecho de que el caudal medio medido en las 15 evaluaciones es de 67 l s^{-1} . Las eficiencias características de la situación actual obtenidas en este trabajo (figura 9) podrían estar por lo tanto ligeramente sobrestimadas. El mapa revela limitaciones muy importantes en la zona de sasos, donde la eficiencia actual está por debajo del 40%. En otras zonas, la situación actual revela eficiencias aceptables, cercanas al 80%. La eficiencia media alcanzada en toda la Comunidad es del 54%.

La determinación de las propiedades de cada agrupación y la disponibilidad de modelos del riego por superficie permiten elaborar múltiples escenarios de modernización del perímetro regado. A título ilustrativo, en la figura 10 se presenta el mapa de eficiencia correspondiente a un escenario futuro de caudal nominal de 200 l s^{-1} en toda la Comunidad de Regantes. El aumento del caudal tiene un elevado impacto sobre la eficiencia de aplicación. En el saso la eficiencia se sitúa en torno al 40-50%, mientras que en las zonas llanas de los barrancos se llega al 80-90%. La figura 11 presenta la mejora de la eficiencia al aumentar el caudal. La mejora se produce de una forma bastante uniforme aunque los sasos tienen peores perspectivas y alcanzan valores de eficiencia menores. En datos no presentados, se estudiaron otros escenarios de caudal de 50, 100 y 150 l s^{-1} . La eficiencia media resultante fue del 46, 57 y 62%, respectivamente. En el escenario de 200 l s^{-1} se encontró una eficiencia del 65%.

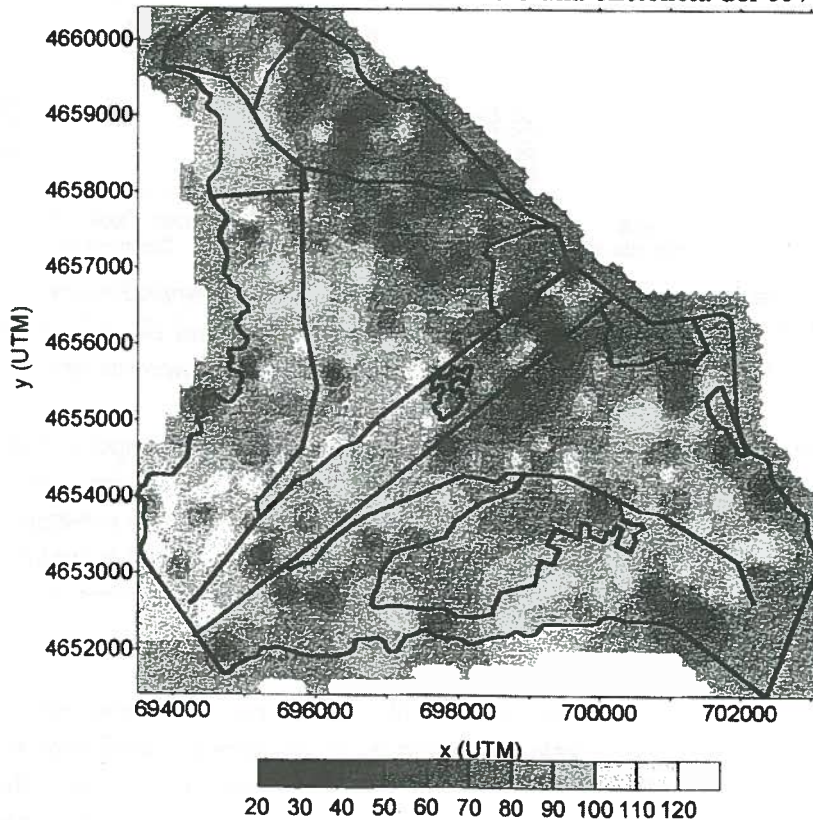


Figura 3. Representación en curvas de nivel de la profundidad del suelo (cm).

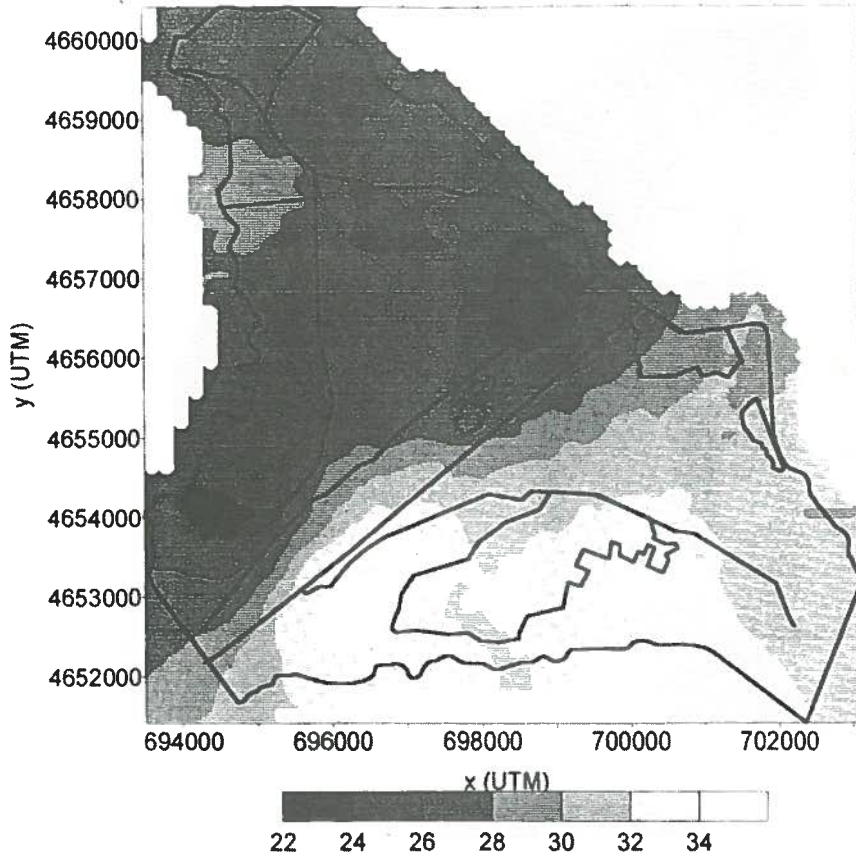


Figura 4. Representación en curvas de nivel de la capacidad de campo (%).

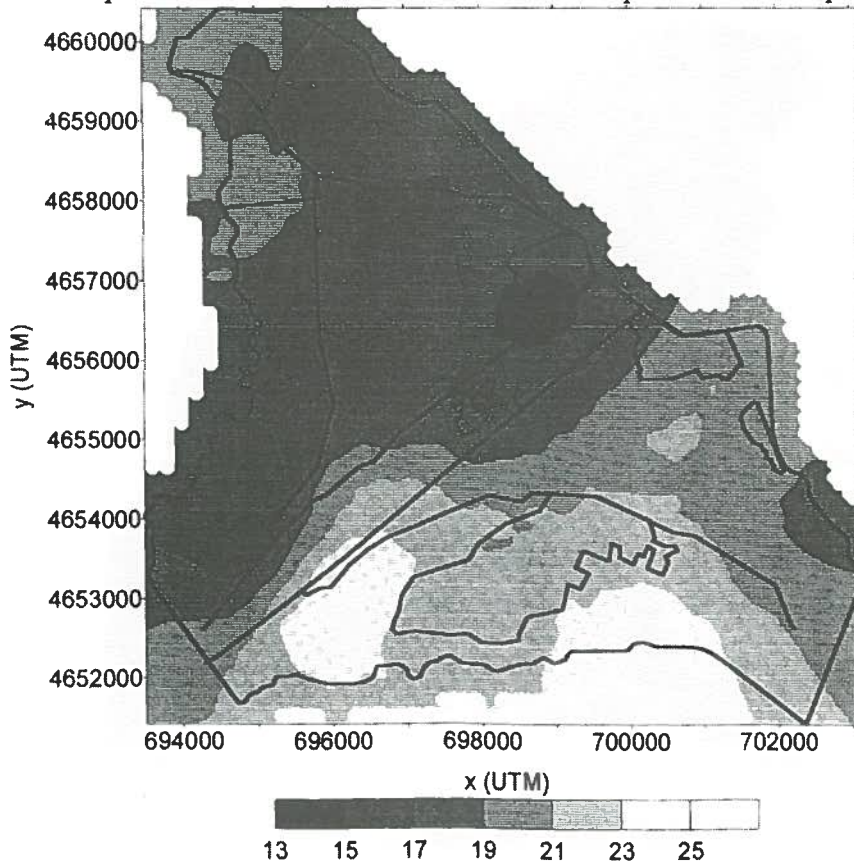


Figura 5. Representación en curvas de nivel del punto de marchitez (%).

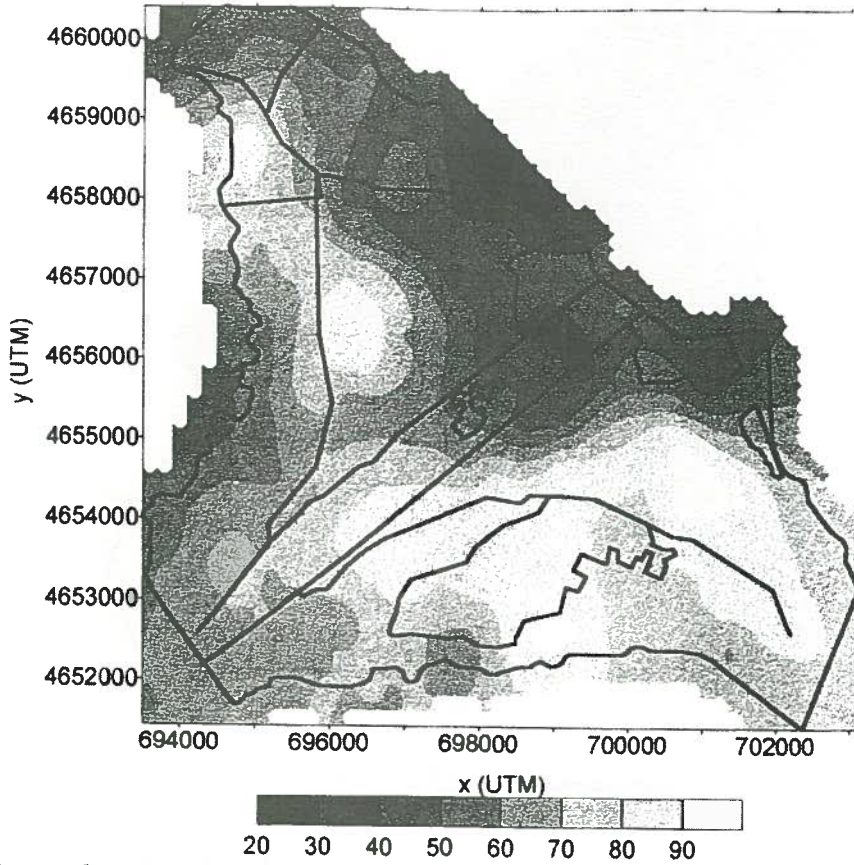


Figura 6. Representación en curvas de nivel de la dosis de riego (mm).

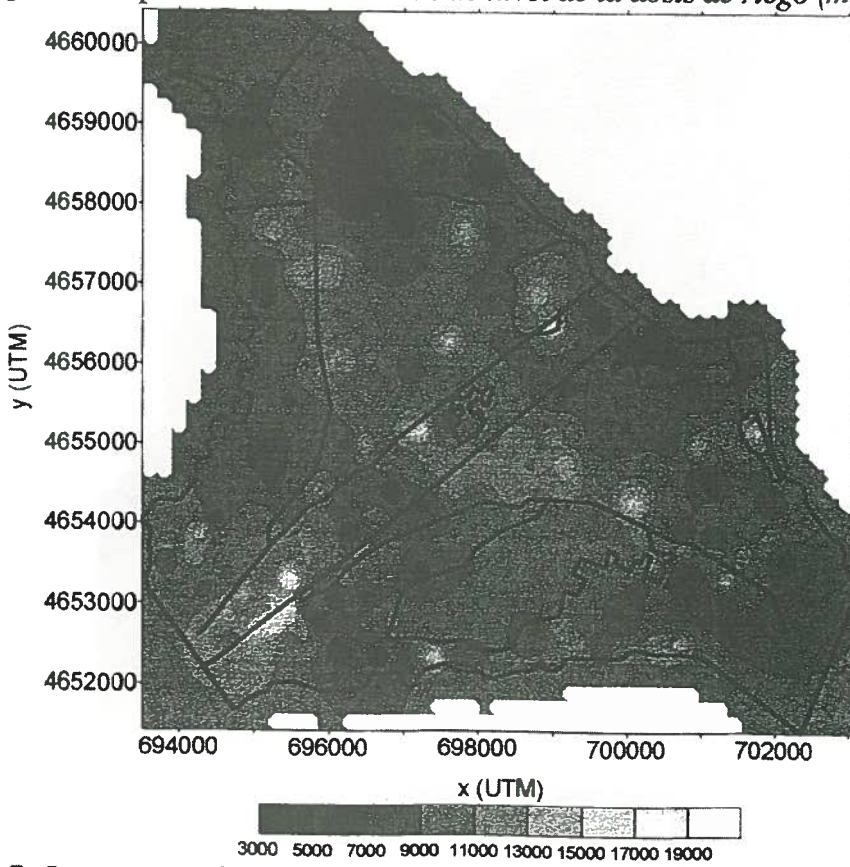


Figura 7. Representación en curvas de nivel de la superficie de los tablares (m²).

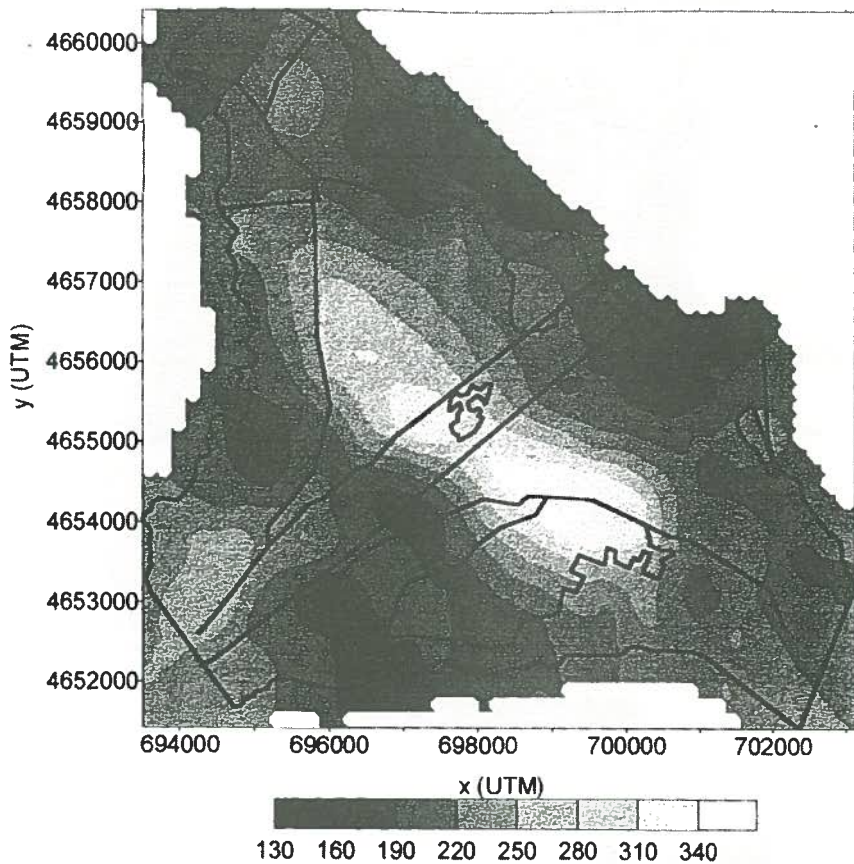


Figura 8. Representación en curvas de nivel de la longitud de los tablares (m).

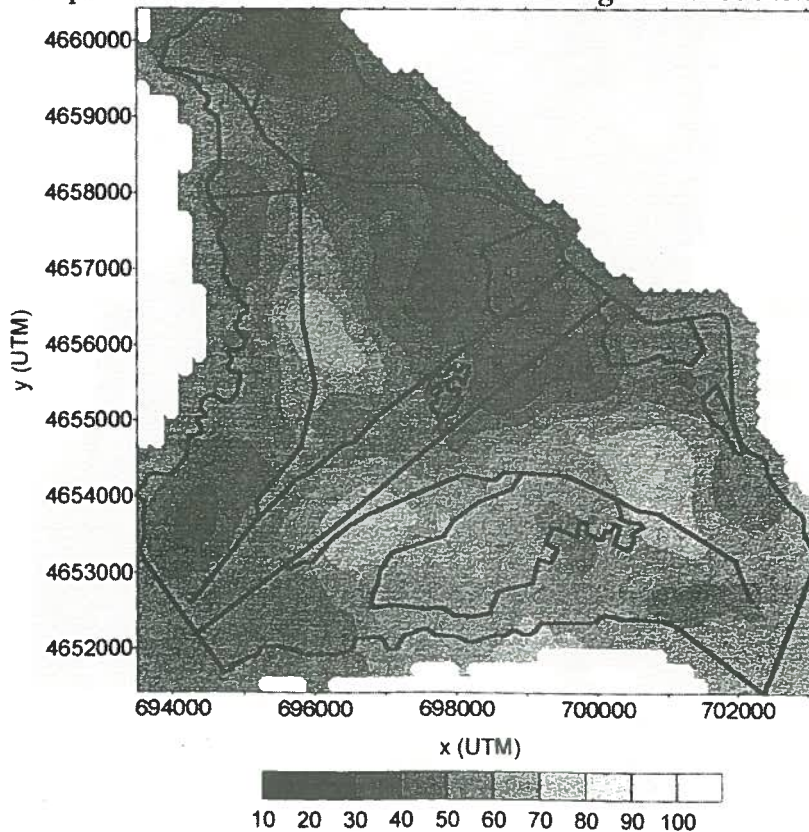


Figura 9. Representación en curvas de nivel de la eficiencia de riego actual.

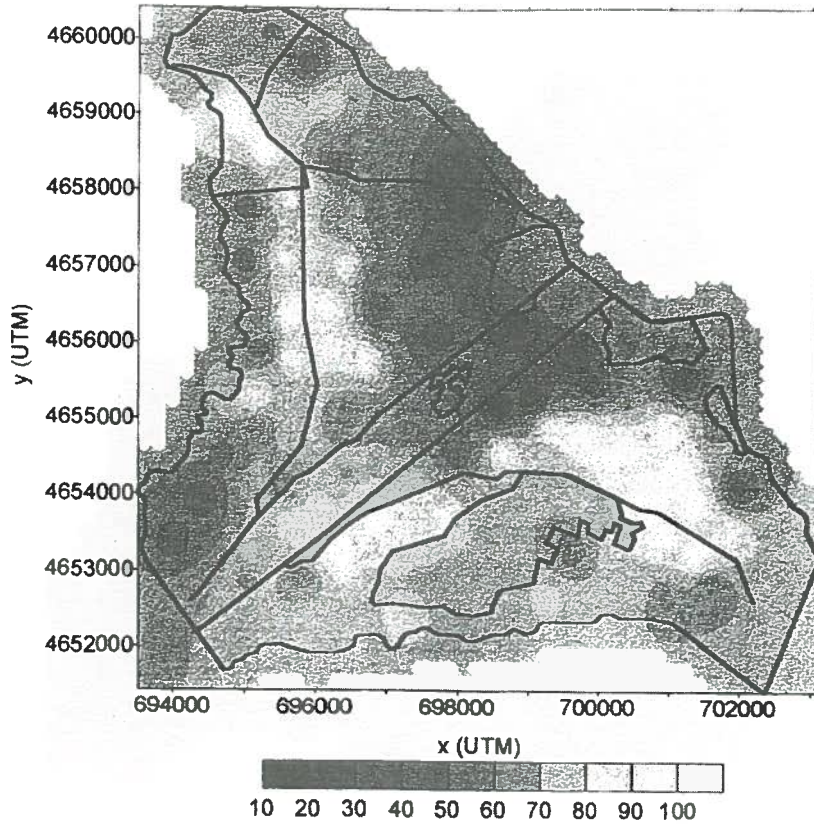


Figura 10. Representación en curvas de nivel de la eficiencia de riego correspondiente a un escenario de caudal de riego de 200 l s^{-1} en toda la comunidad.

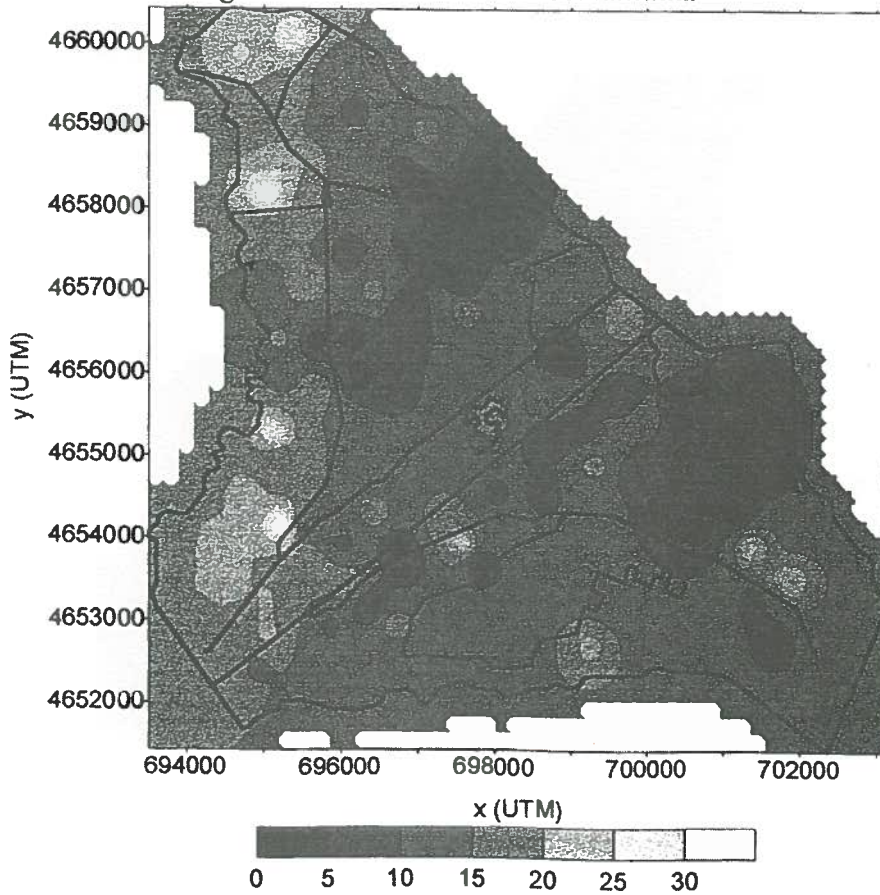


Figura 11. Representación en curvas de nivel de la mejora de la eficiencia de riego debida al aumento del caudal de riego a 200 l s^{-1} en toda la comunidad de regantes.

Conclusiones

Hemos presentado una metodología que permite generar y evaluar alternativas de modernización de zonas de riego por superficie. En este caso, se ha aplicado a una Comunidad de Regantes cuyos límites coinciden con los de un Sector Hidráulico. La evaluación de la alternativa propuesta no se da por concluida, ya que es necesario realizar un análisis de costes de la modernización. De esta manera, el planificador podría conocer la relación entre la inversión por hectárea y el volumen de agua regulada ahorrada por la mejora de la eficiencia. Otros índices de tipo ambiental (exportación de sales) o socioeconómico (necesidad de mano de obra destinada al riego) serán en el futuro contrastados con la inversión necesaria para las distintas alternativas de modernización.

En cuanto a la zona de Almudévar, el análisis expuesto permite concluir que las expectativas de la zona de saso no son buenas ni siquiera en presencia de caudales elevados. Es muy probable que la mejor solución para esta zona sea la transformación a un tipo de sistema de riego a presión. Finalmente, otros factores no considerados en este análisis son primordiales en el éxito del riego por superficie. Así, la abundancia de yeso en los suelos de la margen oeste de la zona de estudio (desde el límite hasta la mitad de la distancia que lo separa del barranco de Violada) provoca simas con mucha frecuencia. La poca estabilidad de estos suelos hace que cualquier modernización pase por un cambio a un sistema de riego a presión.

El aumento del caudal no sólo mejora la eficiencia de aplicación, sino que tiene un efecto muy positivo sobre el tiempo de riego. En la situación actual el tiempo medio de riego de un tablar es de 312 min, mientras que en el escenario de 200 l s^{-1} éste se reduce a 80 min. Esta variable tiene una gran importancia en la modernización de la Comunidad de Regantes de Almudévar, ya que una disminución del tiempo de riego permitirá acortar la jornada de riego que actualmente es de 24 h. Esto mejorará la aceptación social del trabajo en la agricultura y favorecerá la continuidad y prosperidad de la actividad. El aumento de la capacidad de las acequias debe de ir ligado a la construcción de embalses de regulación interna que permitan regar sólo durante el día aún en el periodo punta del año.

Agradecimientos

Agradecemos a la Comunidad de Regantes de Almudévar por su apoyo e interés en la realización de este trabajo. También agradecemos la colaboración de Susana Dena, Olga Puente, Daniel Isidoro, Rebiha Kaoiouché y todos los que nos han ayudado en el campo y el laboratorio. Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de demostración INIA 946.

Bibliografía

- Walker, W. R., 1993. *SIRMOD, Surface irrigation simulation software*. Utah State University, Logan, Utah. 25 pp.
- Merriam, J. L., Keller, J., 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Utah State University, Logan, Utah. 271 pp.
- Clark, I., 1979. *Practical Geostatistics*. Applied Science Publishers, Ltd., Ripple Road, Barking, Essex, England. 129 pp.
- Torres, M., 1983. *Balance hidrosalino de un polígono de riego en los llanos de la Violada (Huesca)*. Tesis de Master, Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (CIHEAM). 274 pp.

DISEÑOS DE ARQUITECTURA MODULAR VS CONTROLADORES LÓGICOS (PLCs) EN SISTEMAS DE APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS DIFERENCIALES EN RIEGOS AUTOPROGRAMADOS (APR).

I. Llanos Triviño¹ (P)
J.V. Giráldez Cervera²
M. López Rodríguez³

RESUMEN:

El documento plantea una contrastación de dos posibles soluciones a la manipulación automatizada en el campo de los tratamientos diferenciales de riego en los que las aplicaciones se realizan mediante el control y valoración continua de parámetros ejecutivos de suelo, planta o clima. Una de las opciones consideradas es la construcción del automatismo mediante el ensamblaje de elementos de tipo discreto (módulos). La otra consiste en la utilización de controladores lógicos programables (PLCs). De la comparación entre ambas opciones se deduce que cuando el diseño no es complicado, el sistema modular ofrece mayores ventajas por el mayor control del sistema, carácter didáctico, precio y facilidad de reparación. La utilización de los PLCs quedaría condicionada a diseños complejos. Incluso en algunos casos en los que hay que manipular señales digitales y analógicas, podría ser más interesante una opción mixta.

ABSTRACT

A comparison has been made among two different option for the automatic control of irrigation systems. In both cases there is a continuous recording of environmental variables. In the first option, the automatic control consists of several unit, one for each irrigation treatment. The second option is based on a programmable logic systems requiring a complex design, since it is cheaper, requires lower maintenance, and it is easier to control than the modular options. Nevertheless, a mixed system using both options could be recommendable in some systems using analogical signals.

INTRODUCCION

La planificación de un diseño experimental en base a tratamientos diferenciales de riego, tiende hoy día a la simplificación operativa entendiendo por este concepto la fiabilidad de comportamiento y la escasez de requisitos de mantenimiento de los sistemas operativos durante largo tiempo. Se pretende por otra parte que el sistema opere de forma autónoma, sin ajustes ni correcciones en el tiempo. Desde hace años estamos trabajando con diseños operativos de mayor o menos complejidad cuya finalidad es generar riegos autoprogramados (APR) (Llanos y col, 1993, 1994). Son riegos que se planifican de forma autónoma mediante el control continuo de parámetros edáficos, climáticos o bióticos. Para la lectura continua de estos parámetros decisorios del riego se utilizan sensores específicos (de posición,

¹ Doctor Ingeniero Agrónomo. CIDA. Córdoba

² Catedrático ETSIAM. Córdoba

³ Ingeniero Agrónomo. CCEA. Chipiona. Cádiz

temperatura, presión, humedad, etc.) que, convenientemente manipulada la señal que emiten, pueden realizar los controles operativos deseados. Por su generalización, facilidad de manipulación y fiabilidad por la alta correlación entre necesidades hídricas y valores determinados, el contenido del agua en el suelo y la demanda evaporativa del aire son los factores más utilizados en la planificación diferencial de los riegos. El primero de ellos se utiliza para tratamientos diferenciales de muy diverso tipo: abonado, uso de agua de calidad variada, mantenimiento de un potencial del agua en el suelo, riegos deficitarios, opciones de agricultura sostenible, etc.. El segundo de ellos, iría más dirigido a trabajos sobre las relaciones planta-atmósfera y estudios sobre cadencias, tiempos de aplicación, densidades variables de humectación superficial con análogos volúmenes de agua aplicada, etc..

MATERIAL Y METODO

La síntesis del comportamiento secuencial de ambos debe ser algo parecido a lo que se refleja en la figura 1.

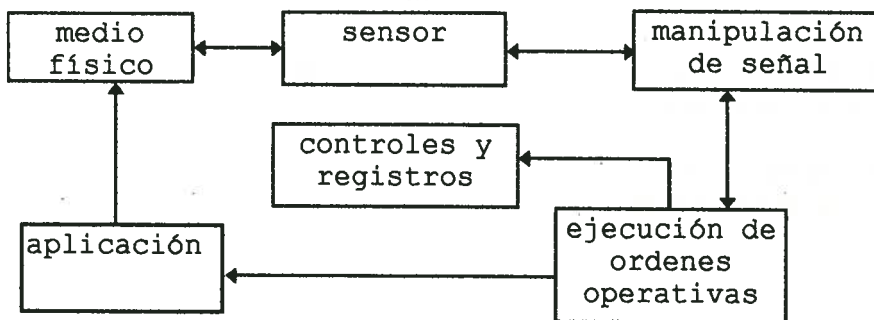


Figura 1. Diagrama de comportamiento de un sistema autónomo de ejecución.

Su descripción es la siguiente: Fijado el medio a controlar y el parámetro a medir, se selecciona el sensor correspondiente, el cual genera una señal de tipo analógico o digital. Esta señal, debidamente tratada, produce, cuando alcanza el valor crítico seleccionado de activación, las órdenes operativas correspondientes. Una serie de elementos complementarios se encargan de realizar los controles y registros pertinentes.

Para la realización de estas funciones se puede recurrir a dos principales tipos de diseños operativos: los de arquitectura modular y los basados en los controladores lógicos. El primero de ellos, utiliza componentes de tipo discreto para la realización de todas las funciones (riego y abonado) y es repetitiva para cada tratamiento, es decir, existen tantos bloques modulares como tratamientos diferenciales, aunque, a veces, puede simplificarse con la utilización de algún elemento común. El segundo, utiliza un autómata que, convenientemente programado, realiza las funciones operativas que se le demandan.

Para comparar ambas opciones se va a analizar un ejemplo básico de utilización. Se trata de estudiar los efectos del riego con tres calidades distintas de agua sobre un cultivo. El planteamiento de la experiencia consiste en controlar el potencial de agua en el suelo en cada tratamiento y regar de forma automática cuando se alcance un valor prefijado. El riego se aplica por la técnica de goteo bajo la modalidad de tipo pulsante (tiempos de aplicación y reposo dentro de cada orden de riego) (Llanos y col, 1992).

1. Diseño modular

En este tipo de diseño, cada operación del proceso es encargada a un componente específico (módulo). Cuando el elemento sensor detecta el valor determinado para el comienzo del riego, altera las condiciones de equilibrio del elemento receptor de la señal. Esta alteración produce la activación de un temporizador cíclico asimétrico programable para establecer la cadencia pulsante del riego. Durante los pulsos de riego, un segundo temporizador cíclico se encarga de aplicar el abono por medio de una bomba inyectora de fertilizante. Este segundo temporizador se programa para respetar tiempos iniciales y finales sin abonado.

Si utilizamos una bomba de riego única para los tres tratamientos se necesitará como material complementario una bomba, una electroválvula en la fase de aspiración y otra en la fase de impulsión para cada uno de los tratamientos.

Haciendo un recuento, necesitamos para el conjunto de los tres tratamientos el siguiente material: tres sensores, tres receptores, seis temporizadores cíclicos, una bomba de riego y seis electroválvulas.

El esquema de relación entre componentes del conjunto de la instalación lo podemos ver en la figura número 2.

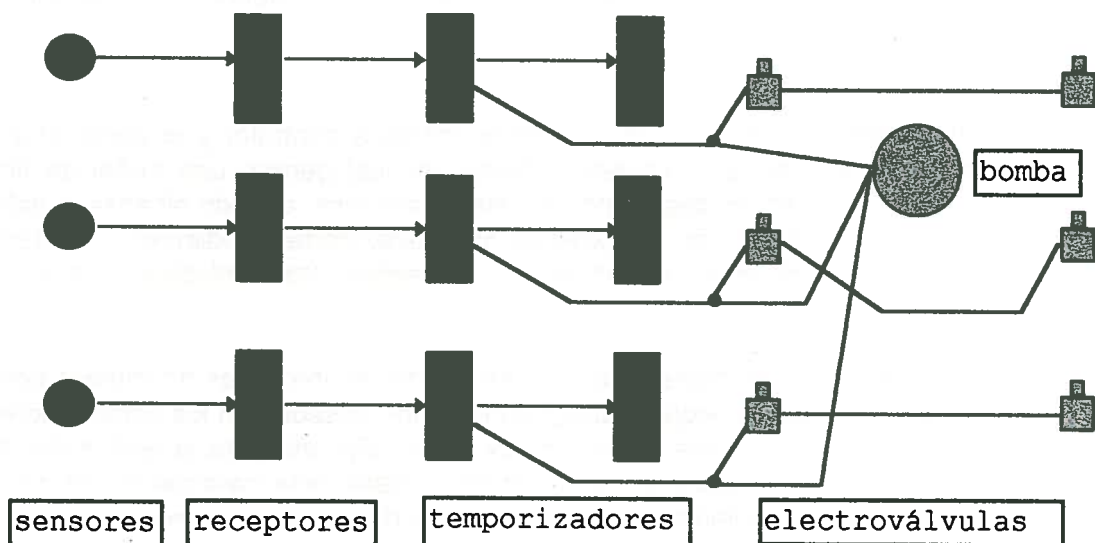


Figura 2. Diseño modular para tres tratamientos diferenciales en un sistema APR.

Su funcionamiento es el siguiente: cuando el suelo alcanza la humedad crítica, el sensor envía la señal al receptor. Este activa el TC1 el cual abre las dos electroválvulas correspondientes. Simultáneamente manda una señal al TC2 para que aplique el abono. Un ejemplo de comportamiento podría ser el recogido en la figura 3.

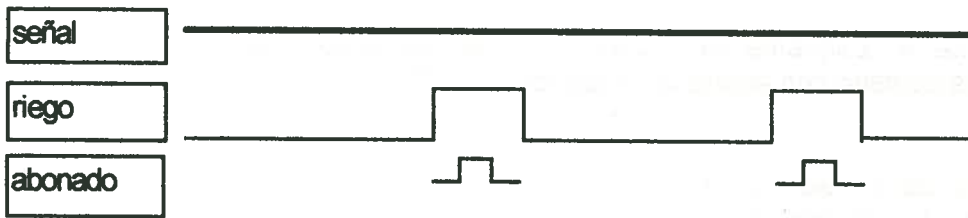


Figura 3: Ejemplo gráfico del comportamiento del sistema APR con abonado.

2. Diseño de programación por PLC.

Con la utilización de un controlador de lógica programable (PLC) se puede igualmente realizar el conjunto de operaciones anteriores. El PLC elimina los elementos modulares ya que él mismo los contiene en su estructura electrónica. El PLC está dotado de una serie de entradas y salidas. Por las entradas se le comunica el estado de las variables controladas y por las salidas se activan los elementos operativos. En el ejemplo que nos ocupa tenemos como entradas operativas las emitidas por los sensores de humedad. Como salidas, tendríamos las señales que activan las electroválvulas, la bomba de riego y la bomba inyectora.

Para que las salidas operen de acuerdo con nuestro objetivo es necesario programar el PLC. La programación sigue normalmente la lógica booleana y su escritura se realiza mediante diversos lenguajes. El programa se puede representar en diagrama de escalera a base de símbolos y funciones lógicas o codificado (mnemotécnico).

Como primera aproximación vamos a construir un programa mnemotécnico, para realizar las funciones que necesitamos. Podemos resumir las necesidades en lo siguiente:

Entradas: Tres, una por cada tratamiento

Salidas: una para la motobomba común a los tres tratamientos; una para el abonado, común también a los tres tratamientos (en el ejemplo no se considera diferencias de abonado y se establece que la coincidencia entre riegos de distintos tratamientos será mínima) y tres para las electroválvulas (una por cada par de electroválvulas correspondientes a cada tratamiento). En la figura 4 podemos ver el esquema de entradas y salidas.

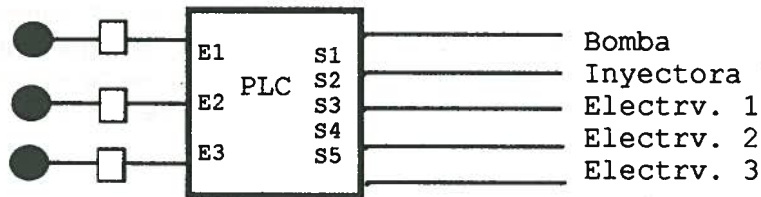


Figura 4. Esquema de conexionado de un automatismo APR para tres tratamientos de riego con abonado, utilizando un PLC.

Para las señales de entrada se utilizarán los contactos NO (normalmente abiertos) de los receptores de señal de los sensores. Las salidas se utilizarán directamente para las electroválvulas e indirectamente a través de relés operativos para la bomba de riego y las bombas inyectoras.

Por detallar el proceso y la versatilidad potencial de estos equipos, se presentan dos programas diferentes. En el primero, se realiza el riego en las condiciones planteadas (se considera tiempo activo de 1 minuto y de reposo 5), pero sin aplicar abonado (se supone, por ejemplo, que el abono se incorpora al depósito de reserva de agua de cada tratamiento). Los tiempos vienen expresados en décimas de segundo.

```

1. LD 0000          entrada tratamiento 1
2. ANB T001
3. TMR 000 #03000  tiempo de reposo tratamiento 1
4. LD T000
5. TMR 001 #00600  tiempo activo tratamiento 1
6. OUT 0504        salida motobomba
7. OUT 0500        salida electrv. Trat. 1
8. LD 0001         entrada tratamiento 2
9. ANB T003
10.TMR 002 #03000  tiempo de reposo tratamiento 2
11.LD T002
12.TMR 003 #00600  tiempo activo tratamiento 2
13.OUT 0504        salida motobomba
14.OUT 0501        salida electrv. Trat. 2
15.LD 0002
16.ANB T005
17.TMR 004 #03000  tiempo de reposo tratamiento 3
18.LD T004
19.TMR 005 #00600  tiempo activo tratamiento 3
20.OUT 0504        salida motobomba
21.OUT 0502        salida electrv. Trat. 3
22.END
23.ENDH

```

Las líneas 1 a 7 del programa son las realmente originales; el resto, son repeticiones para completar los tres tratamientos.

En el programa siguiente se realiza las funciones de riego y abonado tal y como se indica en la figura 3:

1. LD 0001	entrada de señal del tratamiento 1
2. OUT 1000	
3. LD 1000	
4. ANB T001	
5. TMR 000 #03000	tiempo de reposo tratamiento 1
6. LD T000	
7. TMR 001 #00600	tiempo activo tratamiento 1
8. OUT 0504	salida motobomba
9. OUT 0500	salida electr. Tratamiento 1
10.LD 0500	
11.OUT 1001	
12.LD 1001	
13.ANB T003	
14.TMR 002 #00100	tiempo de reposo bomba inyectora
15.LD T002	
16.TMR 003 #00400	tiempo activo bomba inyectora
17.OUT 0505	salida bomba inyectora
18.END	
19.ENDH	

Este programa, por evitar un listado demasiado largo, serviría para un tratamiento. Las líneas de programa 10 a 17 son las añadidas para realizarla función de abonado. Para utilizarlo con el ejemplo adoptado, este bloque sería común a los tres tratamientos, añadiendo dos partes análogas a las líneas 1 a 9, modificando las correspondientes entradas y salidas.

RESUMEN

Se puede establecer el siguiente cuadro de valoración, siempre en el entorno de las aplicaciones estudiadas.

1. Diseños modulares

Ventajas:

- Económico para funciones mínimas (hasta tres temporizaciones/contadores condicionadas o no)
- Permite el conocimiento funcional y secuencial
- Es suficiente para su utilización unos conocimientos elementales de electricidad y electrónica
- La avería de un componente permite su fácil sustitución.
- Permite utilizar módulos multifunción para sustituir temporalmente módulos averiados.

Inconvenientes:

- Cuando se sale de un diseño básico, se genera una compleja red de conexiones, fuente a veces de averías.
- Los registros y controles necesitan un registrador gráfico o almacenador de datos a tiempo real.

2. Diseños en base a PLCs

Ventajas:

- Es más económico a partir de tres temporizadores/contadores
- Es versátil. Un mismo equipo permite infinidad de funciones.
- Permite trabajar a tiempo real (si disponen de reloj interno).

Inconvenientes:

- Una avería en el autómata inutiliza el sistema de forma global.
- El trabajo con entradas analógicas incrementa de forma importante el precio del equipo
- Necesita elementos complementarios para su programación (PC o programador de mano).
- Exige el conocimiento de funciones lógicas y lenguaje de programación.
- Su reparación, en caso de avería, requiere personal especialmente cualificado.

CONCLUSIONES

Los dos sistemas pueden proporcionar (y de hecho así ha sido en nuestras aplicaciones) resultados satisfactorios. Los sistemas modulares se han utilizado más en trabajos de campo, mientras que los sistemas en base a PLCs en trabajos de laboratorio. Aparte de las consideraciones anteriores, los planteamientos, finalidad y particularidades que se hagan sobre cada experiencia o aplicación concreta, serán los factores que decidan la adopción de uno u otro sistema.

BIBLIOGRAFIA

Llanos, I., López, M. y Mósig, J. 1992. Sistema de ahorro energético en invernadero mediante riego localizado tipo pulsante. 17 Conferencia Internacional de la Sección IV de la Comisión Internacional de Ingeniería Rural. Univ. Pública de Navarra. Pamplona.

Llanos, I., López, M. y Mósig, J. 1993. Comportamiento comparado de dos sistemas autoprogramados de riego. 25 Conferencia Internacional de Mecanización Agraria. Zaragoza.

Llanos, I., López, M. y Mósig, J. 1994. Riego de flor cortada mediante autoprogramación. Revista Riegos y Drenajes: nº 79:23-27.

EVALUACIÓN DE TRES EQUIPOS COMERCIALES DE TDR PARA MEDICIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

J.A. Gómez¹ (P), M. Bernardes^{1,2}, S. Bonachela¹, F.J. Villalobos^{1,2}, L. Mateos¹

¹ Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Córdoba

² Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba.

Abstract

This paper describes the test of three TDR moisture sensors (Trase 6050X1, TRIME-FM "Tube Probe" y TRIME-FM "two rods") for the soils of Alameda del Obispo, Cordoba. Three Trase probe models were tested (two of 20 cm and one of 15 cm). It was observed that the TRASE TDR underestimated the soil water content for the tested soil when the calibration curve (volumetric moisture vs dielectric constant) given for the manufacturer was used. Therefore, a new calibration curve was calculated.

It was found that the TRIME "Tube Probe" equipment underestimated the soil water content for values greater than 24%. A new calibration curve was obtained and finally this new relation was tested using two field experiments. In these experiments it was found a poor correlation between the soil water content measured by the TRIME TDR and the values measured using other devices (neutron probe or TRASE TDR). Probably, it was due to bad contact between the access tube and the soil. The TRIME "two rods" sensor was tested by a field experiment and a poor correlation between measured and observed values was noted. The conclusion was that the TDR probe needs a new calibration curve.

Resumen

En este trabajo se evalúa el comportamiento de tres equipos comerciales de TDR (Trase 6050X1, TRIME-FM "Tube Probe" y TRIME-FM "dos vías"), en suelos de la Finca Alameda del Obispo, Córdoba. Para el Trase 6050X1, se probaron tres tipos de sonda (dos de 20 cm y una de 15 cm de longitud), todas de tres vías. Se comprobó que la utilización del equipo con la calibración estándar facilitada por el fabricante infraestima el contenido de agua en el suelo. Se determinó una nueva relación constante dieléctrica (K_a)-Humedad volumétrica (θ_v) para el suelo del estudio. Esta relación fue la misma para los tres tipos de sonda, al no encontrarse diferencias significativas entre sus lecturas. Con respecto al TRIME-FM con "Tube Probe" se comprobó en macetas que la calibración estándar sobrestimaba la humedad volumétrica del suelo para valores mayores del 24%. Por ello se realizó una nueva calibración en maceta y se probó el comportamiento de este equipo en campo mediante dos ensayos diferentes. En ellos no se encontró buena correlación con la humedad del suelo (medida con sonda de neutrones, gravimétricamente o con otro equipo de TDR) probablemente debido a la falta de un buen contacto del tubo de acceso con el suelo. Para el TRIME de dos vías se efectuó un ensayo en campo en el que la disposición de los sensores permitía contrastar sus lecturas con medidas simultáneas con sonda de neutrones y con el TDR Trase 6050X1, concluyéndose que este equipo también requiere una calibración específica.

La conclusión general es que estos equipos de TDR requieren calibraciones específicas para el suelo estudiado.

Introducción

La técnica "Time Domain Reflectometry" ha experimentado una importante difusión en los últimos años (Dalton, 1991), gracias a su facilidad de uso y precisión al compararla con muestreos gravimétricos o con sonda de neutrones. Presenta también diversos inconvenientes, como es la falta de información y contraste experimental de la precisión facilitada por el fabricante. De hecho, existen referencias (Zegelin et al., 1991) sobre el error cometido siguiendo la relación universal entre humedad volumétrica (θ_v) y constante dieléctrica (K_a) propuesta por Topp et al. (1980) utilizada en los equipos analizados.

El presente trabajo tiene como objetivo contrastar la relación universal θ_v - K_a utilizada en tres equipos TDR comerciales, evaluar el comportamiento de los distintos tipos de sondas y, en su caso, proponer una calibración específica para los suelos de la finca Alameda del Obispo.

Materiales y métodos

Trase 6050X1

El primer equipo de TDR empleado fue el Trase 6050X1, de Soilmoisture Corporation © (Soilmoisture Corp., 1989). Se utilizaron tres sondas, todas de tres vías. Una fue la original que proporciona el fabricante de 20 cm de longitud, y dos fueron construidas por nosotros, de 20 y 15 cm de longitud. Desde ahora las denominaremos TRASE, AG20 y AG15 respectivamente. Las sondas diferían entre sí únicamente en aspectos constructivos tales como protección adicional del cable, cabezal plástico más robusto o punta de las vías afiladas para una mejor inserción en el suelo, teniendo todas el mismo diámetro y separación entre las vías. El suelo para el que se calibró fue el de la zona denominada Casillas, situado en el C.I.F.A., Córdoba. Se trata de un suelo franco-arenoso clasificado como "Typic Xerofluvents". Se realizaron tres pruebas que se describen a continuación.

Prueba 1:

En esta prueba se utilizó una única sonda AG20. Se tomaron muestras de tierra de diferente humedad, inmediatamente se homogeneizaba mezclando bien cada muestra y se metían en una maceta de aproximadamente 25 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. En ella se insertaba la sonda y se efectuaban seis lecturas, tomando el valor promedio. Para contrastar esta medida del TDR se tomaban muestras de la maceta y se determinaba mediante secado en estufa y conversión por densidad aparente (Klute, 1986)

Prueba 2:

En la segunda prueba se usaron cinco sondas, una TRASE, dos AG20 y dos AG15. Se llevó a cabo en laboratorio, y para obtener un perfil de suelo homogéneo, y con una humedad volumétrica determinada se siguió el siguiente procedimiento.

Se tomó tierra y se llevó a un contenido cero de humedad mediante secado en estufa a 105 °C. Con esta tierra se llenaron seis macetas del mismo tamaño que las empleadas en la primera prueba, previamente cubiertas, pesadas y selladas en su parte inferior. Las seis macetas se llenaron con suelo hasta un nivel de referencia, y volvieron a pesarse. Así se obtuvo el primer punto de lectura a humedad 0%. Para obtener incrementos sucesivos de humedad volumétrica (de 5 puntos cada vez), se vaciaba cada maceta sobre una bandeja, y se añadía el volumen de agua requerido mediante un pulverizador de mano mientras se mezclaba y homogeneizaba la muestra, tras ello volvía a introducirse en la maceta, cuidando de dejarla al nivel de referencia fijado. Las

pérdidas durante el proceso (tierra, agua evaporada), se controlaban mediante el pesado de la maceta llena antes y después de cada paso, siendo éstas despreciables. Este proceso se siguió hasta el 24% de humedad volumétrica, a partir de ahí, la agregación del suelo en bolitas de barro de aproximadamente 5 mm de diámetro, hacía imposible obtener un suelo homogéneo.

Cada sonda se insertaba una vez en cada maceta, y se efectuaban seis lecturas, empleándose su promedio. Así se obtenían seis puntos por sonda y contenido de humedad.

Prueba 3:

En el tercer ensayo se emplearon tres sondas : TRASE, AG20 y AG15, tres de las utilizadas en la prueba anterior. En este caso se usó un único recipiente, de aproximadamente 35 cm de altura y 32 cm de diámetro. Los contenidos de humedad se impusieron siguiendo la misma metodología de la segunda prueba, con la diferencia de que al llegar al contenido del 20%, se añadió el agua necesaria para alcanzar el 30%, tapando el recipiente herméticamente y esperando 8 días para su redistribución.

Cada sonda se insertaba en seis puntos por cada contenido de humedad, efectuándose dos lecturas. Cuando no existía zona sin alterar para insertar la sonda, volvía a homogeneizarse el suelo.

TRIME-FM ("Tube Probe")

Prueba 1:

Se utilizó el equipo TRIME-SYSTEM , de IMKO - MICROMODULTECHNIK (IMKO-Micromodultechnk,1994), con la sonda tipo tubo. La sonda es un cilindro que mide 200 mm de longitud y 42 mm de diámetro que puede desplazarse dentro de un tubo de policarbonato de 44 mm de diámetro y 1000 mm de longitud. El suelo fue el mismo que el descrito en las pruebas precedentes.

La primera fase de este ensayo fue realizada en laboratorio, y se usó una maceta cilíndrica de 300 mm de diámetro y 200 mm de altura. Para obtener un perfil de suelo homogéneo, se siguió el procedimiento empleado en la prueba 2 del Trase 6050X1. El tubo de acceso era colocado en el centro de la maceta en posición vertical y después se rellenaba la maceta con suelo teniendo especial cuidado en lograr un buen contacto con la pared del tubo de acceso.

La segunda fase se llevó a cabo en condiciones de campo en un área de 3x3 m cultivada con cebada, donde se instalaron dos tubos de acceso de 1 m , separados entre si 1 m. Para obtener un buen contacto del tubo de acceso con el suelo, se abrió un agujero de diámetro igual al del tubo de acceso y a continuación se introducía mediante una ligera presión. Después de la instalación se echó agua en este área hasta saturación. Posteriormente se iniciaron las lecturas con el TDR cada 20 cm de profundidad dos veces por semana. A una distancia de aproximadamente 30 cm del tubo se tomaron muestras de suelo a las profundidades correspondientes para determinación gravimétrica de la humedad. En los dos ensayos las lecturas del TDR fueron los valores medios de 5 lecturas consecutivas tomadas en intervalo de 30 segundos.

En ninguno de los ensayos se efectuaron correcciones de Ka debido a la temperatura (Roth et al., 1990), ya que la temperatura ni en el laboratorio ni en el campo se alejó de los 25°C, punto de corrección cero.

Prueba 2:

Para esta prueba se excavó una zanja de 1 m de profundidad por 1 de anchura y 1 de longitud, y en ella se colocaron un tubo de acceso de sonda de neutrones y otro para el equipo TRIME. A continuación volvió a rellenarse la zanja con la tierra extraída, cuidando de obtener un buen contacto entre los tubos de acceso y el terreno. Al ir rellenándola se instalaron sondas de TDR (TRASE de tres vías descritas en esta misma comunicación) en posición horizontal a las profundidades de 10, 30 y 50 cm (dos por profundidad). Una vez asentado el terreno se regó hasta saturación el 29 de Septiembre y se sembró de trigo. Las lecturas del contenido de humedad se hicieron desde el 6 de Octubre hasta el 27 de Marzo de 1995. Dado que no hubo precipitaciones apreciables, se obtuvieron medidas de humedad que fueron desde el 9 hasta el 38% en volumen.

TRIME-FM (dos vías)

En el mismo ensayo descrito en el apartado anterior se instalaron dos sondas de TDR TRIME-FM de dos vías en posición horizontal, una a 10 y otra a 30 cm de profundidad, y se tomaron medidas entre el 6 de Octubre y el 27 de Marzo.

Resultados

Trase 6050X1

Los resultados de la prueba 1 se recogen en la figura 1. El resultado indujo a pensar que la humedad volumétrica del suelo era infraestimada para valores comprendidos entre el 10 y el 20% por lo que se procedió a realizar la prueba 2.

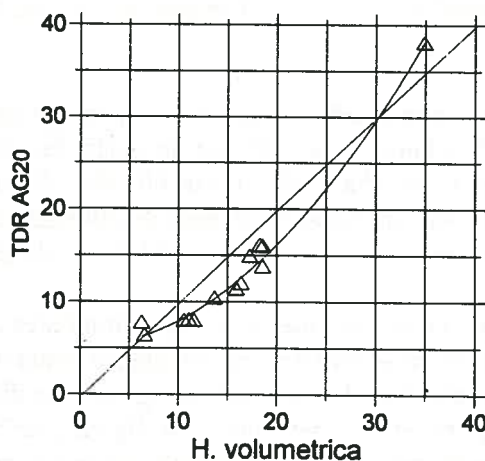


Figura 1. Relación entre el contenido de humedad medido con el TDR Trase y el medido por gravimetría en la Prueba 1

Con esta segunda prueba se obtuvo que las cinco sondas no midieron distinto entre sí para un nivel de significación del 99% (una idea gráfica de este resultado se observa en la Figura 2) y además se confirmó la infraestimación observada en la prueba 1 para el intervalo de humedad evaluado.

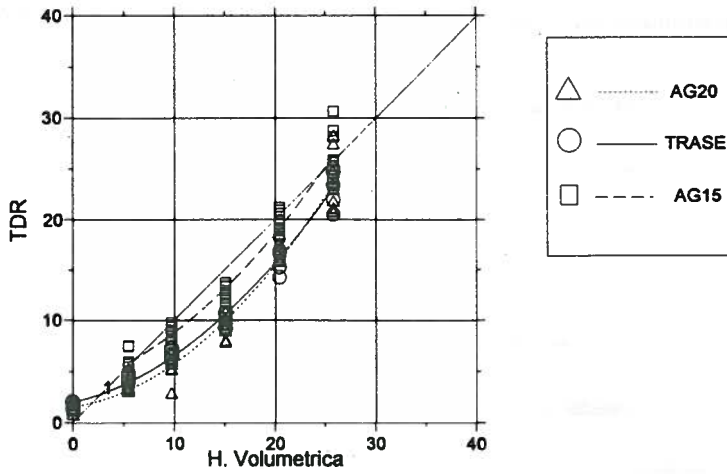


Figura 2. Relación entre el contenido de humedad medido con el TDR Trase en la Prueba 2 y el obtenido por gravimetría.

La tercera y última prueba tuvo como objetivo determinar si se había cometido algún error debido al empleo de diferentes macetas, y a no contemplar el efecto de insertar varias veces en cada una. También se pretendía ampliar el intervalo de humedad estudiado. Se comprobó que las tres sondas seguían sin diferir entre sí (al mismo nivel de significación del 99%) y que la tendencia de desviación en la medida era consistente, como puede verse en la figura 3.

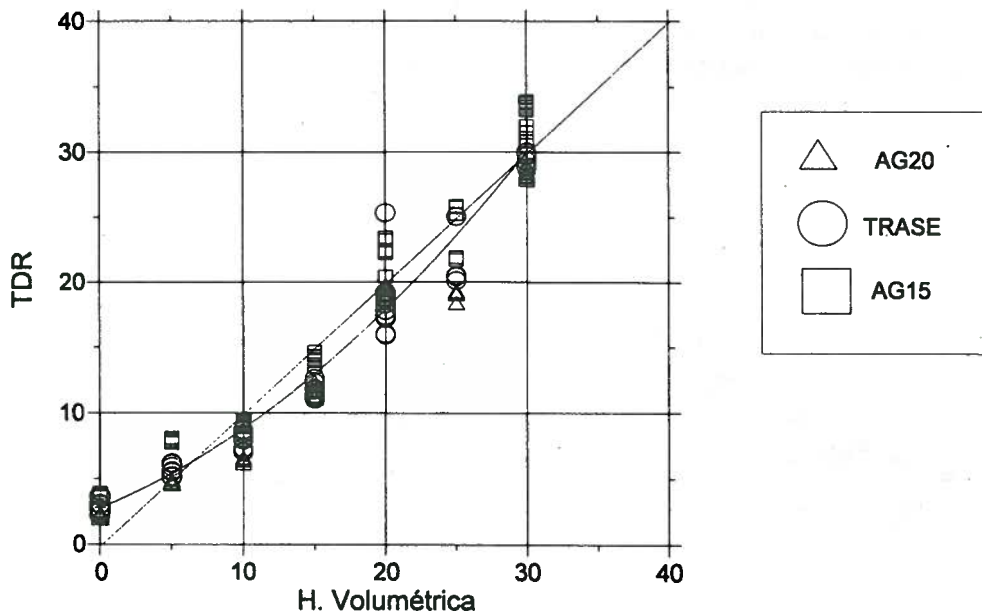


Figura 3. Relación entre el contenido de humedad medido con el TDR Trase y el obtenido por gravimetría en la Prueba 3

En consecuencia, se decidió emplear todos los pares de puntos K_a vs θ_v (impuesta) para construir una curva de calibración para Casillas (Figura 4). Esta curva de calibración no es válida para valores de K_a mayores de 18 (que en el suelo estudiado son valores comprendidos entre capacidad de campo y saturación), no alcanzados con el dispositivo experimental dispuesto.

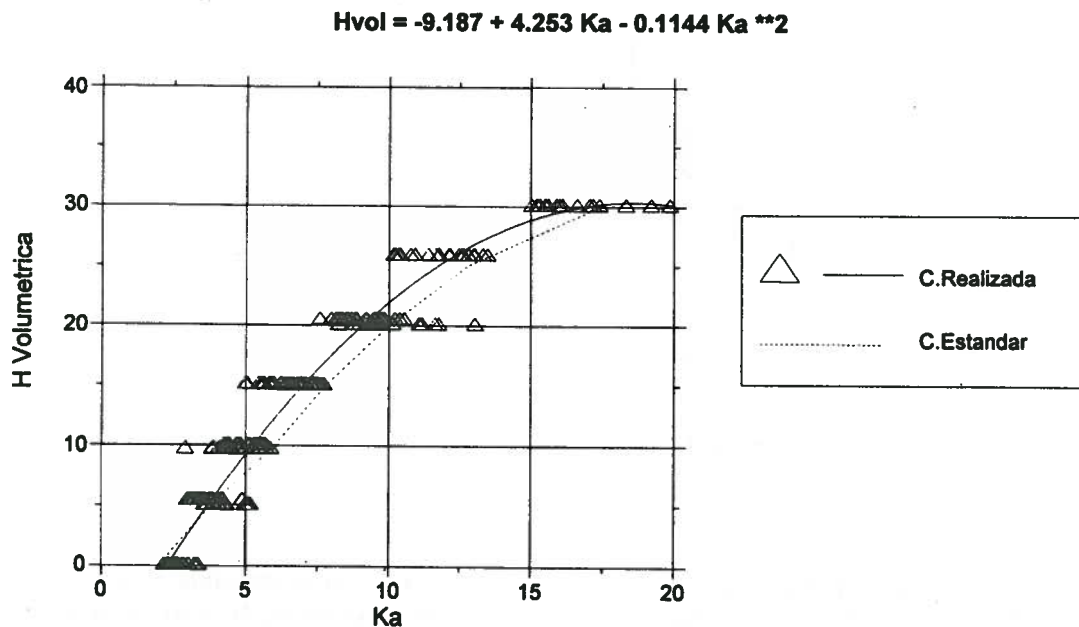


Figura 4. Curva de calibración del TDR Trase 6050X1

TRIME-FM (Tube Probe)

Los resultados del ensayo hecho en el laboratorio (Figura 5), muestran que el TDR sobrestimaba la humedad del suelo para valores mayores que 20%. Se determinó una nueva recta de calibración que presentó un coeficiente de determinación de 0.95.

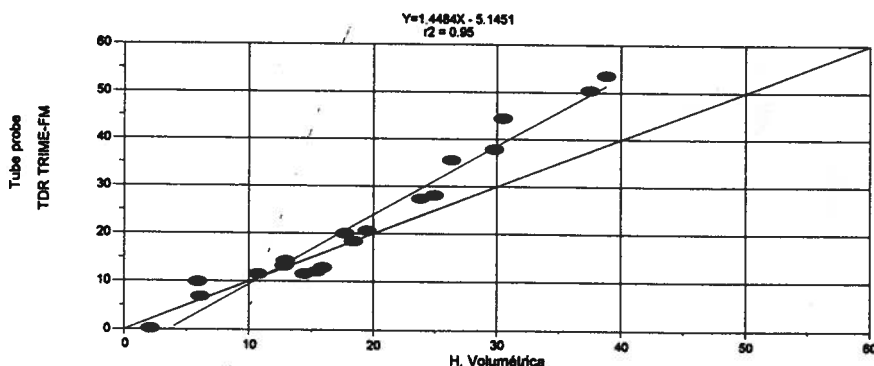


Figura 5. Relación entre el contenido de agua medido con el TDR Trime-FM y el obtenido por gravimetría en laboratorio.

Los datos obtenidos en el ensayo de campo corregidos según la ecuación obtenida en el laboratorio se presentan en la Figura 6. Se observa muy baja correlación entre los valores medidos con el TDR y la humedad determinada en estufa. A pesar del cuidado que se tuvo en la instalación del tubo de acceso no pudo evitarse la aparición de bolsas de aire junto al mismo. Parece que por pequeñas que sean las bolsas de aire o agua que se forman en torno al electrodo, estas causan grandes errores en las lecturas con el TDR (Knight, 1992 y Annan, 1977).

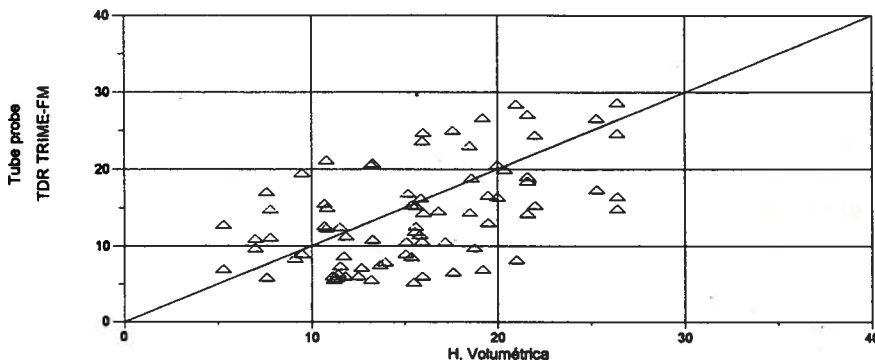


Figura 6. Relación entre el contenido de humedad medido con el TDR Trime-FM y el obtenido por gravimetría en ensayo de campo

Respecto a la prueba 2, se representaron las medidas de humedad obtenidas con el equipo frente a las realizadas con la sonda de neutrones y el TRASE de tres vías. Las rectas aparecen en la Tabla 1, donde Y es la humedad volumétrica medida con el TRIME en porcentaje y X es la humedad volumétrica bien con la sonda de neutrones, bien con la sonda TRASE.

La recta de regresión de humedad medida con el equipo TRIME frente a la obtenida con el TRASE tras el ajuste según la Figura 4 fue $\theta_v(\text{TRIME}) = -8.35 + 1.40 \theta_v(\text{TRASE})$, $r^2 = 0.764$ indica de nuevo infraestimación y sobrestimación para altos y bajos contenidos de humedad respectivamente. Con el objeto de contrastar esta comparación, se analizó la regresión lineal $\theta_v(\text{TRIME})$ vs. $\theta_v(\text{Sonda de neutrones})$, resultando ser $\theta_v(\text{TRIME}) = -11.5931 + 1.66233\theta_v(\text{Sonda de neutrones})$, $r^2 = 0.934$, confirmando la desviación obtenida al utilizar el equipo TRASE como referencia.

TRIME-FM (dos vías)

Los resultados del ensayo se resumen en la Tabla 2, que recoge el ajuste del porcentaje de humedad volumétrica medido por el equipo frente al porcentaje medido por la sonda de neutrones y el TRASE.

El mismo análisis descrito en el apartado anterior se hizo para el equipo TRIME con sonda de dos vías, resultando: ser $\theta_v(\text{TRIME}) = 16.8845 + 0.505664\theta_v(\text{Sonda de neutrones})$, $r^2 = 0.580$ y $\theta_v(\text{TRIME}) = 12.8337 + 0.620072\theta_v(\text{TRASE})$, $r^2 = 0.835$. Esto indica que se produjo sobreestimación e infraestimación a bajos y altos valores de θ_v respectivamente.

Conclusiones

Trase 6050X1

- El empleo de la calibración universal que lleva incorporada el equipo ocasionó un error sistemático en la medida, infraestimando su valor en el intervalo de humedad estudiado. Sería conveniente ampliar la calibración hasta valores de humedad cercanos a saturación.
- Las pequeñas modificaciones hechas a las sondas AG20 y AG15 no modifican su comportamiento respecto la proporcionada por el fabricante, no requiriendo una calibración adicional a la ya comentada.

TRIME-FM (Tube Probe)

- El contacto del suelo con el tubo de acceso tiene que ser perfecto para obtener resultados fiables con el TDR.
- Para el suelo estudiado no se recomienda el uso de esta sonda pues los movimientos de contracciones que presentan son suficientes para afectar las lecturas.
- En cualquier caso es necesaria una calibración específica, como se demuestra en las pruebas 1 y 2.

TRIME-FM (dos vías)

- Es necesaria una calibración específica para este suelo, ya que como se observa en la tabla 2, sobreestima la medida de humedad .

Referencias

- Annan, A. P. *Time-domain reflectometry-Air-gap problem in a coaxial line*. Geol. Surv. Can., 77:55-58.
- Dalton, F.N. 1991. *Development of Time-Domain Reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity*, p 143-169. In G. C. et al. (ed.) *Advances in measurements of soil physical properties: Bringing theory into practice*. SSAA Spec. Publ. 30. SSAA, Madison, WI.
- IMKO-Micromodultechnik. 1994. *TRIME-SYSTEM-Material moisture measurement with principle of Time-Domain-Reflectometry*. Im Stöck 11 D-76275 Ettingen 6-Germany.
- Knight, J.H. 1992. *Sensitivity of Time Domain Reflectometry Measurements to Lateral Variations in Soil Water Content*. Water Resour. Res., 28:2345-2352.
- Klute, A. 1986. *Methods of soil analysis. Part I: physical analysis*. Am. Soc. Agron & Mineralogical. Monog. 9, WI.
- Roth, K, R. Schulin, H. Flüher y W. Attinger, 1990. *Calibration of Time Domain Reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach*. Water Resour. Res., 26: 2267-2273
- Soilmoisture Equipment Corp. 1989. *TRASE instruction manual and technical information*. Santa Barbara, CA.
- Topp, G.C., J.L. Davis y A.P. Annan. 1980. *Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines*. Water Resour. Res. 16: 574-582.
- Zegelin, S.J., I. White, y G.F. Russell 1991. *A critique of the Time-Domain Reflectometry technique for determining field soil water content*, p 187-208. In G. C. et al. (ed.) *Advances in measurements of soil physical properties: Bringing theory into practice*. SSAA Spec. Publ. 30. SSAA, Madison, WI

SISTEMA DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE CAUDALES EN EL CANAL DE ARAGÓN Y CATALUÑA

Autores:

Linares Saez, A.

Ingeniero Superior de Telecomunicaciones
Jefe del Servicio de Telecomunicaciones

Aguilar Mariñosa, J. V.

Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones

Organismo:

Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente
Confederación Hidrográfica del Ebro
Servicio de Telecomunicaciones

RESUMEN

En esta ponencia se expone el principio de funcionamiento del Sistema Automático de Regulación de Caudales en canal abierto que la Confederación Hidrográfica del Ebro tiene en servicio en el Canal de Aragón y Cataluña.

Su instalación y puesta en servicio se llevó a cabo durante los años 1985 al 1987, y desde entonces constituye una útil herramienta para la explotación del Canal.

El sistema consta de un centro de control, situado en las oficinas de la Confederación Hidrográfica del Ebro en Monzón y de cuatro puntos, seleccionados por su importancia, a lo largo del Canal. Estos puntos controlados son los siguientes:

- **Cabecera de Canal. El Ciego.**
- **Toma del Canal de Zaidín. El Partidor.**
- **Cabecera del Canal de Enlace. Embalse de Santa Ana.**
- **Unión del Canal de Enlace con el Canal Principal. Coll de Foix.**

Entre los objetivos concretos más importantes alcanzados pueden citarse:

- **Conocimiento en tiempo real del estado del Canal.**
- **Regulación automática local de caudales en El Ciego, El Partidor y Santa Ana.**
- **Telemando desde el centro de control de Monzón.**

La instalación del sistema permitió la Optimización de Recursos Hidráulicos en el Canal, mediante el ahorro del recurso agua, una explotación más adecuada; y un incremento en la seguridad de las instalaciones.

1.- ANTECEDENTES

1.1.- LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El Canal de Aragón y Cataluña se encuentra situado al norte de la península Ibérica y su trazado discurre por las provincias de Huesca y Lérida.

1.2.- USUARIOS

En la actualidad esta obra afecta a una extensión de 104.850 Has., de las que presentan riego efectivo unas 95.000 Has. y se atiende el suministro de agua para abastecimiento de 32 núcleos de población, así como las necesidades de agua con carácter industrial y ganadero. Los diferentes usuarios del Canal se encuentran integrados en la Comunidad General de Regantes del Canal de Aragón y Cataluña.

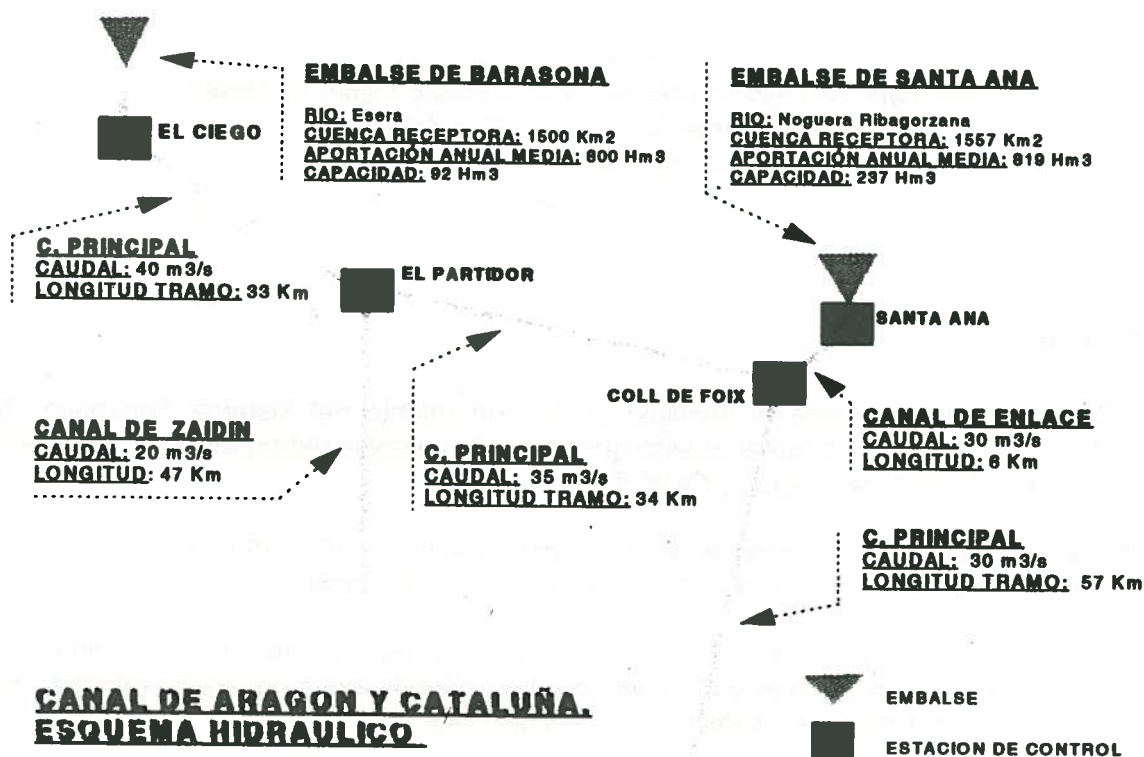


Figura 1.

1.3.- INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

El Canal de Aragón y Cataluña constituye actualmente el sistema base de suministro del agua necesaria para el riego de la zona que domina. Esta formado por los elementos que se relacionan a continuación, siendo su esquema hidráulico el de la figura 1.

Canal Principal .- Es el elemento de conducción básico, parte del embalse de Barasona en el río Esera. Su trazado discurre por las provincias de Huesca y Lérida.

Tiene una longitud de 124 Km. y desemboca en el río Segre.

Canal de Zaidín .- Se deriva del Canal Principal a 33 Km. de su origen. Discurre por la provincia de Huesca. Su longitud es de 47 Km. y desagua en el río Cinca.

Canal de Enlace .- Tiene su origen en el embalse de Santa Ana en el río Noguera Ribagorzana y desemboca en el Canal Principal en el último tramo de su recorrido. Su longitud es de 6 Km.

Acequias derivadas .- Constituyen la base principal de distribución de caudales hasta los usuarios. En este momento existen 10 acequias derivadas de Canal Principal y 3 del Canal de Zaidin. La longitud total de acequias es de 148 Km..

En un principio los caudales que debían servir para el riego de la zona dominada por el Canal de Aragón y Cataluña procedían de los ríos Esera y Cinca. Posteriormente se vio que, dado el régimen torrencial e irregular de los caudales de estos ríos, se hacía muy incierto el futuro de la zona puesta en riego y se imposibilitaba su ampliación. Para asegurar en mayor grado la regularidad de los caudales se construyó el Pantano de Barasona que entró en servicio en el año 1932. Posteriormente y ante la insuficiencia de caudales para atender a las demandas de agua se construyó el Embalse de Santa Ana, que fue concluido en el año 1961, en el río Noguera Ribagorzana y desde este y a través del Canal de Enlace se condujeron aguas del río Noguera Ribagorzana al Canal Principal para reforzar el caudal del mismo procedente del río Esera y regulado por el embalse de Barasona. En el año 1974 se llevo a cabo un recrecimiento del embalse de Barasona para aumentar su capacidad de almacenamiento.

Entre los años 1985 y 1987 se instaló y se puso en servicio el "Sistema de Regulación Automática de Caudales en el Canal de Aragón y Cataluña"

1.4.- EXPLOTACIÓN DEL CANAL

Con vistas a su explotación, la zona regable por el Canal está dividida en varias áreas atendiendo a los tramos del Canal o acequias derivadas de las que se suministran. Estas áreas están encabezadas por dependencias del Servicio de Explotación del Canal, denominadas "Casillas" o "Fielatos" , que dependen de las Oficinas Centrales de Monzón. Es en estos Fielatos donde los usuarios, bien directamente o a través de la Comunidad de Regantes, hacen los pedidos de agua de acuerdo a sus necesidades, con dos días de antelación. Con estos pedidos se efectúa el cálculo total del consumo previsto para cada zona. Estos pedidos se trasladan a la oficina de Monzón donde se elabora la previsión total de caudales necesaria para atenderlos. Desde Monzón se dan las órdenes oportunas para obtener los caudales necesarios en el Canal, siendo los guardas de Explotación (personal de los fielatos) los encargados de posicionar las compuertas de las tomas de riego para atender estos pedidos.

2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

Con la instalación de este "Sistema de Regulación Automática de Caudales en el Canal de Aragón y Cataluña" se ha dado un paso más en la optimización de recursos hidráulicos en el Canal, materializándose en el ahorro del recurso agua mediante una explotación más adecuada y un incremento en la seguridad a las instalaciones.

A continuación se relacionan los principales objetivos de este proyecto.

Información en tiempo real. Tendremos una información permanente del estado del Canal en el centro de control, agilizándose también con esto la reacción ante una situación de emergencia.

Regulación automática. Se instalan elementos locales de regulación y control en los puntos más significativos del Canal. Con esto se dota a los sistemas de cierta capacidad de reacción ante cambios en el régimen del Canal y hace que actúen localmente con rapidez ante estos para mantener los caudales establecidos en cada punto.

Telemando. Se da al sistema la posibilidad de enviar órdenes desde el centro de control a los puntos controlados. Estas órdenes pueden ser:

Órdenes de accionamiento directo. Activación de mecanismos de forma remota en los puntos controlados. Se pueden dar órdenes de apertura o cierre de compuertas desde el centro de control.

Órdenes de establecimiento de Consigna. Envío de valores de Consigna a los reguladores locales.

Comunicaciones. Se dota al Canal de un sistema de comunicaciones móviles vía radio que complementa en un primer momento y progresivamente sustituye a las antiguas líneas telefónicas, cuyo costoso mantenimiento y limitaciones técnicas dificultaban la explotación. Con esto se consigue tener la posibilidad de establecer comunicaciones con el personal de Guardería de Explotación, que hasta ese momento no eran posibles.

3.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El Sistema esta constituido por un centro de control, situado en la oficinas de la Confederación Hidrográfica del Ebro en Monzón y de cuatro estaciones en puntos, seleccionados por su importancia en la explotación, a lo largo del Canal. Estas cuatro estaciones controladas son las siguientes:

El Ciego. Cabecera del Canal Principal. Es el origen del Canal Principal.

El Partidor. Toma del Canal de Zaldín. Es el origen del Canal de Zaldín, que se deriva del Canal Principal.

Embalse de Santa Ana. Cabecera del Canal de Enlace. Es el origen del Canal de Enlace que se une al Canal Principal en el último tramo de su recorrido.

Coll de Foix. Confluencia del Canal de Enlace con el Canal Principal.

Entre los equipos instalados en cada estación y en la Central de Monzón podemos distinguir los de regulación y mando y los de transmisión de datos. La interconexión entre ellos y el flujo de ordenes y señales se muestra en la figura 2.

FUNCIONES DEL SISTEMA

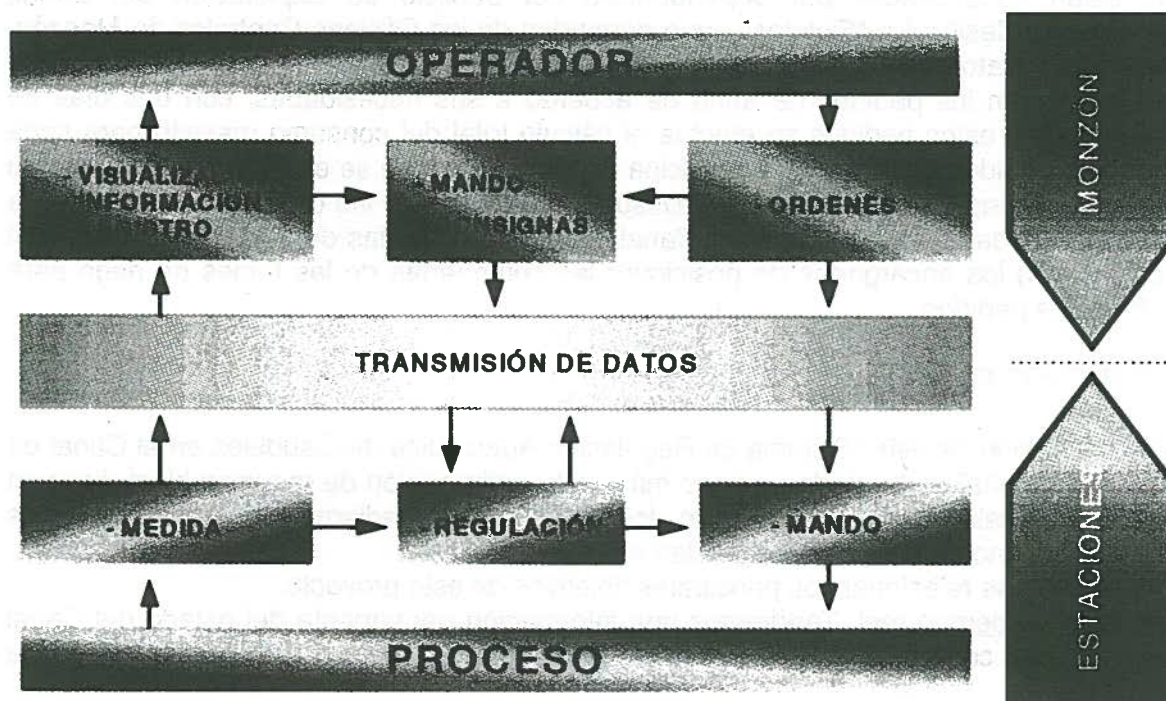


Figura 2.

El principio de regulación y de cálculo no es igual en las cuatro estaciones controladas por el sistema pero se pueden establecer unas generalidades antes de abordar cada estación en particular. Todo el subsistema de regulación y cálculo esta realizado con técnica analógica, siendo el circuito base un regulador tipo PI (Proporcional-Integral). En este regulador PI se introducen el "valor real" y el "valor de consigna" y a su salida se obtiene, en el momento de realizarse cambios del "valor de consigna", una variación de la señal de salida igual al factor proporcional del regulador y a continuación esta salida varía con el tiempo en correspondencia a la parte integral del regulador. Comparando esta señal con el valor medio de las posiciones de las compuertas en un regulador P de salida "casi

continua" se fija una tendencia de abertura o cierre de las compuertas. Esta tendencia es tratada por los órganos de elección, que son los encargados de determinar a que compuerta se dirigirá la orden necesaria, así como la duración de las maniobras y el intervalo entre estas.

Existe una proporcionalidad entre la relación de "valor real"- "valor de consigna" y la duración e intervalo temporal de las ordenes de apertura o cierre a las compuertas. Con el fin de mantener las compuertas a niveles similares, la orden de abrir llega al vano más cerrado y la de cerrar llega al vano más abierto. Si la separación entre el valor consignado y el real supera un margen fijado en el regulador, el sistema puede maniobrar todas las compuertas al mismo tiempo hasta reducir esta diferencia para luego actuar como se ha descrito anteriormente.

El regulador considera solamente los vanos cuyo selector de mando se encuentra en la posición de automático y que no se encuentran fuera de servicio por alarma. En todas las estaciones se pueden gobernar localmente las compuertas situando los selectores en la posición manual y actuando en los correspondientes pulsadores abrir-cerrar. Para el funcionamiento del regulador es preciso que el selector este en la posición de automático.

El regulador analógico puede generar alarmas de funcionamiento que se transmiten al Centro de Control en Monzón para prevenir al operador de errores de funcionamiento del sistema, los márgenes de estas alarmas se fijan localmente.

3.1.- EL CIEGO

El esquema hidráulico del Ciego, cabecera del Canal Principal, puede verse en la figura 3.

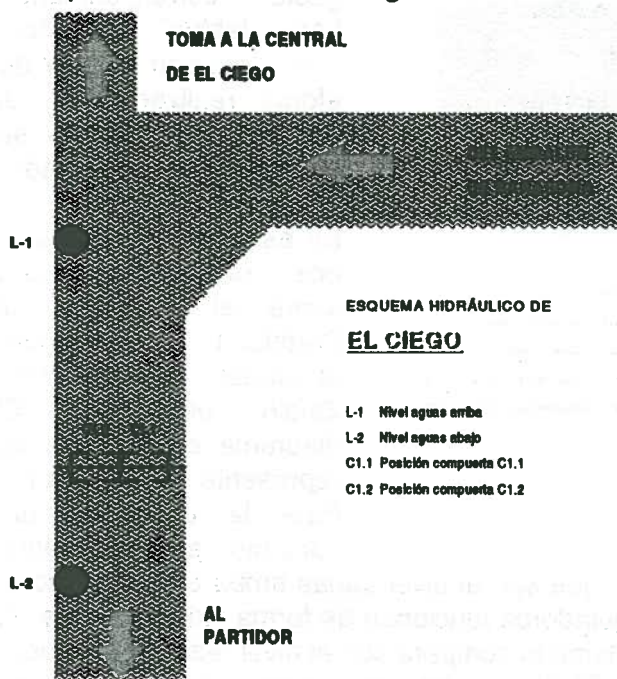


Figura 3.

El caudal circulante aguas abajo de las compuertas se calcula a partir del nivel de agua en el limnómetro L-2 según la tabla, introducida en el sistema, y obtenida de la realización de aforos.

El cálculo se realiza por interpolación lineal entre los valores prácticos obtenidos de los aforos. El valor de este caudal se presenta en el armario del Ciego junto con los valores de las señales que figuran en el esquema hidráulico.

En la figura 4 se representa el diagrama de bloques del regulador del Ciego. Para el funcionamiento en automático se establece en el Centro de Monzón un valor de consigna de caudal, que se transmite al Ciego.

Este valor se compara con el valor real de caudal en ese momento y el sistema reacciona como se ha visto anteriormente para aproximarse a conseguir que el

caudal real sea igual al caudal consignado. En esta estación del Ciego se ha presentado algún problema en el ajuste del regulador PI ya que pueden darse regímenes de funcionamiento muy diferentes según el caudal solicitado en el Canal ya que se debe conservar en todo momento un nivel L-1 en la cámara de carga de la central, para el funcionamiento de dicha central hidroeléctrica.

Se podría modificar el sistema de regulación disponiendo de un regulador adaptativo; otra solución más simple, con esta técnica analógica, podría ser utilizar varios reguladores, uno para cada régimen de funcionamiento.

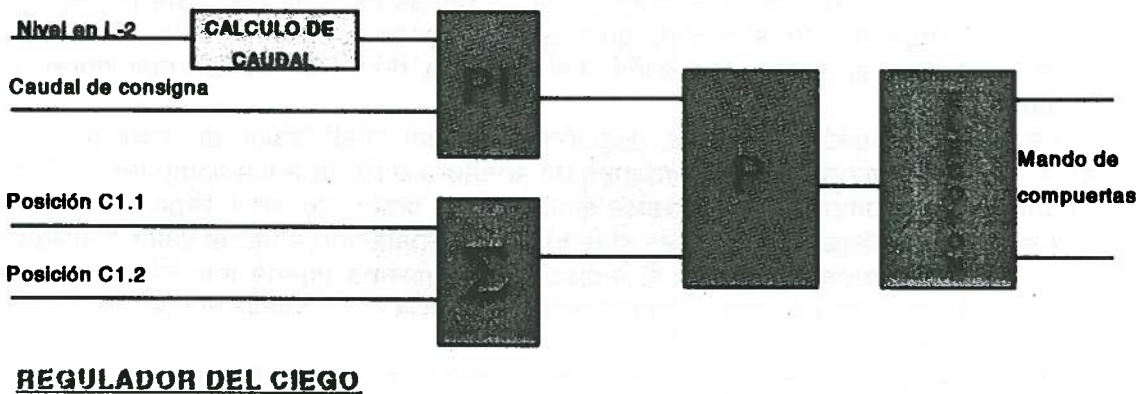


Figura 4.

3.2.- EL PARTIDOR

El esquema hidráulico del Partidor, origen del Canal de Zaidín, es el que se representa en la figura 5.

Los caudales circulantes, tanto por el Canal Principal como por el Canal de Zaidín, se calculan a partir de los niveles de agua en los limnómetros L-2 y L-3 respectivamente,

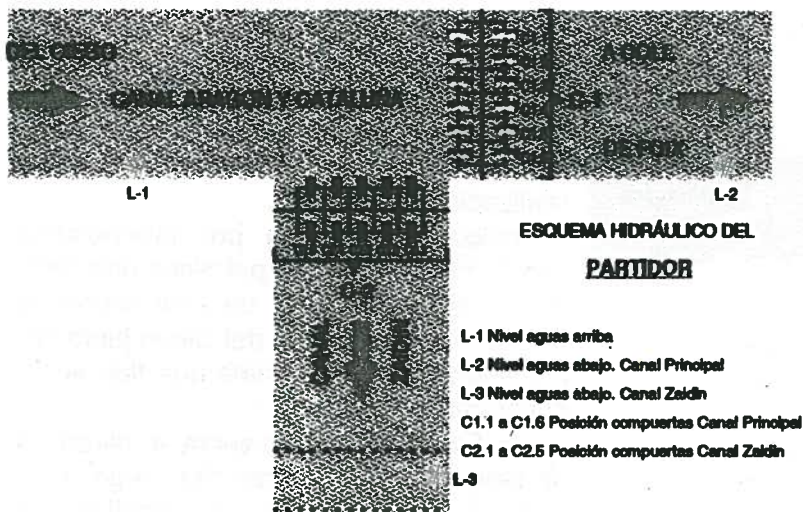


Figura 5.

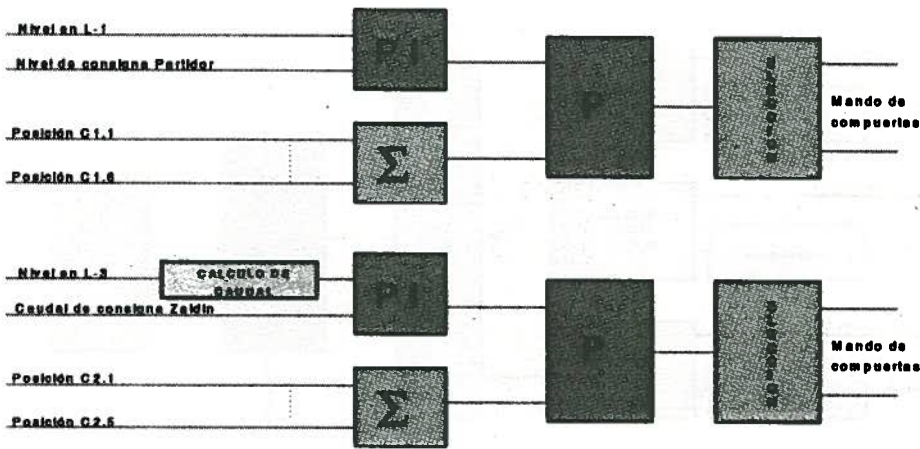
aplicando la tabla de gasto correspondiente. Las tablas se han confeccionado a partir de aforos realizados en el Canal y los caudales se presentan en el cuadro del Partidor.

En esta estación trabajan dos reguladores, uno sobre el nivel en el Partidor L-1 y otro sobre el caudal por el Canal de Zaidín por L-3. El diagrama de bloques se representa en la figura 6.

Para la operación del conjunto en automático

se fijan en Monzón dos valores de consigna, que son el nivel aguas arriba en el Partidor y el caudal por el Canal de Zaidín. Los dos reguladores funcionan de forma independiente. Al fijar un nivel de consigna en el Partidor el sistema lo compara con el nivel real y actúa sobre las compuertas del Canal Principal (C1.1 a C1.6) para intentar mantenerlo. De la misma forma que en el caso del Ciego, para el Canal de Zaidín se fija un valor de consigna de caudal que se compara con el caudal real y la actuación de sistema para aproximarlos es en este caso sobre las compuertas del Canal de Zaidín (C2.1 a C2.5).

El reparto de caudales se realiza de forma que por el Canal de Zaidín circula el valor que se ha consignado y por el Canal Principal circulara el resto hasta el total que llega al Partidor.



REGULADORES DEL PARTIDOR

Figura 6.

3.3.- EMBALSE DE SANTA ANA

El esquema hidráulico del embalse de Santa Ana puede esquematizarse, representando solamente los elementos que intervienen en este sistema de regulación, como se reproduce en la figura 7.

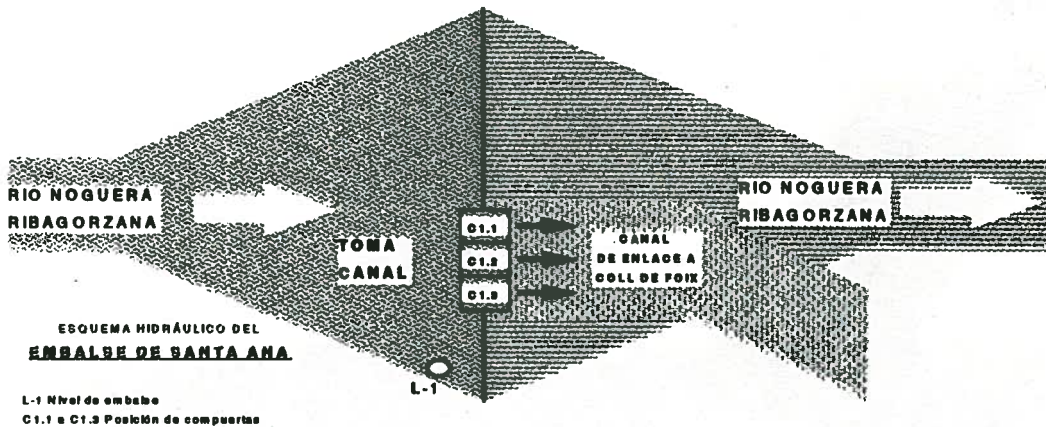


Figura 7.

En este caso el caudal vertido al Canal de Enlace se calcula aplicando una fórmula a partir del nivel del embalse L-1 y de la posición de las compuertas C1.1 a C1.3. La expresión por la que se obtiene el caudal por cada compuerta es del tipo: $Q=YK\sqrt{2gh}$, donde:

Y → Abertura de compuertas

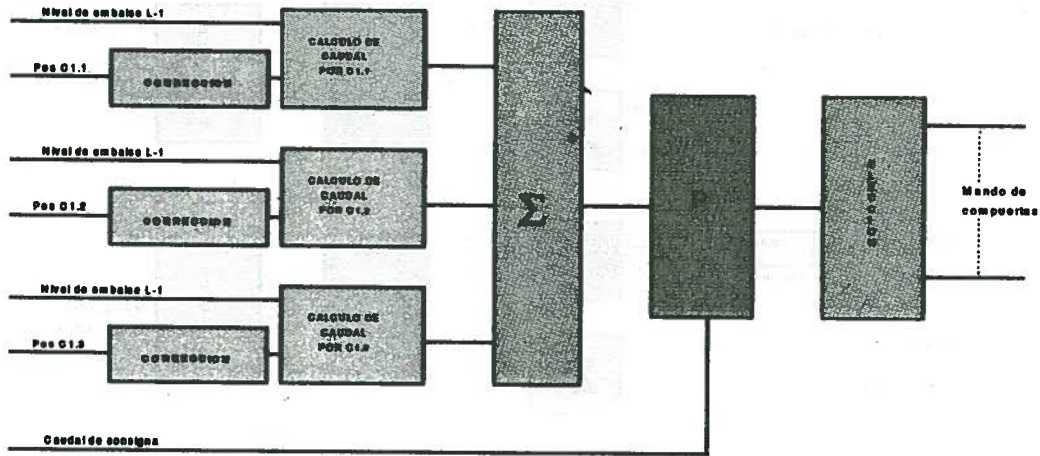
h → Altura de agua sobre la base de las compuertas

K → Constante

En esta estación de Santa Ana el regulador difiere de los descritos para el Ciego y el Partidor. En este caso la suma de los resultados de los cálculos de caudal de las tres compuertas se aplica directamente al regulador proporcional que da las órdenes al bloque de elección de compuertas para realizar las maniobras necesarias hasta alcanzar la estabilidad. Aquí no es preciso utilizar un regulador PI por no tratarse de compuertas anegadas como en los casos del Ciego y del Partidor; la regulación que se realiza no contempla la medida del caudal después de la salida de las compuertas, aguas abajo de estas.

El bloque de linealización en la abertura de compuertas para el cálculo de caudal introduce una tabla de corrección que depende del tipo de compuerta. El diagrama de bloques del regulador se muestra en la figura 8.

Aunque el principio de regulación difiere del utilizado en el Ciego y en el Partidor, su funcionamiento en automático es a efectos prácticos similar al de la estación del Ciego.



REGULADOR DE SANTA ANA

Figura 8.

3.4.- COLL DE FOIX

El esquema de la confluencia del Canal de Enlace con el Canal Principal se representa en la figura 9.

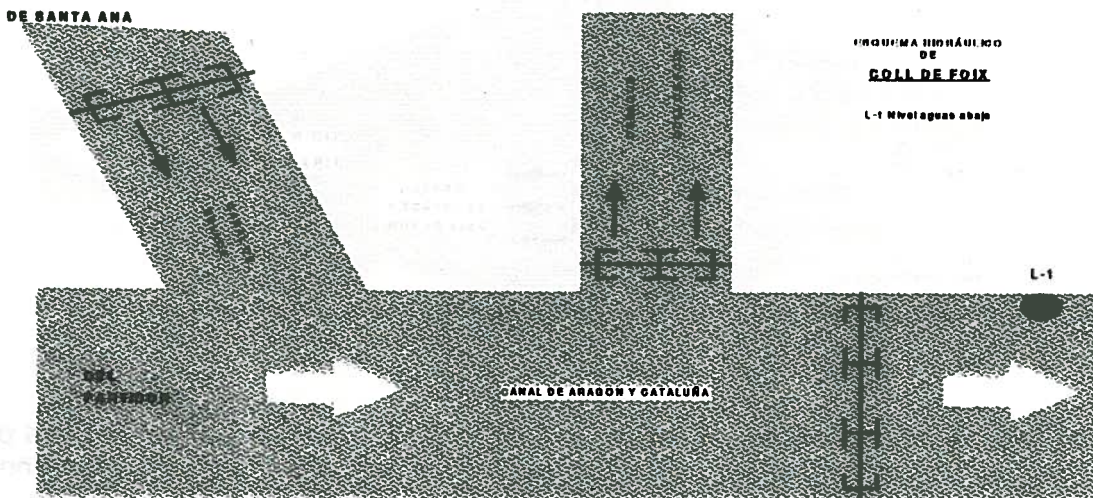


Figura 9.

En esta estación no se realiza regulación, solamente dispone de una captación denivel, después de la unión del Canal de Enlace con el Canal Principal, en L-1 que se transmite a Monzón.

3.5.- CENTRAL DE MONZÓN

En el cuadro de las oficinas centrales en Monzón es donde se concentran los datos recibidos de las cuatro estaciones y donde se introducen los valores de consigna para enviar a estas.

Para cada compuerta de las correspondientes estaciones se dispone de un selector Automático-Manual y de dos pulsadores de abrir-cerrar compuertas que solo actúan cuando el selector correspondiente está en la posición Manual. El sistema actúa automáticamente sobre las compuertas que tengan el selector Automático-Manual de la central de Monzón y el del cuadro local en la posición de Automático. Se pueden enviar ordenes directas a las compuertas de las estaciones posicionando los selectores correspondientes del cuadro local en Automático y los del cuadro de la central en Manual, y actuando sobre los pulsadores de abrir-cerrar.

Operando en modo Automático, para el Ciego, Canal de Zaidin y Embalse de Santa Ana se establece como consigna el caudal que se desea, y para el Canal Principal se fija el nivel que desea mantenerse en el Partidor.

4.- ELEMENTOS AUXILIARES

4.1.- ACONDICIONAMIENTO MECÁNICO Y ELÉCTRICO

El control automático de las compuertas por el regulador aumenta en algunas ocasiones el número de maniobras a que se ven sometidas de forma desatendida, por lo que se hace necesario aumentar su fiabilidad. Para esto fue preciso llevar a cabo el acondicionamiento mecánico y eléctrico en algunas de ellas. Es muy conveniente efectuar revisiones de mantenimiento preventivo comprobando todo su recorrido y buen estado de los finales de carrera.

En cuanto al acondicionamiento eléctrico de las compuertas, que ya estaban motorizadas con anterioridad a este proyecto, fue necesaria la sustitución o modificación de los cuadros de maniobra dotándolos de las entradas de mando y contactos de final de carrera necesarios para ser gobernados por el regulador.

Referente a las líneas eléctricas necesarias para el suministro a los motores de las compuertas se tuvo en cuenta la posibilidad que tiene el regulador de actuar sobre todas las compuertas de la estación al mismo tiempo si la diferencia entre los valores real y consignado es superior a la establecida, por lo tanto debemos calcular el dimensionamiento eléctrico de cada estación para que puedan realizarse estas maniobras de todas las compuertas. Solamente en el Partidor fue precisa la sustitución de la línea eléctrica y aumento de la potencia contratada debido al número de compuertas que podían actuarse al mismo tiempo entre el Canal Principal y el Canal de Zaidin.

Otro aspecto importante para la seguridad es la instalación de sistemas de alimentación ininterrumpida que garanticen el funcionamiento de los equipos de control y transmisión de datos, los cuales seguirán alimentados de las baterías en caso de fallo de suministro de la red eléctrica. Se instalaron equipos rectificadores y baterías en las cuatro estaciones y en la central con una autonomía de funcionamiento continuado, en caso de fallo de red, de dos días.

De los dos repetidores de radio necesarios para la red de comunicaciones en uno de ellos se ha instalado también un sistema de alimentación ininterrumpida, aumentando la autonomía de funcionamiento a diez días; en el otro repetidor, debido a la imposibilidad de realizar un tendido eléctrico en ese momento, se instaló un sistema de alimentación por medio de paneles solares dimensionado también para una autonomía de diez días.

Es de gran importancia la protección contra descargas y perturbaciones eléctricas en todas las líneas de alimentación, y entradas de señales analógicas y digitales que acceden al equipo, así como la instalación de descargadores en el cable coaxial de antena del equipo de radio. Se realizaron tomas de tierra en todas las estaciones, de valor inferior a 10Ω , para la conexión de todos los equipos y descargadores y se instalaron pararrayos para la protección de instalaciones y mecanismos.

4.2.- SENSORES

Para la medida de niveles se han utilizado tres tipos de captadores o sensores:

Sensores resistivos. La captación de la medida se realiza mediante un sistema de boya-contrapeso instalado en pozos tranquilizadores. Con la conveniente adaptación mecánica se transmiten las variaciones de nivel a un potenciómetro conectado a la circuitería de adaptación que nos entrega el valor eléctrico de salida de 4 a 20 mA. correspondiente al 0 a 100 % del margen de medida.

Sensores Piezoresistivos. Consisten en sondas que se sumergen en los pozos

tranquilizadores donde se realizan las medidas, estas sondas tienen una membrana elástica sometida a la presión del agua que hay sobre ella. El desplazamiento de esta membrana actúa sobre un material piezoresistivo que está conectado a la circuitería necesaria para entregarnos como en el caso de los resistivos el valor de salida de 4 a 20 mA.

Sensores Capacitivos. Solamente hay un sensor de este tipo instalado, que es el de nivel de embalse de Santa Ana. En esta instalación, a través de una conducción de agua de la presa, se entrega al sensor la presión hidrostática en el embalse sobre la cota de la base de las compuertas, esto produce el desplazamiento de una membrana que se traduce en la variación de una capacidad por acercamiento o alejamiento de las placas, se conecta a la circuitería adecuada y a partir de aquí el proceso es el mismo que en los sensores resistivos y piezoresistivos, entregando una corriente de salida de 4 a 20 mA.

Para la medida de posiciones de compuertas se han utilizado únicamente sensores de tipo resistivo. La captación de la posición de compuertas se realiza por medio de un sistema de ruedas dentadas y cadena calibrada de alguna parte móvil de la compuerta, que varía según el tipo. Su funcionamiento es análogo al de los sensores resistivos de nivel. La señal de salida es también de 4 a 20 mA.

5.- CONCLUSIONES

Como conclusión a esta exposición cabe decir que con un equipamiento sencillo se obtienen resultados satisfactorios de funcionamiento del sistema, constituyendo un conjunto muy robusto y fiable, y precisando un mantenimiento para el que no se requiere personal altamente especializado.

Otro aspecto a resaltar es el concepto de inteligencia distribuida del sistema, al poder funcionar los reguladores locales de forma autónoma.

Para este tipo de explotaciones es de vital importancia disponer de una red de comunicaciones móviles con cobertura en toda el área de influencia.

En cuanto al recurso "agua", con este sistema se mejora la explotación, evitando pérdidas en los tramos finales del Canal y dando un mejor servicio a los usuarios. Los objetivos fundamentales logrados en cada estación son los siguientes:

El Ciego.- Evitar que en caso de parada de la central hidroeléctrica del Ciego el caudal de esta entre en el Canal Principal.

El Partidor.- Fijar el caudal por el Canal de Zaidin, ya que este es más crítico que el del Principal por no tener ninguna otra aportación de caudales en el resto de su recorrido.

Santa Ana.- Conseguir que el caudal de salida al Canal de Enlace no varíe con el nivel del embalse.

Coll de Foix.- Decidir de acuerdo al nivel aguas abajo las aportaciones a hacer desde el embalse de Santa Ana al Canal Principal.

Naturalmente la funcionalidad ofrecida por la tecnología de este sistema puede conseguirse y mejorarse substancialmente en este momento por medio de otro equipamiento de tecnología más avanzada (autómatas, sistemas SCADA,).

En la Confederación Hidrográfica del Ebro existen en este momento proyectos para la implantación de sistemas de regulación automática de caudales en varios canales de riego.

CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO HEC-1 EN LA CUENCA DEL ARGÁ PARA LA OBTENCIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO EN PAMPLONA

Seco, A. (P)*, López, J.J. *, Casalí, J.*

*Universidad Pública de Navarra. Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural

RESUMEN

En el presente trabajo se procede a la calibración del modelo hidrometeorológico HEC-1 para su aplicación al cálculo de caudales de diseño. A partir de las estaciones meteorológicas disponibles en la cuenca se realiza un análisis estadístico de los datos de precipitación diaria máxima anual consistente en su ajuste a una distribución de Gumbel y la determinación de las tormentas de diseño para cada periodo de retorno. La distribución de las lluvias de diseño se hace mediante hietogramas sintéticos de bloques alternos, generados a partir de las curvas idf obtenidas mediante la fórmula de Témez. La circulación de eventos de lluvia históricos y la observación de los limnigramas obtenidos en el río para dichas tormentas en la estación de aforos de Huarte permiten calibrar el modelo. Los resultados obtenidos en la calibración son adecuados y los valores de los parámetros resultantes de la misma presentan una gran coincidencia con los valores estimados según los métodos establecidos.

ABSTRACT

In this study the calibration of the HEC-1 hydrometeorologic model for calculating desing discharges is accomplished. Rainfall data from meteorological stations in the watershed allow statistical analysis. Maximum annual daily rainfall amounts are adjusted to Gumbel distribution, and design storms are defined for different return periods. Rainfall distribution of design hyetographs is defined by using the alternating block method, generated from intensity duration frequency curves. This idf curves are defined using Témez's formula. Model outputs from historical rainfall events inputs and data from a recording gage (station of Huarte) allow model calibration. Results got from the calibration seem satisfactory, and values of the parameters obtained in the calibration are very similar to those estimated.

1.- INTRODUCCIÓN

Las frecuentes inundaciones causadas por el río Argá a su paso por Pamplona ponen de manifiesto la necesidad de contar con un estudio riguroso de los niveles de inundación que puede alcanzar dicho río, con vistas a la toma de decisiones en la ordenación urbanística y al establecimiento de medidas de protección en las zonas afectadas.

Para la determinación de dichos niveles de inundación es imprescindible realizar una caracterización hidrológica del río, de manera que se puedan estimar, de la forma más fiable posible, los caudales característicos que circularán por el mismo en las zonas en estudio. Esta estimación de caudales se puede abordar de dos maneras distintas según los datos de partida de que se disponga. Si en el río hay una buena red de estaciones foronómicas con series largas y fiables de datos, el estudio se reduce a un análisis estadístico o de frecuencia de los caudales máximos anuales ya que la magnitud de estos eventos está relacionada con la probabilidad de que ocurran. Si no hay datos de aforo, o éstos no nos ofrecen suficiente fiabilidad, es necesario recurrir a la utilización de modelos que simulen el comportamiento hidrológico de la cuenca. Éstos, a partir de los datos de intensidad de lluvia de una tormenta ya

sea histórica o sintética, simulan el proceso lluvia-escorrentía para dicho evento. La escorrentía es circulada a través de la cuenca, obteniéndose de esta forma el hidrograma de la tormenta en el lugar requerido.

Tal vez el modelo más adecuado para esta finalidad sea el HEC-1, desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (1990), considerado por muchos como el modelo más versátil (Bedient y Huber, 1992) y probablemente el más ampliamente utilizado en este tipo de caracterizaciones hidrológicas. Dicho modelo presenta diversas opciones para cada uno de los procesos involucrados. La elección de cada opción dependerá en cada caso de la cantidad y calidad de los datos disponibles.

Uno de los mayores problemas con el que se encuentra el profesional a la hora de enfrentarse con este tipo de cálculos es la ausencia de datos o la poca representatividad de los mismos, aunque en los últimos años ha surgido una mayor concienciación sobre la necesidad de crear y mantener redes de estaciones meteorológicas y foronómicas con el fin de tener series de datos representativas. Por otra parte, en los estudios de suelos, por regla general, se omite la obtención de parámetros físicos de gran utilidad bajo un punto de vista hidrológico. Estas circunstancias hacen, que en la mayoría de los casos, el ingeniero tenga que abordar proyectos, a veces de gran magnitud, sin la posibilidad de calibrar los distintos métodos de cálculo manteniendo, de esta forma, una gran incertidumbre en los resultados.

Una vez identificados los parámetros más representativos en los procesos de generación de escorrentía de una cuenca, en concreto la del río Arga, se pretende la calibración de los mismos con tormentas de diseño sintéticas, dada la dificultad de disponer de hidrogramas reales. El modelo elegido para dicha calibración es el HEC-1. En el siguiente apartado se realiza una breve descripción de dicho modelo y se detallan los métodos elegidos para simular cada proceso. Realizada la calibración, es interesante hacer un análisis comparativo entre los valores obtenidos por la misma y los valores estimados según los métodos propuestos en la bibliografía. La finalidad última de este trabajo es, por tanto, estudiar la aplicabilidad del modelo para la estimación de caudales de diseño del río Arga a su paso por Pamplona (Seco, 1996).

2.- DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

El río Arga nace en la vertiente meridional del collado de Urquiaga. Toma dirección sur hacia el valle de Esteribar donde sus aguas son represadas en el embalse de Eugui. Una vez atravesado éste, continua su curso por el valle hasta llegar a Huarte en donde recibe las aguas del río Egüés, con una cuenca de aportación de 42,7 km², y poco después, en Villava, tras 36 km de recorrido y drenada una superficie de 180 km², se une a su principal afluente, el río Ulzama, con una cuenca de aportación de 261 km² y 35 km de recorrido (CAN, 1991). En la figura 1 se muestra la cuenca en detalle.

En la cuenca de estudio se dispone de tres estaciones de aforo, pertenecientes a la Confederación Hidrográfica del Ebro. Una de ellas se encuentra en Olave y es representativa de la cuenca del Ulzama ya que la mayoría de los aportes que recibe dicho río se producen antes de la estación. En esta estación no se dispone de limnigramas y como el mantenimiento de la misma no es muy adecuado la fiabilidad de los datos es pequeña. La segunda estación se encuentra en Huarte poco antes de la desembocadura del río Egüés. En esta estación sí que se dispone de limnigramas y los datos son más fiables que en la anterior. Las series, al igual que en la estación de Olave, comienzan en 1965. La tercera estación se encuentra a la salida del embalse de Eugui. En ella se registran datos de caudal de salida medios diarios desde el año 1975 (ver figura 1).

Las estaciones termopluviométricas disponibles en la cuenca son las de Iráizoz, Olagüe, Eugui y Zubiri, con series datos diarios de 24, 18, 26 y 23 años respectivamente. También se ha considerado la estación de Pamplona, con 58 años de registro, ya que es representativa de las zonas bajas de la cuenca. Dichas estaciones pertenecen al Departamento de Agricultura del Gobierno de Navarra. También existe alguna estación automática en las proximidades de la cuenca pero no se ha podido acceder a los datos de las mismas. La localización de las estaciones se puede apreciar en la figura 1.

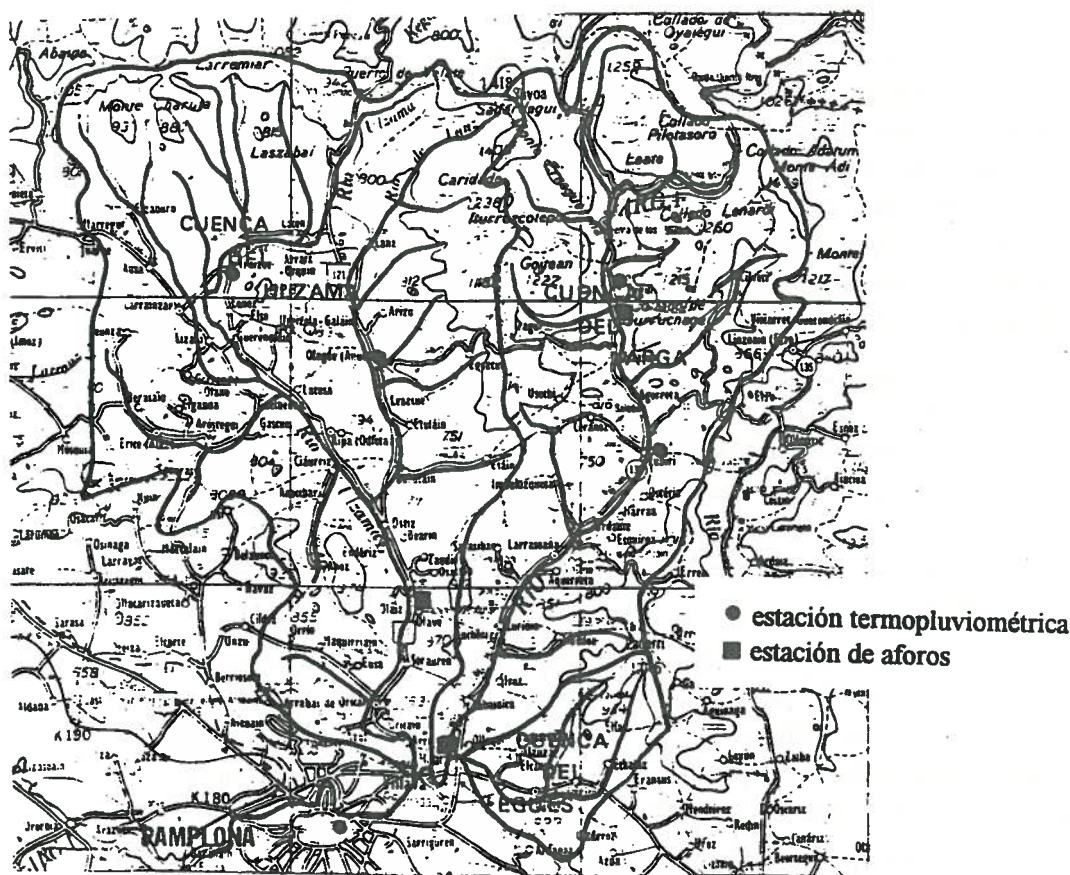


Figura 1. Cuenca del Arga.

3.- DESCRIPCIÓN DEL MODELO.

El modelo HEC-1 fue diseñado por el Hydrologic Engineering Center para simular la escorrentía superficial que se produce en una cuenca debida a una precipitación. Consta de un programa principal y de seis subrutinas. Dos de esas subrutinas determinan el hidrograma unitario óptimo, la intensidad de pérdidas por interceptación e infiltración, o los parámetros de la circulación de flujos, confrontando los valores del hidrograma simulado con los del registrado. Las otras subrutinas realizan cálculos relativos a la fusión de la nieve, hidrograma unitario, circulación de flujos, etc. Además de ser capaz de simular los procesos habituales de los eventos de lluvia-escorrentía, HEC-1 simula también múltiples crecidas para la elaboración de planes de desarrollo en múltiples cuencas, y realiza el análisis económico de los daños por inundación integrando numéricamente las áreas bajo curvas de daño-frecuencia para condiciones actuales y futuras. (Viessman, 1996)

HEC-1 fue revisado a principios de los años setenta, y nuevamente en los ochenta. Se le añadieron varias posibilidades (por ejemplo, el método del número de curva del SCS y la

circulación hidráulica) y en 1984 se desarrolló una versión para microordenador. La versión de 1985 supuso una nueva mejora sobre las anteriores, incluyendo la circulación cinemática del hidrograma, simulación de escorrentía urbana, análisis de hidrogramas para el flujo sobre presas y aliviaderos, análisis de los efectos aguas abajo de la rotura de presas, plantas de bombeo para drenaje interior y aspectos económicos de los sistemas de control de avenidas. La versión de 1990, disponible para PC, incorpora aún más mejoras. Añade gráficos y tablas de calidad, posibilita almacenamiento e importación de datos de otros programas, y nuevos procedimientos hidrológicos, como la conocida ecuación de Green y Ampt y el método de Muskingum-Cunge para la circulación de avenidas (Viessman, 1996).

La simulación de la red de drenaje de una cuenca constituye la base del modelo. Todas las demás opciones están desarrolladas sobre la capacidad de cálculo de hidrogramas en cualquier punto de la cuenca. Para representar la variedad hidrometeorológica de la cuenca la superficie de ésta se puede segmentar en subcuencas, de forma que en cada una de ellas se adopta un valor promedio de las propiedades hidrológicas. Cada subcuenca, a efectos de cálculo, se representa como una combinación de componentes del modelo: infiltración, escorrentía, circulación de flujos, etc. Las subcuencas y sus componentes se engarzan para establecer la conexión interna de la cuenca.

Cada componente del modelo representa una fase del proceso de generación y circulación de escorrentía a través de la cuenca. Dicha representación se basa en relaciones matemáticas simples que tratan de simular aspectos individuales meteorológicos, hidrológicos e hidráulicos que componen el proceso de generación y circulación de escorrentía. Éste se divide en precipitación, intercepción e infiltración, transformación del exceso de lluvia en caudal a la salida de la subcuenca, estimación y adición del flujo base y circulación del hidrograma.

El hietograma es necesario como punto de partida para los cálculos de escorrentía. Dicha intensidad de precipitación se considera que es uniforme en toda la superficie de la subcuenca. La precipitación que no contribuye al proceso de generación de escorrentía es considerada como una pérdida. Ésta incluye la intercepción por la cubierta vegetal, la acumulación superficial y la infiltración.

En HEC-1 hay diversos procedimientos para el cálculo de estas pérdidas, que son: método de intensidad de pérdida uniforme, método de intensidad de pérdida exponencial, método del SCS, método de Hóltan para la estimación de la infiltración y método de Green y Ampt.

El exceso de lluvia se circula a través de la subcuenca para obtener a la salida un hidrograma de escorrentía. Para ello se utiliza el método de onda cinemática o el del hidrograma unitario. HEC-1 dispone de distintos modelos de hidrograma unitario, como el de Clark, el de Snyder y del SCS. El flujo subsuperficial se estima como un flujo base que se calcula en función de tres parámetros, uno característico de la cuenca y dos que se obtienen de la observación de hidrogramas reales.

La circulación del hidrograma a lo largo de cauces se realiza mediante los métodos de Muskingum-Cunge y onda cinemática. La circulación a través de embalses se puede obtener por el método de puls modificado o por el de Working R y D. Por último, HEC-1 ofrece la posibilidad de considerar otros componentes menos usuales, como pueden ser la derivación o el bombeo de caudales y la transformación de hidrogramas (Navarro, 1993).

En función de los datos disponibles y de la finalidad del trabajo se han elegido las opciones que se detallan a continuación. Para el cálculo de las pérdidas se eligió el método del

número de curva del S.C.S. (1972). Este procedimiento ignora la intensidad de lluvia. La estimación de la escorrentía se realiza mediante la expresión:

$$Q = \frac{(P - IA)^2}{(P - S + IA)} \quad (1)$$

donde Q es la escorrentía, P la precipitación acumulada, IA la pérdida inicial y S el potencial de almacenamiento del suelo, todo expresado en mm. El valor de S se obtiene en función de un parámetro, número de curva CN , que se estima a partir de unas tablas desarrolladas por el S.C.S. (Chow, 1994).

La generación del hidrograma de escorrentía de la cuenca se establece a través del hidrograma unitario de Clark. Este procedimiento obtiene el hidrograma a partir de tres parámetros, el tiempo de concentración, T_c , un coeficiente de almacenamiento, R , y una curva área-tiempo, que describe la superficie aportadora cuya escorrentía va contribuyendo a la salida de la subcuenca en función del tiempo.

Para estimar la circulación del hidrograma a través de los cauces se ha adoptado el método de Muskingum. Éste se basa en la ecuación de continuidad y en una ecuación de almacenamiento que considera una combinación de los almacenamientos en cuña y en prisma a lo largo del cauce considerado (Ayuso, 1990). La ecuación resultante es:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (2)$$

donde Q representa los caudales de salida, I las aportaciones y C_1 , C_2 , y C_3 son constantes que dependen de dos parámetros: k , tiempo de tránsito, y x , coeficiente de almacenamiento. Los subíndices indican el instante de tiempo considerado en cada momento.

4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la subdivisión de la cuenca se ha tenido en cuenta la red de drenaje de la misma. Así, se consideran tres subcuencas: Arga, Ulzama y Egüés, como se puede apreciar en la figura 1.

Las tormentas elegidas corresponden a los eventos de mayor magnitud producidos en el periodo 1991-1995, en que se registraron datos de intensidad de lluvia reales en las estaciones automáticas ya mencionadas en el apartado 2. En la tabla 1 se presentan las fechas de tales acontecimientos y su correspondiente periodo de retorno. Como no se ha podido tener acceso a los datos registrados en las mismas ha sido preciso recurrir a distribuciones sintéticas de lluvia. Los hidrogramas observados en la cuenca se obtuvieron a partir de los limnigramas de la estación de Huarte para esos mismos episodios. Las distribuciones sintéticas de lluvia se hicieron mediante el método de los bloques alternos (Chow, 1994) a partir de las curvas IDF obtenidas por la fórmula de Témez (Témez, 1979). La duración de las tormentas sintéticas (9 h) se eligió similar del tiempo de concentración de la cuenca.

TORMENTA	FECHAS	PERIODO DE RETORNO
1	11/11/91	1
2	4-5/10/92	15
3	7-8/12/92	2

Tabla 1. Tormentas empleadas en la calibración.

Establecidos los métodos de simulación de los distintos procesos a considerar, como ya se indicó en la descripción del modelo, los parámetros más característicos son: Tiempo de concentración, T_c , el factor de almacenamiento, R , y el número de curva, CN . La influencia de las variaciones de estos parámetros es una cuestión importante a analizar en primer lugar por la propia incertidumbre de los mismos. Es por lo que en primer lugar consideramos esencial un análisis de sensibilidad de la respuesta del modelo frente a las variaciones de los mismos. Para la realización del análisis de sensibilidad se tomó la cuenca del Arga hasta Huarte y se estimó un valor de los mismos. Se pudo observar que los parámetros más sensibles para el modelo son el CN y el T_c , el valor de R , por otra parte, resultó ser poco sensible (Seco, 1996). A pesar de no tener elementos para poder calibrar los valores de los parámetros k y x , correspondientes al método de Muskingum, su inclusión en la calibración no se considera importante por ser muy pequeño el tramo de circulación del hidrograma. Por lo que para estimar el valor de k se ha aplicado el método propuesto por el Instituto Bávaro de Hidrología (LLamas, 1993), y para x se ha adoptado un valor de 0.2, siendo éste un valor medio que se toma para cauces naturales y que presenta poca sensibilidad (Chow, 1994).

La calibración se realiza mediante una opción que proporciona el modelo HEC-1, que consiste en un método de optimización. Este procedimiento no se pudo aplicar a los aguaceros 2 y 3, ya que al ser de gran duración los hietogramas sintéticos son mucho menos representativos de la distribución de lluvia. Por lo tanto, la calibración se realizó con la tormenta 1, el resultado se puede observar en la figura 2.

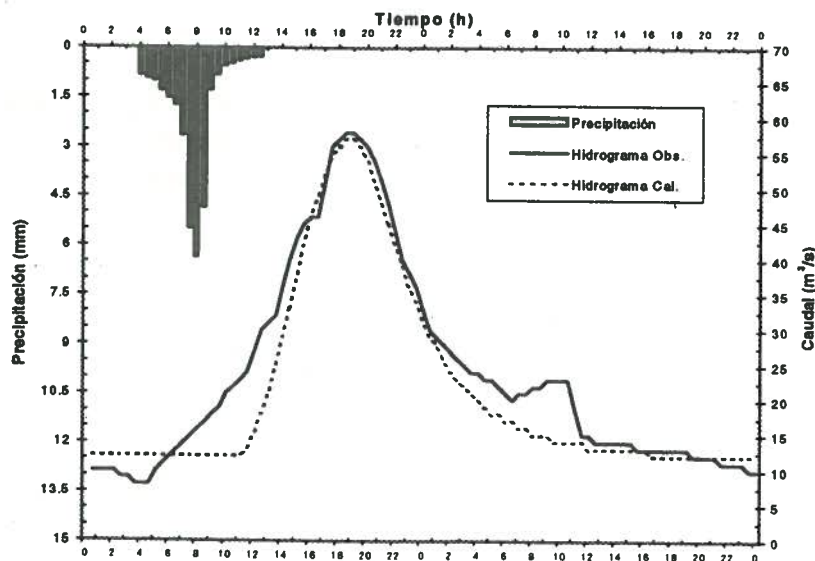


Figura 2. Calibración de la tormenta 1.

Como se puede apreciar el resultado es bastante aceptable. Los valores de los parámetros obtenidos en la calibración son de 8.7 h para el T_c , 85 para el CN y 4.3 para factor de almacenamiento R . Con estos valores se procedió a simular las tormentas 2 y 3 a modo de calibración o validación. Ésto se realizó desplazando los hietogramas sintéticos. Teniendo en cuenta que lo que se pretende es la aplicación del modelo para la estimación de los caudales de diseño, este procedimiento puede ser de utilidad para analizar la representatividad de los hietogramas de diseño. En las figuras 3 y 4 se pueden observar los hidrogramas observados y simulados de esta forma, se aprecia que aunque la forma del hidrograma no se ajusta en los extremos, los caudales punta sí que se aproximan bastante. Hay que indicar que el embalse se simuló por el procedimiento de Puls modificado (Seco, 1996).

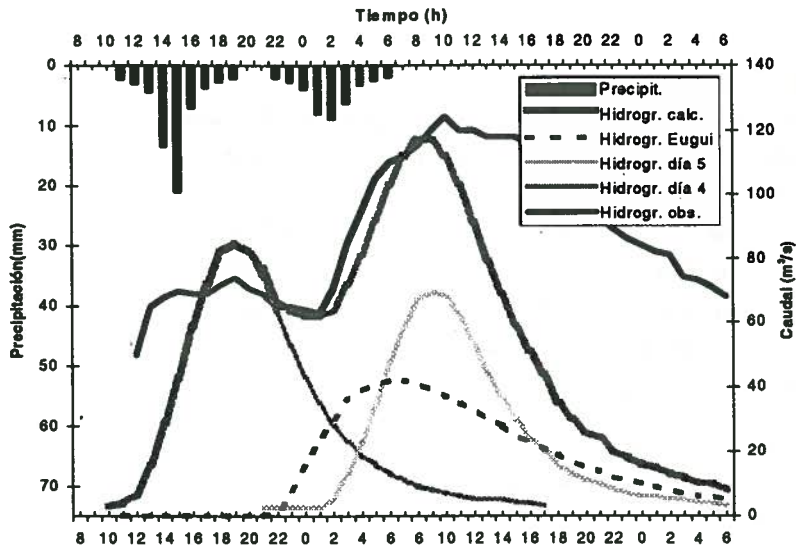


Figura 3. Calibración de la tormenta 2.

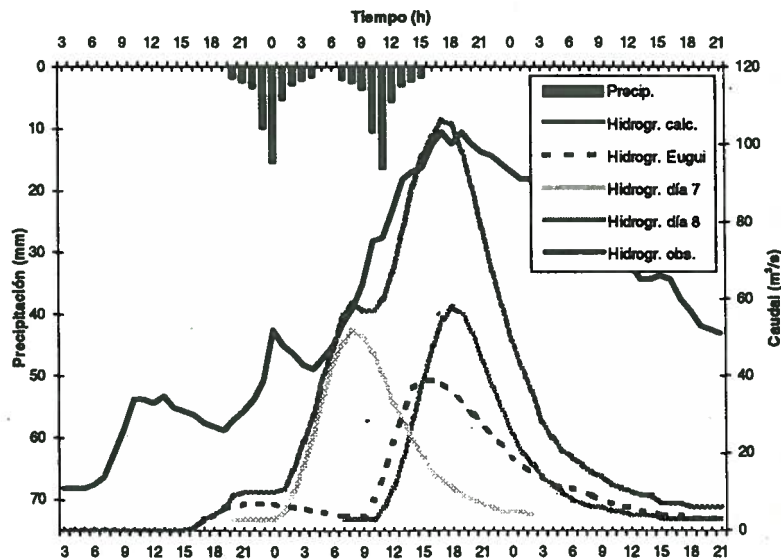


Figura 4. Calibración de la tormenta 3.

Por último, se observa una gran coincidencia entre los valores de los parámetros obtenidos en la calibración y los valores obtenidos mediante el método de Témez para el T_c , y el del SCS para el CN , analizando los mapas de usos del suelo y geológicos de la zona. En la tabla 2 se indican estos valores.

Parámetros	V. Estimados	V. Calibrados
T_c	8,9 (h)	8,7 (h)
CN	85	85

Tabla 2. Valores de los parámetros.

5.- CONCLUSIONES

En general, existe una gran ausencia de datos, y cuando existen no siempre son disponibles. Sería conveniente, dada la gran dispersión de datos, la existencia de una base de datos común a todos los organismos competentes y consultable a nivel de usuario, de todo tipo de datos registrados, tanto meteorológicos como foronómicos .

Ante la carencia de datos de intensidad de lluvia, la utilización de hietogramas sintéticos puede ser un instrumento adecuado para la calibración de modelos hidrológicos. En nuestro caso, la cuenca del Arga, se obtiene una calibración aceptable de los parámetros T_c y CN mediante la utilización del modelo HEC-1, para su posterior utilización en el cálculo de los caudales de diseño del río Arga a través de Pamplona.

Los valores de los parámetros calibrados presentan una gran coincidencia con los estimados por los métodos de Témez para el T_c y del SCS para el CN , lo que nos proporciona una cierta validez de la aplicabilidad de estos métodos en este caso.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Confederación Hidrográfica del Ebro, Mancomunidad de Aguas de Pamplona y al Servicio de Estructuras Agrarias del Departamento de Agricultura del Gobierno Foral de Navarra su disponibilidad a la hora de facilitar los datos demandados.

BIBLIOGRAFÍA

Ayuso, J.L.(1990) Métodos de cálculo usuales en el diseño de canales y embalses en cuencas pequeñas. Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba.

Bedient, P.B., Huber, W.C. (1990). Hydrology And Floodplain Analysis. Addison-Wesley, Reading; Pp 319.

C.A.N. (1991). El Agua En Navarra.

Chow, V.T. (1994). Hidrología General Y Aplicada. De. Mc Graw-Hill.

Llomas, J. (1993). Hidrología General. Servicio Editorial De La Universidad Del País Vasco.

Navarro, J.A. (1993). Análisis Del Modelo De Escorrentía Hec-1. Aplicación A La Cuenca Del Arrollo Salado De Lanjarón. Trabajo Final De Carrera. Escuela Técnica Superior De Ingenieros Agrónomos De La Universidad De Córdoba.

SOIL CONSERVATION SERVICE, U.S.D.A. (1972) National engineering Handbook. Section 4. Hydrology.

Témez, J.R. (1979). Cálculo Hidrometeorológico De Caudales Máximos En Pequeñas Cuencas Naturales.

U.S. Army Corps of Engineers, 1990. HEC-1 Flood Hydrograph. Package, Users Manual. Hydrologic Engineering Center.

Seco, A. (1996). Caracterización Hidrológica Del Río Arga A Su Paso Por Pamplona. Trabajo Final De Carrera. Escuela Técnica Superior De Ingenieros Agrónomos De La Universidad Pública De Navarra.

Viessman, W. (1996). Introduction to Hydrology. Harper Collins. New York.

PRESENTACIÓN EN CARTEL

MANIFIESTO EN FAVOR DEL USO RACIONAL Y EFICIENTE DEL AGUA

SEGARRA LLIDO, J.J. (P)
OTERO, H.
ALONSO, C.

Durante los días 19 a 21 de Septiembre del pasado año, y organizado por la Universidad Técnica d'Estiu de Catalunya y la Fundación Narcís Monturiol patrocinada por todos los Colegios Profesionales de Ingenieros de Catalunya, se celebró un curso monográfico en Lleida sobre el agua como recurso en su aspecto agrario.

Los autores, directores y profesores del curso, han recogido en esta comunicación el sentir general de aquellos más de 150 expertos y profesionales, de toda España, que se dieron cita en aquel foro técnico, y que durante tres días debatieron la problemática planteada con rigor y seriedad. Se recogen aquí, por tanto, la diagnosis de la situación actual, los objetivos deseables y las estrategias que permitirán conseguirlos. Este manifiesto, servirá de punto de partida para los próximos cursos monográficos que las mismas Instituciones organizarán en años sucesivos sobre el mismo tema, para estudiar en continuo la evolución producida, los objetivos alcanzados y la continuidad o modificación de las estrategias planteadas.

ABSTRACT

During 19th to 21th last september, organized by Summer's Technical University of Catalunya (UNTEC) and Narcis Monturiol Foundation sponsored by Professionals Engineering Colleges of Catalunya, it was celebrated a special Symposium about water like agricultural ressource.

The authors, Chairman, Vicechairman and Professor of the Symposium, have collected in this communication the general idea of those 150 experts and professionals, from over Spain, met there for three days to discuss every problem with intensity discipline and seriousness. We expose the actual situation's diagnostics, goals wanted and strategys to led get it. This public declaration will be first point for next simposiums organized by the same institutions above, to study the annual evolution, golas acieved and what about strategys: to continue or modify.

UNIVERSIDAD TECNICA D'ESTIU DE CATALUNYA.- SECRETARIO.-
INGENIERO AGRONOMO
CONSELLERIA D.A.R.P.- INGENIERO AGRONOMO
DIRECCION GENERAL DEL CATASTRO.- DOCTOR INGENIERO AGRONOMO

MANIFIESTO

EN FAVOR DEL USO RACIONAL Y EFICIENTE DEL AGUA

Antecedentes y diagnóstico de la situación

La adhesión de España a la Unión Europea, y también la internacionalización de la economía española, han provocado cambios substanciales en las estrategias alimentarias y de ocupación del territorio. El déficit de la balanza agroalimentaria española (300.000 millones de ptas), nos dice que es necesario importar productos alimentarios. Esto justifica la necesidad de incrementar la producción de alimentos, más aún, en un país en el que el sector terciario (turismo) está en crecimiento, incrementando, por tanto, el citado déficit.

El regadío continua siendo un instrumento imprescindible para el desarrollo y la consolidación de importantes áreas rurales, ya que posibilita la práctica de una agricultura competitiva, y esto favorece el establecimiento de la agroindustria y de la industria alimentaria en las zonas del territorio alejadas de los grandes núcleos industriales. (El regadío es un elemento potenciador del desarrollo rural porque: potencia los recursos endógenos del área y fomenta el crecimiento de la población de las zonas rurales).

La política de nuevos regadíos está condicionada por la existencia de un conjunto de compromisos históricos adquiridos en zonas declaradas, en su día, de Interés Nacional y de Interés General de la Nación, que implican la implantación del riego de 428.592 ha. Con el actual esfuerzo presupuestario serían necesarios como mínimo 30 o 40 años para realizar sólo aquellos compromisos.

Desde 1985 hasta 1995 ha habido reducciones substanciales de la superficie transformada en regadíos; se ha pasado de 40.000 ha/año hasta 5.000 ha/año, coincidiendo con el término de las transferencias de las competencias del IRYDA a las comunidades autónomas. Se reconoce también que los niveles de eficiencia con las que se gestiona el agua en la agricultura son, en general, inferiores a las que el contexto exige. Esta circunstancia es, en buena parte, consecuencia de la ausencia de los marcos políticos y administrativos necesarios: el Plan Hidrológico Nacional se encuentra en fase de elaboración desde hace 20 años. Asimismo, el Congreso de Diputados ha solicitado recientemente al MAPA un Plan Nacional de Regadíos que justifique la demanda de agua de la agricultura española en un horizonte de 20 años. Actualmente España no es un país suficientemente regulado en el aspecto hidráulico, la prueba son las frecuentes inundaciones y sequías que muchas veces se producen en una misma zona. El ciudadano español sabe que los recursos hídricos del estado son suficientes. Pero faltan las inversiones necesarias para poderlos regular adecuadamente.

Los ejemplos de algunos de los trasvases realizados, como el caso Tajo-Segura, hacen que cualquier planteamiento de transferencia de recursos sea contemplado por la

sociedad con mucha desconfianza y generen conflictos entre comunidades e incluso entre miembros de una misma formación política. La guerra del agua ha aparecido en los medios de comunicación, en el Parlamento y en la opinión pública en general, y se ha incrementado durante los últimos años por la sequía. Un tema como este está tan a flor de piel que es fácil caer en la demagogia desde muchos lados, desestabilizando la convivencia.

Objetivos

Planteamos, pues, que los programas de la política de regadíos del estado y de las comunidades autónomas deben tener los siguientes objetivos:

1) Reequilibrar la balanza comercial agraria.

Podemos y debemos producir el volumen de alimentos que consumimos.

2) Crear explotaciones competitivas

Es necesario destinar urgentemente los recursos económicos y materiales para eliminar o mejorar el regadío no competitivo creando regadíos allí donde los cultivos puedan ser realmente productivos. ¿Cuántas hectáreas es necesario transformar en regadío?. Como mínimo las necesarias para compensar la balanza agroalimentaria, actualmente deficitaria, teniendo en cuenta que las nuevas áreas de regadío deben compensar las de secano y regadío no contabilizado que se tendrán que abandonar. (El regadío puede constituir un interesante instrumento para aplicar en políticas de abandono de áreas de secano, poco rentables al ser sustituidas por superficies de regadío, con producción equivalente, pero sensiblemente inferiores en su dimensión. Este tipo de experiencia se ha iniciado recientemente en la Comunidad Foral de Navarra, siendo interesante el seguimiento de sus resultados).

3) Generar nuevos puestos de trabajo

La reconversión de zonas de secano en regadío, al multiplicar por cinco la producción bruta, han de permitir fomentar la creación de nuevos puestos de trabajo, además de cubrir los ya perdidos y ayudar al equilibrio territorial.

4) Aplicar urgentemente un plan nacional de regadíos que esquemáticamente, contemple las siguientes directrices:

- a) Aumentar la eficiencia del riego (regulaciones intermedias, mejora de las conducciones, cambios en los sistemas de riego, etc.)
- b) Desarrollar fuentes alternativas de los recursos (aguas subterráneas, residuales, desalación, etc.)
- c) Controlar inundaciones, así como prever las soluciones a las sequías mediante la regulación de las grandes cuencas. (Antes de realizar cualquier trasvase, hay que hacer el máximo esfuerzo ahorrador de agua en la cuenca beneficiaria, de manera que el reequilibrio del balance debe proponerse inicialmente mediante la minoración de los consumos en la misma).

5) Respeto al medio ambiente

Todas las acciones para aumentar la producción de alimentos en España a través de la mejora de regadíos existentes y de la transformación de nuevas superficies, tendrán que

contemplar las actuaciones precisas para restaurar y, si es posible, mejorar el entorno ambiental. Hay que tener presente que si bien es cierto que el agricultor consume el 80% del agua, no es menos cierto que las plantas sólo retienen el 3% para su constitución, enviando el resto de agua al medio ambiente por evaporación y transpiración, devolviendo a la atmósfera una agua limpia y descontaminada en forma de vapor.

Estrategias que permiten pasar de la situación diagnosticada a la que cumpla los objetivos propuestos

Para alcanzar estos objetivos, los profesionales firmantes proponemos las siguientes estrategias:

1) Es necesario ayudar económicamente con fondos públicos a los agricultores para que puedan realizar las obras de cambio de sistema de regadío. Esta vía permitiría incentivar el ahorro pudiendo limitar las aguas dadas ajustándolas a las necesidades reales del agricultor con independencia de los caudales concesionales.

2) Poner el máximo énfasis en el ahorro de agua y en la obtención de recursos buscando fuentes distintas de las habituales. Reutilización de aguas residuales urbanas en el regadío agrícola, en campos de golf y en otros usos de equipamiento y desalación de agua de mar para el consumo urbano. (La construcción de las plantas de depuración urbanas necesarias para su reutilización en regadíos, permite no tirar más aguas residuales al mar y aprovecharlas como sustitución de otras aguas).

3) Potenciar la implantación de riegos de alta eficiencia como muestra ahorradora del agua.

Esto permitiría rebajar consumos de 10.000 m³/ha hasta 5.000 m³/ha, utilizando técnicas de goteo dentro y fuera del invernadero, y hasta a 4.000 si se instalan contadores individuales. Los riegos de alta eficiencia además de aumentar la producción por la localización del riego reducen costes al permitir ahorrar agua y fertilizante mientras que continuar con riegos a pie y por conducciones en tierra provoca el pase del agua y abono sobrante a las capas inferiores contaminando los acuíferos.

4) Limitar las pérdidas de agua en su transporte.

Hay que evitar las pérdidas de este recurso que se producen en su transporte imponiendo las tuberías como medio de transporte y distribución de agua para caudales iguales o inferiores a 3.000 l/s. También es necesario transformar las grandes canalizaciones de tierra existentes mediante el uso de hormigón y de otros materiales impermeables.

5) Construcción de todo un conjunto de pequeñas y medianas presas de tierra (de 0,5 a 200 Hm³) en las vertientes mediterráneas, controlando las escorrentias de inundaciones en ríos, rieras y ramblas normalmente secas, que además de reducir la erosión y la desertificación que producen las lluvias torrenciales pueden proporcionar caudales de agua irregulares compatibles con las aguas subterráneas disponibles,

6) El agua es un bien necesario y un recurso escaso que hay que conservar y preveer. Una muestra de ésto ha sido el desarrollo de la Costa Dorada como consecuencia del minitrasvase del Ebro, o de la provincia de Almería con sus invernaderos de hortalizas. Hay que seguir estos ejemplos exitosos.

Reflexión

En la pasada conferencia de Río, quedó manifiesto que las principales causas del deterioro progresivo y de la contaminación del medio ambiente, así como de la destrucción de recursos naturales son: la guerra, la miseria, la ignorancia y la codicia.

Nosotros no queremos la guerra del agua, sino el consenso del agua.

Nosotros no queremos la miseria, sino inversiones fuertes y consensuadas.

Nosotros no queremos la ignorancia, sino el diálogo y recursos técnicos.

Nosotros no queremos la codicia generada frente al bien escaso que es el agua, sino la solidaridad entre los pueblos.

HIDRONET: LA RED DE ECONOMIA Y ECOLOGIA DEL AGUA DE RIEGO EN INTERNET

Martínez Paz, J.M.
Gómez-Limón Rodríguez, J.A.
Berbel Vecino, J.

Resumen

Este trabajo es el complemento al poster presentado al XIV Congreso Nacional de Riegos. En el mismo se informa sobre la creación de la "Red Científica de Economía y Ecología del Agua de Riego", que hemos denominado abreviadamente *Hidronet*. El objetivo fundamental de esta Red es crear un punto común de contacto para todos los investigadores y profesionales interesados en esta temática, constituyendo el foro adecuado para el intercambio de opiniones y experiencias, así como la solicitud de información o colaboración entre expertos. Para dar soporte a la misma se ha decidido utilizar la red mundial de ordenadores Internet, creando un espacio *Web* dentro de la Red, donde se centralizan todos sus contenidos, tales como: relación de miembros, listas de correo, obtención de formularios de inscripción, linkaje a puntos de interés dentro de Internet, etc. La página inicial del mismo se puede consultar en la dirección electrónica *World Wide Web* <http://www.uco.es/grupos/hidronet>.

Abstracts

This poster is the complement to the poster presented at the XIV National Congress of Irrigation. The main objective of this document is describe the creation of the "Scientific Net of Irrigation Water Economics and Ecology" that we have denominated *Hidronet*. The fundamental purpose of this scientific net is to create a common point of contact for all the researchers and interested professionals in this subject, stablishing the adequate forum for the exchange of opinions and experiences. The application of information or coloboration between the experts will be available as well. In order to give the net support we have been decided to use the World Wide Web of Internet, creating a Web space for *Hidronet*, where it is centralized all its contents, like : relationship of members, mail server, inscription forms aplicattion, links to interesting points within Internet, etc.

The Hidronet's home page could been consulted by World Wide Web in the electronic address <http://www.uco.es/grupos/hidronet>.

Dpto. de Economía, Sociología y Políticas Agrarias
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes
Universidad de Córdoba
Avda. Menéndez Pidal s/n
14004 Córdoba
e-mail:hidronet@uco.es

1.- Introducción

El objeto de este documento es dar a conocer la creación de la **Red científica de economía y ecología del agua de riego**, a la que hemos denominado *Hidronet*. Para ello nada mejor que el marco que nos proporciona el XIV Congreso Nacional de Riegos.

La creación de una Red de economía y ecología del agua surge a iniciativa de un grupo de trabajo formado a tal efecto. Este equipo está integrado por investigadores del Departamento de Economía, Sociología y Política Agraria de la E.T.S. Ingenieros Agrónomos y Montes de la Universidad de Córdoba y del Departamento de Economía y Sociología Agrarias del Centro de Investigación y Desarrollo Agrario de Córdoba. Estos investigadores, que vienen trabajando hace ya varios años en estos temas, han visto la necesidad de crear un nodo de comunicación entre todas las personas y organismos dedicados a esta materia, siendo éste el objetivo fundamental de *Hidronet*.

Así esta Red científica pretende mantener un directorio donde se recojan los datos de todos los expertos (profesionales o investigadores) a nivel español sobre la economía y ecología del agua de riego, de forma que la misma sirva de marco de referencia y lugar de coordinación para la investigación y proyectos en este ámbito, y, por qué no, como foro de discusión.

El soporte básico de la Red es un servidor *Web*, instalado en la Universidad de Córdoba. Esta decisión de situar esta Red científica en Internet se ha debido a la gran difusión ya en nuestros días esta nueva tecnología general. Si a ello unimos además la economía y rapidez que supone su uso, llegaremos a la conclusión que éste constituye el medio de comunicación más adecuado para la comunidad científica. De todas formas, a sugerencia de los integrantes de la misma se podría estudiar otro tipo de medio o soporte para el funcionamiento de la misma.

Antes de entrar a explicar los contenidos del Servidor *Web* de *Hidronet*, creemos interesante hacer una pequeña introducción a los servicios de Internet que se han utilizado en la constitución de la misma.

2.- Internet y el *Web* como soporte idóneo de *Hidronet*.

El concepto de Internet, o la "Red" como también se la conoce, es un tanto vago. Se trata tan sólo de la conexión de un número, en principio indeterminado, de redes de ordenadores, donde se hace posible el intercambio de información entre todas las máquinas conectadas a las mismas. Así, técnicamente Internet es tan sólo un gran conjunto de redes de ordenadores interconectadas. Sin embargo, desde otro punto de vista, esta Red se ha convertido un fenómeno social y cultural sin precedentes. Efectivamente, su utilización pone a los usuarios en contacto con la mayor fuente de información que haya existido, procedente de todas las partes del globo. Es de esta manera como el concepto de "aldea global" cada vez está teniendo un mayor sentido.

Durante los últimos años la información contenida en Internet ha crecido exponencialmente, pasándose de formatos textuales a multimedia. Esta gran masa de datos se ha venido sin embargo distribuyendo de forma anárquica por todos los ordenadores que componen de la Red. Ambas circunstancias ha hecho necesario el desarrollo de nuevas aplicaciones informáticas que permitan la estructuración de la información en formatos multimedia, y que además posibiliten una navegación eficiente a través de la Internet, de forma que permita su completa exploración. Estas dos características son las más destacables de la nueva herramienta de la Red; el *World Wide Web (WWW)*.

WWW es la más espectacular y potente de las herramientas de navegación de la Red, siendo además muy fácil de manejar, incluso para los no expertos en informática. Esta ergonomía que proporcionan el *Web* a los servicios de Internet ha sido la responsable directa del impresionante aumento de usuarios de que está teniendo la Red en estos últimos meses.

En realidad la WWW es una red de servidores dentro de Internet que ofrecen información estructurada en páginas con un formato denominado HTML (*HyperText Markup Lenguaje*), un lenguaje de definición de páginas con extensiones hipertextuales, que contienen, además de texto en varios formatos, imágenes, sonido o vídeo. Además éstas hacen posible recorrer la Red, permitiendo al usuario la lectura de otras páginas *Web* instaladas en otros servidores situados en cualquier parte del mundo. Es lo que se denomina "linkaje" entre páginas *Web*. Así pues, al consultar un documento WWW, encontraremos algunas palabras o direcciones, denominadas "palabras calientes". Al activar éstas con el ratón pasaremos a otras páginas hipertextuales que pueden pertenecer al mismo servidor o a cualquier otra máquina servidora de *Web* dentro de Internet.

El WWW utiliza un sistema cliente-servidor. De esta forma, para poder ofrecer información, los servidores deberán tener creadas páginas *Web* siguiendo el estándar HTML y tenerlas en Internet a través de un servidor WWW. Para poder leer estas páginas necesitaremos un programa "cliente" que sea capaz de leer y de interpretar esta información. Estos programas son conocidos popularmente como "navegadores", de los cuales hoy día el más difundido es el *Netscape Navigator*.

Las páginas *Web*, al igual que otros servicios de Internet, cuentan con su propio URL (*Uniform Resource Locator*). Se trata de un código que contiene la identificación del servicio, la dirección del servicio, la dirección del servidor y, si es necesario, el directorio donde se encuentran los ficheros a emplear dentro del sistema remoto. Así, el servidor *Web* de *Hidronet* se localiza en la siguiente dirección electrónica:

http://www.uco.es/grupos/hidronet.

En la misma, la entrada "*http*" identifica el tipo de recurso, en este caso una página de hipertexto, La segunda parte ("*www.uco.es*") identifica el ordenador, que en este caso es el servidor *Web* de la Universidad de Córdoba. Por último, la referencia "*/grupos/hidronet*" indica el directorio donde está disponible la página de entrada al servicio.

3.- El servidor *Web* de *Hidronet*.

La entrada antes referida es la que aparece en el gráfico de la página siguiente. En el mismo se observa la existencia 6 elementos de enlace, que posibilitan el acceso a las otras páginas *Web* de la Red Científica con un simple "clic" de ratón. Estas otras páginas que constituyen *Hidronet* son:

1.- ¿Que es Hidronet?

En esta página es donde se explican el origen, objetivos y forma de funcionamiento de *Hidronet*, de forma similar a como hemos hecho en la introducción de este documento.

2.- ¿Como formar parte de Hidronet?

Enlazando con esta página podremos encontrar información sobre el procedimiento a seguir para ser miembro de *Hidronet*. Para ello bastará con rellenar un formulario de inscripción dispuesto para este fin. Este puede conseguirse directamente del mismo servidor, en formatos *Word Perfect* o *Word*, mediante la transferencia de ficheros que proporciona el navegador. Una vez relleno el mencionado formulario, es necesario enviar el mismo por correo ordinario al coordinador técnico de la Red.

Para cualquier miembro potencial de *Hidronet*, que todavía no tenga acceso a Internet, este formulario puede encontrarse al final del presente documento.

3.- Miembros de Hidronet.

En este punto se encuentra la relación de personas que nos han suministrado sus datos para formar parte esta Red científica. Esta página cuenta con un sistema de búsqueda alfabética que posibilita la localización de personas determinadas dentro de toda la lista. También está disponible un sistema de clasificación tanto por organismos, como por áreas de trabajo (Impacto económico y ecológico de la agricultura de regadío, Eficiencia en el uso de agua por los cultivos, Regadíos y

desarrollo sostenible, Aspectos sociales, legales y de Política Agraria del agua de riego, Aspectos ambientales del agua de riego, Modelos de soporte a la decisión a nivel de explotación, etc.). Además, esta página posibilita el enviar directamente correo electrónico a cualquiera de los miembros que nos hallan facilitado su dirección de *e-mail*.



RED DE ECONOMIA Y ECOLOGIA DEL AGUA DE RIEGO

*Departamento de Economía y Sociología y
Política agrarias.*

*Centro de Investigación y Desarrollo
Agrario.*

Universidad de Córdoba.

Junta de Andalucía.



There's also available an english version of this page.

CONTENIDOS DE HIDRONET

● [¿Qué es Hidronet?](#)

● [¿Como formar parte de hidronet?](#)

● [Miembros de HIDRONET](#)

● [Otros WEB de interés](#)

● [Lista de correo](#)

● [Novedades](#)



Esta página está optimizada para Netscape 2.0 o superior



Página en construcción.

Responsable del montaje: José Miguel Martínez Paz. Si desea hacer algún comentario o sugerencia sobre esta página pulse sobre el nombre. Será bienvenido.



RED DE ECONOMIA Y ECOLOGIA DEL AGUA DE RIEGO

FICHA DE INSCRIPCION

Nombre: _____

Apellidos: _____

Organismo al que pertenece: _____

Departamento: _____

Puesto que desempeña: _____

Dirección postal: _____

País: _____

Tfo: _____

Fax: _____

E-mail: _____

Areas de trabajo

Impacto económico y ecológico de la agricultura de regadío	
Impacto económico y ecológico de la agricultura continental en los recursos hídricos	
Eficencia en el uso de agua por los cultivos	
Regadíos y desarrollo sostenible	
Aspectos sociales, legales y de Política Agraria del agua de riego	
Aspectos ambientales del agua de riego	
Modelos de soporte a la decisión a nivel de cuenca	
Modelos de soporte a la decisión a nivel de explotación	
Otras (especificar)	

Alguna(s) publicación(es) relevante(s) sobre el tema

Remitir a la siguiente dirección:

José Miguel Martínez Paz. Dpto de Economía, Sociología y Política Agrarias.

E.T.S.I. Agrónomos y Montes. Avda. Menéndez Pidal s/n.

14004 Córdoba.

Tfo: 957/ 218555

Fax: 957/ 218539

OPINIÓN DE LOS AGRICULTORES FRENTE A POSIBLES MEJORAS EN LOS REGADÍOS ANDALUCES

RODRÍGUEZ OCAÑA, A¹ (P)
ARRIAZA BALMÓN, M.²
RUIZ AVILÉS, P.³

RESUMEN

Esta comunicación⁴ presenta resultados de una encuesta sobre la opinión de los agricultores del regadío andaluz hacia posibles mejoras que puedan introducirse en los regadíos, así como también se recoge su disposición a contribuir económicamente en la realización de las mejoras. La encuesta ha sido realizada sobre una muestra de 254 regantes en Andalucía. El muestreo adoptado ha sido estratificado geográficamente a nivel de comarca en base al número de explotaciones, al índice de diversificación de cultivos y la producción bruta agraria (incluida subvenciones). La encuesta recoge variables relacionadas con la localización y la caracterización socioeconómica de la explotación (edad del agricultor, nivel de estudios, formación agraria, superficie de la explotación y aprovechamientos y orientación técnica productiva principal) y variables de opinión sobre medidas de mejoras en los regadíos (empleo de contadores y pago según consumo medido, mejora de las redes de conducción, formación para los regantes, servicio de asesoramiento, aumento de riegos localizados, trasvase entre cuencas, construcción de embalses, primas para el abandono de concesiones de riegos, no autorización de nuevos regadíos, fomento de los cultivos de ciclo de otoño-invierno de menor demanda, preferenciar el riego para cultivos sociales si el agua es escasa, preferenciar el riego para cultivos competitivos, empleo de aguas residuales).

Abstract

This report presents the results of a farmer-opinion survey about improvement of irrigation-system. It also look at farmers disposition for the financial contribution to these improvements. The survey was carried out over a sample of 254 irrigators in Andalucía. The sampling was geographically stratified. The survey includes questions about location and farming-socioeconomic: age of farmer, education degree, farming training, area of land and farming system, and questions related to irrigation improvement: water meters, rehabilitation of the delivery system, irrigation training, introduction of drip irrigation, construction of water reservoirs, renounce to water rights, transfer of water from basin to basin, unauthorisation of new irrigation schemes, development of new winter crops, favoring social irrigated crops in case of water shortage, favoring high-value irrigated crops, use of recycled water.

¹ : Ingeniero Agrónomo M.Sc. Titulado Superior de la Junta de Andalucía Unidad de Economía y Sociología Agraria del CIDA de Córdoba. Apartado 4240-14.080 Córdoba.

² : Ingeniero Agrónomo. Becario predoctoral I.N.I.A en la Universidad de Reading.

³ : Dr. Ingeniero Agrónomo y Licenciado en Sociología. Investigador-Jefe de Proyecto de la Junta de Andalucía.

⁴ : Esta investigación ha sido realizada dentro del marco del proyecto de investigación "Impacto Socioeconómico de la Sequía en la Agricultura Andaluza" financiado por la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, relacionado a su vez con el Proyecto INIA SC94-095 Impacto de las Reformas de la PAC sobre la renta, el empleo y otros factores de producción en los sectores de cultivos herbáceos, materias grasas y ganadería extensiva".

1.-INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS.

La sequía reinante en Andalucía desde el año agrícola 1991/1992 ha determinado una reducción importante de las dotaciones de agua para el regadío para 1992 y la ausencia casi total de riegos para las siguientes campañas. Lo cual ha producido una sensibilización del sector agrario hacia la mejora del aprovechamiento de los recursos hídricos. Con objeto de evaluar el impacto de la sequía se desarrolla el proyecto de investigación "Impacto Socioeconómico de la Sequía en la Agricultura Andaluza". Esta evaluación tiene como fuente de base para recoger datos primarios 1050 encuestas a explotaciones agrarias (350 para agricultores de secano, 350 para agricultores de regadío y 350 para ganaderos).

Para el subsector agrícola, la opinión de los agricultores se recoge en un cuestionario diseñado específicamente para evaluar el impacto socioeconómico de la sequía. Este cuestionario tiene como objetivos detectar: a) los cambios de distribución de cultivos realizado por los agricultores; b) la disminución de rendimientos; c) las inversiones realizadas para paliar la ausencia de riegos públicos; d) los cambios en la utilización de los factores de producción. El cuestionario también recoge la opinión frente a posibles mejoras en el regadío, la financiación de la explotación agraria, la implantación de ATP y la opinión sobre el seguro agrario. Esta comunicación presenta resultados sobre la opinión de los agricultores del regadío andaluz hacia posibles mejoras que puedan introducirse en los regadíos, así como también se recoge su disposición a contribuir económicamente en la realización. A la fecha en que esta comunicación se elabora sólo se dispone de 254 encuestas agricultores de regadío.

2.-LA ENCUESTA.

La encuesta en lo relativo a la caracterización de las explotación agrarias recoge las siguientes variables:

- Término Municipal principal y comarca donde se encuentra la explotación.
- Edad del agricultor o del gestor de la explotación.
- Nivel de estudios. Es una variable ordinal que toma valores de 1 a 5. (1: Sin estudios, 2: Con estudios primarios, 3: Con estudios de enseñanza secundaria, 4: Con estudios medios universitarios 5: Con estudios superiores universitarios).
- Formación agraria. Igualmente toma valores de 1 a 5. (1: Sin estudios agrarios; 2: Con cursos de capacitación 3: Con formación profesional agraria, 4: Con estudios agrarios medios universitarios 5: Con estudios agrarios superiores universitarios).
- Superficie de la explotación y sus aprovechamientos (secano, regadío y pastos).
- Orientación técnica productiva principal según las empleadas por el Censo Agrario de 1989 (herbáceos, olivar, cítricos, otros frutales y viñedo).

Las variables relativas a las medidas contempladas y sus denominaciones abreviadas son:

- Empleo de contadores y pago según consumo medido (*CONTADORES*)
- Mejora de las redes de conducción (*REDES*).
- Formación para los regantes. Servicio de asesoramiento (*FORMACIÓN*).
- Aumento de riegos localizados (*LOCALIZADOS*).
- Tránsito entre cuencas (*TRASVASES*).
- Construcción de embalses (*EMBALSES*).
- Primas para el abandono de concesiones de riegos (*PRIMAS*).
- No autorización de nuevos regadíos (*NO AUTORIZACIÓN*)
- Fomento de los cultivos de ciclo de otoño-invierno, de menor demanda de agua (*CICLO*)
- Preferenciar el riego para cultivos sociales si el agua es escasa (*SOCIALES*).
- Preferenciar el riego para cultivos competitivos (*COMPETITIVOS*).
- Empleo de aguas residuales (*RESIDUALES*).

Cada medida es valorada en una escala del 1 al 5 (1: muy mala; 2: mala; 3: Regular; 4: Buena; 5: Muy Buena). El agricultor valora la medida y su disposición a contribuir económicamente en su realización.

3.-EL MUESTREO.

El muestreo adoptado ha sido estratificado en primer lugar geográficamente por comarca⁵, en base a tres índices: a) según el número de explotaciones de regadío de la comarca (Censo Agrario, 1989) ; b) según el índice de diversificación de cultivos⁶ ponderado según la superficie de la comarca; c) la producción bruta comarcal calculada (incluyendo subvenciones). Cada comarca tiene una importancia para cada índice, el índice de estratificación es la media de los tres índices.

En un segundo nivel, las encuestas se han estratificado dentro de la comarca apoyándose en el Censo Agrario del 1989⁷. Así para cada comarca, las encuestas se

⁵: Las 350 encuestas de regadío no se realizan en todas las comarcas, se han desechado aquellas comarcas en las cuales la Delegaciones Provinciales de la Consejería de Agricultura y Pesca han informado que no habido pérdidas socioeconómicas debido a la sequía. Estas comarcas son: Bajo Almansora, Campo Dalías, Campo Níjar, Bajo Andarax y Andévalo Occidental.

⁶: El índice de diversificación de cultivo de una comarca se define como el inverso del coeficiente de variación de la serie de datos de distribución de cultivos comarcal. Así cuanto más cultivos tenga una comarca más alto será su coeficiente de diversificación y por tanto mayor el número de encuestas a realizar en ellas. La fuente empleada son los impresos 1-T municipales agragados a nivel comarcal de los años 1990 y 1991.

⁷: El Censo Agrario del 1989 tiene una dificultad para su manejo. En el Censo, si una explotación tiene más de una O.T.P. (la orientaciones técnica productivas son las definidas por el censo agrario, es decir herbáceos, frutales, viñedo y olivar para el secano y para el regadío además, los cítricos). viene contada en las O.T.P. que realiza, lo cual trae consigo que tal cual está el Censo éste no sea útil para realizar una estratificación de encuestas. Para superar esta dificultad Pérez y Rodríguez (1994) establecieron para la comarca de la Vega de Sevilla un algoritmo de cálculo que permite realizar una aproximación para determinar para cada O.T.P. y por estrato de superficie el número de explotaciones que tiene cada estrato y O.T.P. principal realizada por cada explotación. Este mismo algoritmo se ha aplicado para todas las comarcas de Andalucía.

estratifican por Orientación Técnica Productiva Principal y por estratos de superficie contempladas en el Censo Agrario del 1989. La estratificación para cada comarca se realiza teniendo en cuenta: a) el porcentaje del número de explotaciones sobre el total de explotaciones de la comarca; b) el porcentaje de superficie sobre el total de la superficie de la comarca; c) el porcentaje de la producción final agraria (incluyendo subvenciones).

La población la forman 107991 agricultores con tierras labradas principalmente en regadío y explotaciones mayores de 1 ha.. El regadío total andaluz ocupa 683115 ha de regadío totales (Censo Agrario, 1989). Para las 254 encuestas disponibles el margen de error máximo será de 6 % para todo el ámbito andaluz para las variables que tengan la proporción más restrictiva en cuanto a tamaño muestral ($p= 50 \%$) con un nivel de confianza del 95,5 %.

La muestra representa al 1,37 % de la superficie de regadío y al 0,23 % de la población de regantes.

Tabla nº1.-Distribución de la muestra por O.T.P.

O.T.P.	Nº de explotaciones	Superficie de regadío	Superficie total (ha.)
Herbáceos	186	5790	11071
Cítricos	12	1595	2035
Otros frutales	21	774	1037
Olivar	32	1230	1779
Viñedo	3	10	10
Total	254	9399	15932

La encuesta se realiza desde el mes de Enero a Abril de 1996 siguiendo el método de rutas aleatorias guiadas según la estratificación explicada anteriormente.

4.-RESULTADOS

4.1.-Ranking de opinión de medidas.

A continuación se expresan las medias para cada una de las medidas de opinión, disposición a contribuir económicamente y la diferencia "OPINIÓN-CONTRIBUCIÓN".

Tabla n° 2.-Resultados de la valoración de las diferentes medidas para disponer de más agua y disposición de los agricultores a contribuir económicamente en su realización.

	Opinión	Contribución	Diferencia
Redes	4,4	3,5	1,0
Localizados	4,4	3,7	0,8
Embalses	4,3	2,4	1,9
Trasvase	4,1	2,3	1,8
Contadores	3,9	3,1	0,8
Residuales	3,7	3,0	0,8
Formación	3,7	2,4	1,3
Competitivos	3,5	3,0	0,6
Sociales	3,3	2,4	0,9
Ecológicos	3,1	2,8	0,3
Cido	3,0	2,3	0,7
No autorización	2,9	2,2	0,7

Elaboración propia.

De la observación de esta tabla se desprende que las medidas mejor valoradas coinciden con aquellas en las cuáles en principio los agricultores están más dispuestos a colaborar económicamente en su realización: la mejora de las redes de conducción y la implantación de riegos localizados. De la misma forma destacar la buena valoración que tienen la implantación de contadores y pago según consumo medido.

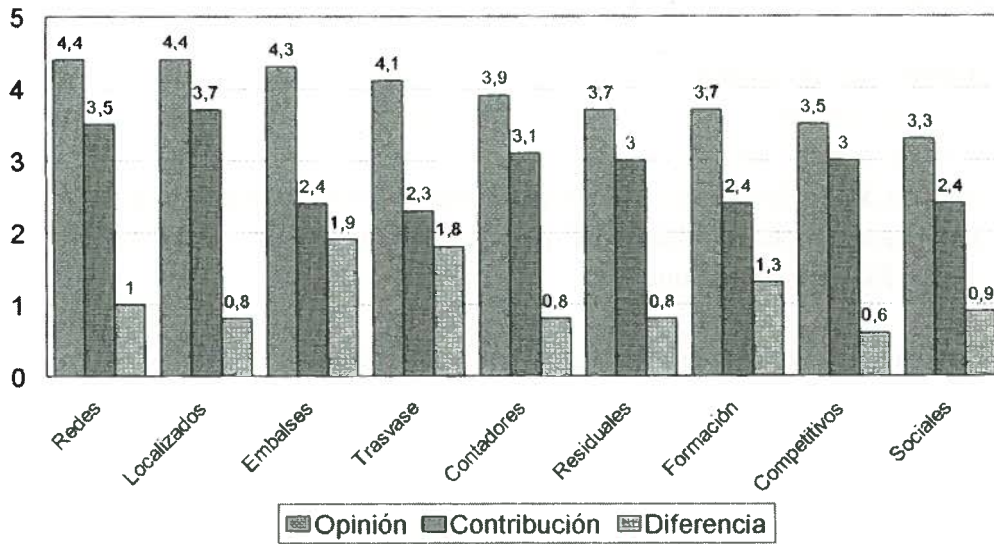
4.2.-Índice sintético de disposición a contribuir económicamente en la realización de medidas.

El índice sintético para definir la disposición de a contribuir económicamente en la aceptación de medidas para el regadío se ha obtenido para cada agricultor de la siguiente forma:

1º) A partir del ranking de opinión sehan seleccionan las medidas que los agricultores consideran más favorables que denominamos variables primarias, tanto para la opinión como la contribución, así como la relación opinión-contribución que se expresa por medio de la diferencia “Valor opinión - Valor contribución”, en adelante variable diferencia. Se analizan así 9 medidas o indicadores (*REDES, LOCALIZADOS, EMBALSES, TRASVASES, CONTADORES, RESIDUALES, FORMACIÓN, COMPETITIVOS Y SOCIALES*). Los datos relativos a estas medidas se representan en la figura n°1.

Figura nº1.-Medidas sobre mejoras del regadío

Media opinión y contribución (1-5)

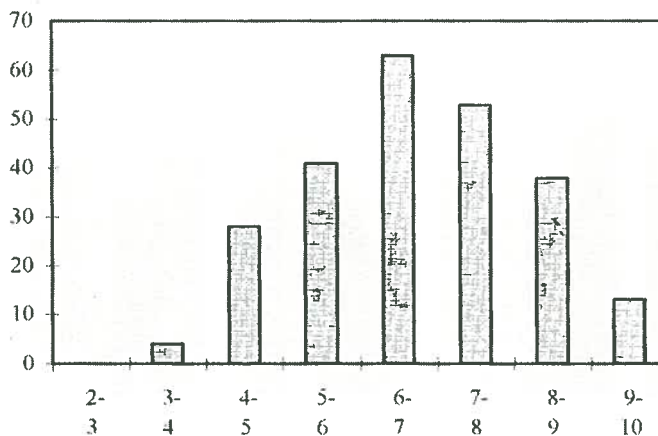


Elaboración propia

2º) Se obtiene un índice sintético (*INDICE*) que expresa conjuntamente la opinión y la contribución media como la suma de los indicadores *OPINIÓN* + *CONTRIBUCIÓN*.

3º) Se obtiene la distribución de frecuencia del *INDICE* (figura nº 2).

Figura nº 2.-Distribución del índice suma (media opinión + media contribución)



4º) Se ha establecido tres grupos de opinión de agricultores:

-**Grupo 1. Agricultores “más dispuestos”** Correspondientes a aquéllos que se encuentran por encima del percentil superior del 25 %, los cuales poseen un *ÍNDICE* superior a 7,8.

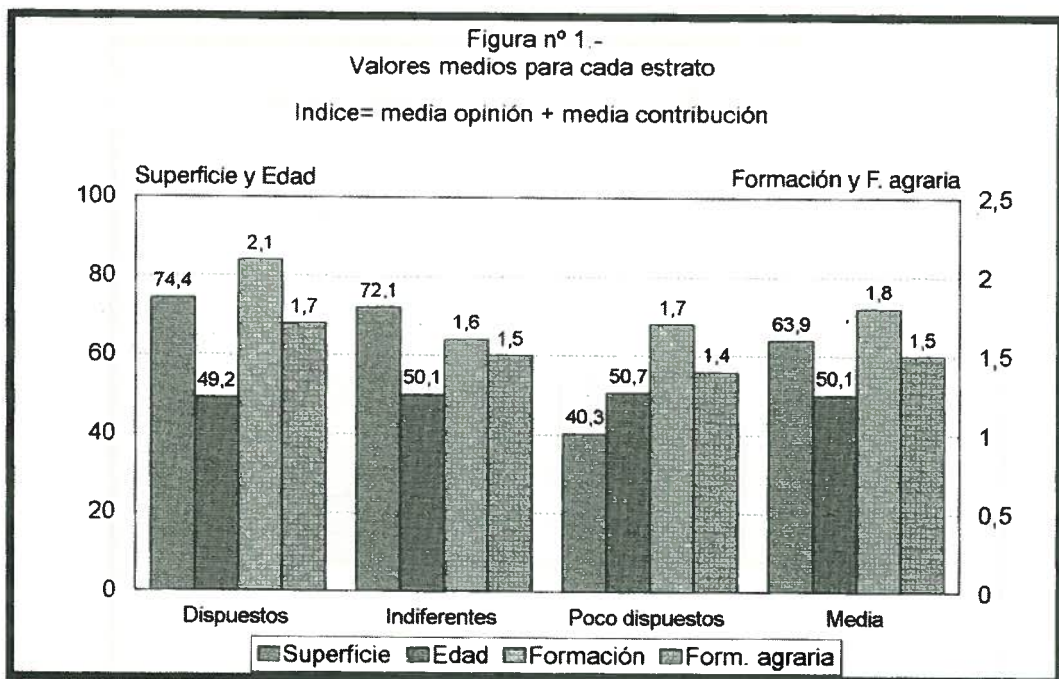
-**Grupo 2. Agricultores “indiferentes”**. Correspondientes aquellos que se encuentran entre el percentil superior del 25 % y el inferior, con un *ÍNDICE* entre 5,9 y 7,8.

-**Grupo 3. Agricultores “menos dispuestos”**. Correspondientes aquellos que se encuentran por debajo del percentil inferior del 25.%, que cuentan con un *ÍNDICE* menor que 5,9.

Estos agricultores se caracterizan según la tabla adjunta.

Tabla nº3.-Caracterización de los grupos de opinión

	Índice suma	N encuestas	Superficie		Distribución media		Edad		Formación		Formación agraria	
			Media	Desviac. Tip.	Secano %	Regado %	Media	Desviac. Tip.	Media	Desviac. Tip.	Media	Desviac. Tip.
Dispuestos	$i > 7,8$	64	74,4	255,1	7,9	88,2	49,2	10,4	2,1	1,3	1,7	1,1
Indiferentes	$7,8 = i \leq 5,9$	110	72,1	225,0	9,8	84,5	50,1	10,9	1,6	1,1	1,5	1,1
Poco dispuestos	$i < 5,9$	66	40,3	84,1	10,6	80,4	50,7	13,0	1,7	1,2	1,4	0,8
Total		240	63,9	206,9	9,5	84,5	50,1	11,4	1,8	1,2	1,5	1,0



De la observación de esta tabla se desprende⁸:

1º) La superficie de los agricultores del Grupo 3 es inferior a la de los otros grupos.

2º) La media de los niveles de formación del Grupo 1 es superior a las de los grupos 2 y 3.

5.-CONCLUSIONES.

En general se puede afirmar que la sequía ha traído consigo una sensibilización de los agricultores hacia la adopción de mejoras en el regadío con las cuales se ahorre o se disponga de más agua. Es ilustrativo, en este sentido, que los agricultores estén dispuestos a financiar en parte la implantación de riegos localizados y la mejora de las redes de conducción. El empleo de contadores y las mejoras para el uso de aguas residuales tienen una aceptable acogida en cuanto a contribución económica y también las consideran actuaciones a acometer para el ahorro de agua. Así mismo, tienen una opinión favorable hacia recibir formación aunque no están dispuestos a contribuir económicamente a ello. Evidentemente, los regantes estiman como muy positiva la realización de embalses y trasvases, aunque no están de acuerdo en contribuir económicamente en la ejecución de estas obras.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen las sugerencias recibidas en la preparación del cuestionario por parte del resto de miembros de la Unidad de Economía y Sociología Agraria del CIDA de Córdoba, de los funcionarios del Servicio de Estudios de la Consejería de Agricultura y del Dr. Luciano Mateos del Instituto de Agricultura Sostenible.

BIBLIOGRAFÍA.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (I.N.E.), 1991. Censo Agrario 1989. Tomo III. Resultados provinciales. I.N.E. Madrid. (tomos de las ocho provincias andaluzas).

GARCÍA FERRANDO, 1995. Socioestadística: introducción a la estadística en sociología. De: Alianza Editorial. Madrid. 557 p.

⁸ : Pendiente de realizar los test de separación de medias.

**TRABAJOS RECIBIDOS
FUERA DE PLAZO**

GASTOS DE AGUA Y COSECHAS OBTENIDAS EN LOS REGADÍOS DEL PONIENTE ALMERIENSE.

Carreño Sánchez, J. (P) y Pérez Martínez, C. (*)¹

RESUMEN

Durante las campañas 93/94 y 94/95, se han cuantificado los gastos de agua, con contadores volumétricos, y las cosechas obtenidas, en 35 explotaciones comerciales, con cultivos hortícolas, realizados en invernaderos con cerramiento de plástico. Todas situadas en distintos parajes del Poniente de Almería.

El gasto medio de agua por campaña, en cultivos realizados en suelo, ha sido de 4768 m³/ha, en la campaña 93/94, y de 5754 m³/ha, en la 94/95. Cuando los cultivos se desarrollaron en sustratos (lana de roca o perlita), el gasto de agua fue de 6163 m³/ha (campaña 93/94), y de 6833 m³/ha (campaña 94/95).

Las producciones comerciales medias obtenidas, para el conjunto de los cultivos, por campaña han sido de 10 kg/m² y 13 kg/m², respectivamente, en cultivos en suelo, y de 18 kg/m² y 19 kg/m² en cultivos en sustratos.

La productividad media del agua, expresada en kg de cosecha generada por cada m³ de agua empleada en el riego, incluyendo todos los cultivos, fue por campaña en los cultivos en suelo de 21 Kg/m³ y 23 kg/m³ respectivamente, y de 29 kg/m³ y 28 kg/m³ en cultivos en sustratos.

Se da también información sobre los gastos de agua, las producciones obtenidas y las productividades del agua, de cada cultivo, por campaña.

1.- INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS.

El agua ha sido un factor limitante, a lo largo de la historia, del desarrollo de la agricultura en Almería. En los últimos años, se han hecho estudios sobre los usos que se dan al agua en la provincia (LÓPEZ-GÁLVEZ et al., 1993; NAREDO et al., 1993). También se han hecho trabajos para analizar su utilización en las explotaciones comerciales con cultivos hortícolas en invernadero (CARREÑO, 1995; CARREÑO y PÉREZ MARTÍNEZ, 1995; NAREDO et al., 1994). A medida que aumente el conocimiento sobre el recurso, se podrá mejorar en la gestión del mismo, tanto por parte de la Administración como por los usuarios.

¹ (P) Estación Experimental de la Caja Rural de Almería. Apdo. 250. 04080 Almería.

(*) Becaria F.I.A.P.A. Estación Experimental de la Caja Rural de Almería. Apdo. 250. 04080 Almería.

Con el objetivo de cuantificar el gasto de agua y la producción generada por la misma en los cultivos hortícolas realizados bajo plástico, se está haciendo un seguimiento de explotaciones comerciales con invernaderos, situadas en el litoral de las provincias de Almería y Murcia. Exponemos en este trabajo resultados de las dos primeras campañas, 93/94 y 94/95, elaborados a partir de datos tomados en treinta y cinco explotaciones, situadas en distintos parajes del Poniente de Almería.

Se da información sobre el gasto de agua, sobre las producciones obtenidas y sobre la productividad del agua, por campañas y por cultivos.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

Las treinta y cinco explotaciones comerciales estudiadas cada campaña, algunas no han sido las mismas las dos campañas, están situadas en los términos municipales de Adra, Berja (Balanegra), El Ejido, La Mojonera, Roquetas de Mar y Vícar. Sus características, similares a las de las explotaciones de su entorno, se describen a continuación.

Características.-

Invernaderos.-

En la campaña 93/94, la superficie total de invernaderos controlada fue de 330271 m². Oscilando entre 2500 y 20000 m² por explotación. En la campaña 94/95, se hizo el seguimiento de 332403 m². Por explotación la superficie osciló entre 2500 y 21000 m².

La estructura de los invernaderos estaba formada por los habituales tejidos de alambre, para hacer la sujeción del plástico, soportados por: apoyos de madera, en 24 explotaciones, las dos campañas; apoyos derechos de madera y apoyos del ruedo de vigas de hierro, en 5 explotaciones la primera campaña y 4 la segunda; todos los apoyos de tubo galvanizado, en 4 explotaciones la primera campaña y 5 la siguiente; apoyos derechos de viguetas de hormigón y apoyos del ruedo de tubo galvanizado, en 1 explotación; y apoyos derechos de viguetas de hormigón y apoyos del ruedo de vigas de hierro, en 1 explotación.

En cuanto a los tipos de cubierta de los invernaderos, era: plana en el 46% de la superficie controlada la primera campaña, y en el 36% la segunda; a dos aguas multicapillas ('raspas y amagados') en el 35 % la primera campaña, y en el 43% la segunda; asimétrica en el 15% la primera campaña, y en el 17% la segunda; y simétrica (con una sola capilla) en el 4% las dos campañas.

El material de cerramiento más utilizado ha sido polietileno de tres campañas.

Suelos o sustratos.-

En la campaña 93/94, suelo enarenado tuvo el 81% de la superficie controlada; suelo 'desnudo' con acolchado de plástico negro tuvo el 8%; cultivo en lana de roca tuvo el 8% y cultivo en perlita tuvo el 3%.

En la campaña 94/95, suelo enarenado tuvo el 73% de la superficie de seguimiento; suelo 'desnudo' con acolchado de plástico negro tuvo el 14%; cultivo en lana de roca tuvo el 10%; y cultivo en perlita tuvo el 3%.

Sistemas de riego.-

En la totalidad de las explotaciones, el sistema de riego empleado ha sido riego por goteo.

En la campaña 93/94, la distribución de los puntos de riego, o goteros, ha sido de 1 x 0,5 m en el 73% de las parcelas; 2 x 0,5 m en el 16%; 1,33 x 0,5 m en el 8%; y 1,75 x 0,5 m en el 3%. El caudal nominal de los goteros fue de 3 l/h en el 57% de las parcelas; de 2 l/h en el 40% y de 4 l/h en el 3%.

En la campaña 94/95, la distribución de los puntos de riego, o goteros, ha sido de 1 x 0,5 m en el 76% de las parcelas; 2 x 0,5 m en el 13%; 1,33 x 0,5 m en el 8%; y 1,75 x 0,5 m en el 3%. El caudal nominal de los goteros fue de 3 l/h en el 59% de las parcelas; de 2 l/h en el 38% y de 4 l/h en el 3%.

Los coeficientes de uniformidad se midieron en los meses de junio, julio y agosto de 1995, en 23 parcelas de 22 explotaciones. Fue de un 52% en 1 caso, de entre 70 y 80% en 2 casos, de entre 80 y 90% en 6 casos y superior al 90% en las 14 restantes.

Suministros de agua.-

En la campaña 93/94 el agua tuvo 9 procedencias, destacando la Comunidad de Regantes Sol y Arena, que suministró al 40% de las explotaciones, seguida de la Comunidad de Regantes Sol Poniente que suministro al 31%. Los valores extremos de la conductividad eléctrica del agua fueron de 0,36 y 1,9 dS/m.

En la campaña 94/95 el agua tuvo las mismas 9 procedencias, destacando las Comunidades de Regantes Sol y Arena y Sol Poniente, que suministraron cada una al 34% de las explotaciones. Los valores de la conductividad eléctrica fueron los mismos.

Cultivos.-

Campaña 93/94.-

Pimiento, ocupó una superficie de 112303 m², se cultivó en 14 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Maribel, Drago, Atol, Orobelle, Spartaco, Marvello, Roldán, Salsa y Mazurca. La densidad de plantación fue de 2 planta/m². Cuando se cultivó en otoño, el ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 15 de junio y el 14 de septiembre; y como período de arranque entre el 23 de noviembre y el 27 de abril. Cuando se cultivó como único cultivo en la campaña, la implantación se hizo entre el 18 de agosto y el 23 de septiembre; y el arranque se realizó entre el 10 de abril y el 15 de junio.

Melón, ocupó una superficie de 96860 m², se cultivó en 12 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Daimiel, Braco, Futuro, Clipper, Vauclusen, Gearmar, Amarillo Canario de Clause y Categoría. La densidad de plantación osciló entre 0,5 y 1,5 planta/m². El ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 24 de enero y el 19 de abril; y como período de arranque entre el 11 de mayo y el 12 de julio.

Pepino largo, ocupó una superficie de 83868 m², se cultivó en 12 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Volcán, Palmera, Brunex, Virginia, Alaska y Corona. La densidad de plantación osciló entre 1 y 1,5 planta/m². El ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 11 de agosto y el 12 de octubre; y como período de arranque entre el 20 de diciembre y el 14 de marzo.

Judía de enrame, ocupó una superficie de 68300 m², se cultivó en 4 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Helda y Perona. La densidad de plantación osciló entre 1 y 3 planta/m². Cuando se cultivó en otoño, el ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 12 de agosto y el 21 de noviembre; y como período de arranque entre el 15 de noviembre y el 30 de marzo. Cuando se cultivó en primavera, el ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 8 de diciembre y el 27 de abril; y como período de arranque entre el 23 de abril y el 30 de julio.

Tomate, ocupó una superficie de 65200 m², se cultivó en 4 explotaciones. Las

variedades cultivadas fueron: Daniela, Atlético, FA 179 y FA 115. La densidad de plantación fue de 1 y 1,3 planta/m². Cuando se cultivó en otoño, el ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 13 de agosto y el 16 de agosto; y como período de arranque entre el 15 de enero y el 28 de febrero. Cuando se cultivó en primavera, el cultivo se implantó el 15 de enero y se arrancó el 10 de julio. Cuando se cultivó como único cultivo en la campaña, la implantación se realizó entre el 16 de agosto y el 10 de septiembre y el arranque se hizo entre el 27 de mayo y el 17 de junio.

Sandía injertada en calabaza, ocupó una superficie de 41300 m², se cultivó en 6 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Resistente y Dulce Maravilla. La densidad de plantación osciló entre 0,2 y 0,5 planta/m². El ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 29 de diciembre y el 15 de marzo; y como período de arranque entre el 3 de mayo y el 13 de junio.

Berenjena, ocupó una superficie de 36500 m², se cultivó en 3 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Rima, Madonna y Diva. La densidad de plantación osciló entre 0,6 y 2 planta/m². El ciclo de cultivo, que siempre ocupó toda la campaña (otoño - primavera), tuvo como período de implantación entre el 8 de septiembre y el 15 de septiembre; y como período de arranque entre el 5 de mayo y el 20 de junio.

Calabacín, ocupó una superficie de 12900 m², se cultivó en 1 explotación. La variedad cultivada fue: Diamante. La densidad de plantación fue de 1 planta/m². El cultivo se implantó el 1 de octubre y se arrancó el 11 de febrero.

Sandía sin injertar, ocupó una superficie de 12900 m², se cultivó en 1 explotación. La variedad cultivada fue: Valentina. La densidad de plantación fue de 0,5 planta/m². El cultivo se implantó el 14 de febrero y se arrancó el 13 de mayo.

Col china, ocupó una superficie de 2500 m², se cultivó en 1 explotación. La variedad cultivada fue: Kasumi. La densidad de plantación fue de 8 planta/m². El cultivo se implantó el 10 de febrero y se arrancó el 29 de marzo.

Campaña 94/95.-

Melón, ocupó una superficie de 110373 m², se cultivó en 14 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Clipper, Galia, Categoría, Supporter, Geamar, Melina y Har Noran. La densidad de plantación osciló entre 0,5 y 1 planta/m², excepto en un caso en que fue de 2 planta/m². El ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 14 de diciembre y el 10 de abril; y como período de arranque entre el 3 de mayo y el 15 de julio.

Pepino largo, ocupó una superficie de 109073 m², se cultivó en 11 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Volcán, Brunex, Virginia, Alaska, Corona, Raider y Kansas. La densidad de plantación osciló entre 0,5 y 1,5 planta/m². El ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 3 de agosto y el 20 de noviembre; y como período de arranque entre el 15 de octubre y el 12 de mayo.

Pimiento, ocupó una superficie de 82100 m², se cultivó en 8 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Drago, Spartaco, Mazurca y Ray. La densidad de plantación fue de 2 planta/m², excepto en un caso en que fue de 1,7 planta/m². Cuando se cultivó en otoño, el ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 9 de junio y el 2 de septiembre; y como período de arranque entre el 14 de diciembre y el 28 de febrero. Cuando se cultivó como único cultivo en la campaña, la implantación se hizo entre el 24 de agosto y el 26 de agosto; y el arranque se realizó entre el 3 de mayo y el 26 de mayo.

Berenjena, ocupó una superficie de 72860 m², se cultivó en 7 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Madonna, Marina y Diva. La densidad de plantación osciló entre 0,5 y 1,5 planta/m². Cuando se cultivó en otoño, el ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 22 de agosto y el 13 de septiembre; y como período de arranque

entre el 1 de marzo y el 30 de abril. Cuando se cultivó como único cultivo en la campaña, la implantación se hizo entre el 1 de agosto y el 20 de septiembre; y el arranque se realizó entre el 22 de mayo y el 26 de junio.

Judía de enrame, ocupó una superficie de 61690 m², se cultivó en 4 explotaciones. La variedad cultivada fue Helda. La densidad de plantación fue de 1 planta/m². Cuando se cultivó en otoño, el ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 28 de julio y el 28 de noviembre; y como período de arranque entre el 23 de octubre y el 30 de marzo. Cuando se cultivó en primavera, el ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 7 de diciembre y el 31 de marzo; y como período de arranque entre el 4 de mayo y el 9 de julio.

Sandía injertada en calabaza, ocupó una superficie de 40500 m², se cultivó en 3 explotaciones. La variedad cultivada fue Dulce Maravilla. La densidad de plantación osciló entre 0,25 y 0,5 planta/m². El ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 5 de diciembre y el 6 de marzo; y como período de arranque entre el 10 de junio y el 26 de junio.

Sandía injertada en calabaza asociada a sandía sin semillas, ocupó una superficie de 34400 m², se cultivó en 5 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: de sandía injertada Dulce Maravilla; y de sandía sin semillas Reina de Corazones. La densidad de plantación fue de 0,25 planta/m², excepto en un caso que fue de 0,33 planta/m². El ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 31 de enero y el 31 de marzo; y como período de arranque entre el 23 de mayo y el 10 de julio.

Tomate, ocupó una superficie de 30300 m², se cultivó en 2 explotaciones. Las variedades cultivadas fueron: Atlético y FA 115. La densidad de plantación fue de 1 planta/m². Cuando se cultivó en primavera, el cultivo se implantó el 16 de enero y se arrancó el 6 de julio. Cuando se cultivó como único cultivo en la campaña, la implantación se realizó el 30 de agosto y el arranque se hizo el 5 de julio.

Sandía sin semillas y sin injertar, ocupó una superficie de 21000 m², se cultivó en 1 explotación. La variedad cultivada fue Reina de Corazones. La densidad de plantación fue de 0,25 planta/m². El cultivo se implantó el 24 de abril y se arrancó el 2 de agosto.

Col china, ocupó una superficie de 13800 m², se cultivó en 3 explotaciones. La variedad cultivada fue: Kasumi. La densidad de plantación fue de 8 planta/m² en dos casos, y de 10 planta/m² en el otro. El ciclo de cultivo tuvo como período de implantación entre el 24 de noviembre y el 3 de febrero; y como período de arranque entre el 3 de febrero y el 4 de abril.

Sandía con semillas y sin injertar, ocupó una superficie de 4160 m², se cultivó en 1 explotación. La variedad cultivada fue: Valentina. La densidad de plantación fue de 0,5 planta/m². El cultivo se implantó el 5 de mayo y se arrancó el 1 de agosto.

En todas las explotaciones en seguimiento hay contador volumétrico para cuantificar los volúmenes de agua aportados.

Se han hecho visitas periódicas, con una frecuencia de una a dos mensuales, para controlar los contadores y hacer la toma de datos: especies cultivadas, variedades, superficies ocupadas, ciclos, producciones, etc. En aquellas explotaciones en que ha habido varios cultivos dependientes de un solo contador volumétrico, los agricultores han anotado los volúmenes de agua aportados en cada riego a cada uno de los cultivos.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS POR CAMPAÑAS Y SISTEMAS DE CULTIVO

Agua empleada en las distintas campañas

Cuadro 1: Gasto de agua en m³/ha por campaña y sistema de cultivo.

CAMPAÑA	GASTO DE AGUA (m ³ /ha)	
	SUELO	SUSTRATO
93/94	4768	6163
94/95	5754	6833

Producciones medias

Cuadro 2: Producciones en kg/m² por campaña y sistema de cultivo.

CAMPAÑA	PRODUCCIONES (kg/m ²)	
	SUELO	SUSTRATO
93/94	10	18
94/95	13	19

Productividad del agua

Cuadro 3: Productividad en kg/m³ por campaña y sistema de cultivo.

CAMPAÑA	PRODUCTIVIDAD (kg/m ³)	
	SUELO	SUSTRATO
93/94	21	29
94/95	23	28

ANÁLISIS DE LOS CULTIVOS REALIZADOS EN EL CICLO DE OTOÑO

Agua empleada en las distintas campañas

Cuadro 4: Gasto de agua en m³/ha de los cultivos de otoño.

CULTIVO	GASTO DE AGUA (m ³ /ha)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
CALABACÍN	969			
JUDÍA	2045	1568	1939	1645
PEPINO	3456	2291	2834	3430
BERENJENA	3269		4818	
PIMIENTO	3752		3678	
TOMATE		4044		

Producciones medias

Cuadro 5: Producciones en kg/m² de los cultivos de otoño.

CULTIVO	PRODUCCIONES (kg/m ²)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
CALABACÍN	4			
JUDÍA	3	3	3	3
PEPINO	8	12	9	12
BERENJENA	7		11	
PIMIENTO	6		6	
TOMATE		11		

Productividad del agua

Cuadro 6: Productividad en kg/m³ de los cultivos de otoño.

CULTIVO	PRODUCTIVIDAD (kg/m ³)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
CALABACÍN	41			
JUDÍA	15	19	15	18
PEPINO	23	52	32	35
BERENJENA	21		23	
PIMIENTO	16		16	
TOMATE		27		

ANÁLISIS DE LOS CULTIVOS REALIZADOS EN EL CICLO DE PRIMAVERA

Agua empleada en las distintas campañas

Cuadro 7: Gasto de agua en m³/ha de los cultivos de primavera.

CULTIVO	GASTO DE AGUA (m ³ /ha)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
MELÓN	1794	2054	1737	2543
SANDÍA	1827		2564	
JUDÍA	2277	2049	2134	1271
COL CHINA	2388		3129	
TOMATE		6257		8653

Producciones medias**Cuadro 8:** Producciones en kg/m² de los cultivos de primavera.

CULTIVO	PRODUCCIONES (kg/m ²)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
MELÓN	4	4	4	5
SANDÍA	7		6	
JUDÍA	4	4	5	3
COL CHINA	10		9	
TOMATE		18		19

Productividad del agua**Cuadro 9:** Productividad en kg/m³ de los cultivos de primavera.

CULTIVO	PRODUCTIVIDAD (kg/m ³)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
MELÓN	22	19	23	20
SANDÍA	38		23	
JUDÍA	18	20	23	24
COL CHINA	42		29	
TOMATE		29		22

ANÁLISIS DE LOS CULTIVOS CUYO CICLO OCUPA TODA LA CAMPAÑA

Agua empleada en las distintas campañas

Cuadro 10: Gasto de agua en m³/ha de los cultivos cuyo ciclo ocupa toda la campaña.

CULTIVO	GASTO DE AGUA (m ³ /ha)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
TOMATE	4350			7238
PIMIENTO	3946		4137	
BERENJENA	7397		6368	

Producciones medias

Cuadro 11: Producciones en kg/m² de los cultivos cuyo ciclo ocupa toda la campaña.

CULTIVO	PRODUCCIONES (kg/m ²)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
TOMATE	15			21
PIMIENTO	6		5	
BERENJENA	9		15	

Productividad del agua

Cuadro 12: Productividad en kg/m³ de los cultivos cuyo ciclo ocupa toda la campaña.

CULTIVO	PRODUCTIVIDAD (kg/m ³)			
	CAMPAÑA 93/94		CAMPAÑA 94/95	
	SUELO	SUSTRATO	SUELO	SUSTRATO
TOMATE	34			29
PIMIENTO	15		12	
BERENJENA	12		24	

4.- CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que hay diferencias en los ciclos de cultivo seguidos, en las especies cultivadas y en los medios de cultivo (tipos de invernaderos y manejos); con la información tomada estas dos campañas, podemos concluir que el gasto medio de agua por hectárea, cuando se cultiva en suelo, es inferior a los 6000 m³/ha, observándose una tendencia a subir, y cuando se cultiva en sustratos oscila entre 6000 y 7000 m³/ha.

La productividad del agua en términos monetarios, obtenida valorando las cosechas con los precios alcanzados en la comercialización de las producciones, osciló la campaña 93/94 entre 314 y 3666 ptas/m³ para la mayoría de las explotaciones, llegándose en un caso a 6721 ptas/m³. La campaña 94/95 osciló entre 348 y 4128 ptas/m³, llegándose excepcionalmente a 6351 ptas/m³ en una explotación.

5.- BIBLIOGRAFÍA

CARREÑO, J. 1995. La utilización del agua en el invernadero parral de Almería. I Simposium Iberoamericano sobre "Aplicación de los Plásticos en las Tecnologías Agrarias". Actas: 245-253. Organizado por Comité Español de Plásticos en Agricultura (CEPLA), y Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería (FIAPA).

CARREÑO, J. y C. PÉREZ MARTÍNEZ. 1995. El agua de riego en el Campo de Níjar: gasto y rendimiento. II Jornadas Técnicas Agrícolas. Níjar, 11, 12 y 13 de Diciembre de 1995. Organizan: Concejalía de Agricultura del Ayuntamiento de Níjar. Consejo Asesor de Agricultura.

LÓPEZ-GÁLVEZ, J. y J. MOLINA HERRERA. 1993. Impacto del déficit de agua en la economía almeriense. I Jornadas de análisis del impacto del agua en la agricultura andaluza. Comunicaciones. Parte 1. Comunicación 5. Organizado por Asociación Agraria Jóvenes Agricultores (A.S.A.J.A. de Sevilla).

NAREDO, J. M.; J. LÓPEZ-GÁLVEZ y J. MOLINA. 1993. La gestión del agua para regadío. El caso de Almería. El Boletín. M.A.P.A. 9:15-22.

NAREDO, J. M.; J. LÓPEZ-GÁLVEZ. 1994. Información técnica y gestión económica del uso del agua en los regadíos españoles. Revista de Estudios Agrosociales. 167:185-207.

6.- AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los agricultores su colaboración.

PRODUCTIVIDAD DEL AGUA DE RIEGO EN CULTIVOS PROTEGIDOS DE PIMIENTO EN ALMERÍA.

Pérez Martínez, C. (P) y Carreño Sánchez, J. (*)¹

RESUMEN

Se exponen en este trabajo los datos del seguimiento realizado para conocer los gastos de agua y las cosechas obtenidas, durante las campañas 93/94 y 94/95, en explotaciones que han cultivado pimientos. Todas tienen en común, además del cultivo de pimiento y de estar situadas en el Poniente de Almería, contar con invernaderos con cerramiento de plástico, con suelos enarenados y sistemas de riego por goteo. La primera campaña se controlaron 12 explotaciones y la siguiente 6.

El gasto medio de agua se ha calculado para los diferentes tipos de pimientos, siendo la media del cultivo de 3711 m³/ha, la primera campaña, y de 3831 m³/ha en la segunda.

La producción media por campaña ha sido de 6 kg/m², las dos campañas.

La productividad del agua se ha analizado, desde el punto de vista físico y monetario. La media del cultivo, en el primer caso ha sido de 16 kg de cosecha producida por m³ de agua empleada en el riego, y en el segundo caso de 1568 ptas generadas por m³ de agua.

La información se expone de forma que pueda conocerse lo que ha pasado en cada una de las explotaciones.

1.- INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS.

La escasez de recursos hídricos existente en Almería, unida a la expansión del cultivo en invernaderos que se está produciendo, hacen necesario racionalizar al máximo el uso del agua disponible. Siendo importante conocer con cuanta agua se cuenta y como se está empleando.

Recientemente, se han producido trabajos donde se analizan los usos dados al recurso agua a nivel de la provincia de Almería (LÓPEZ-GÁLVEZ et al., 1993; NAREDO et al., 1993), y a nivel de las explotaciones con cultivos hortícolas en invernaderos (CARREÑO, 1995; CARREÑO Y PÉREZ MARTÍNEZ, 1995; NAREDO et al., 1994).

A veces se cae en el error de asociar la agricultura intensiva de Almería a un uso también intensivo del agua necesaria para la producción, creyendo que hacen falta grandes cantidades de agua por unidad de superficie. Pero el control que se hace del medio de cultivo, a nivel ambiental con la implantación del invernadero y a nivel del suelo con el enarenado, limitan las pérdidas de agua, resultando que los volúmenes aportados por unidad

¹ (P) Becaria F.I.A.P.A. Estación Experimental de la Caja Rural de Almería. Apdo. 250. 04080 Almería.

(*) Estación Experimental de la Caja Rural de Almería. Apdo. 250. 04080 Almería.

de superficie son menores que en otros sistemas de cultivo (STANGHELLINI, 1994).

Para conocer el uso del agua en las explotaciones comerciales, con invernaderos con cerramiento de plástico, que se va modificando con el paso del tiempo, se está haciendo un seguimiento en este tipo de explotaciones, todas situadas en el litoral de las provincias de Almería y Murcia. Exponemos en este trabajo resultados de las dos primeras campañas, 93/94 y 94/95. Nos centramos en analizar el cultivo de pimiento: gasto de agua, cosechas que se obtienen y productividad del agua, en términos físicos y monetarios. Los datos se han tomado en explotaciones situadas en distintos parajes del Poniente de Almería, haciéndose el seguimiento de doce explotaciones, la primera campaña, y seis, la segunda.

Se ha elegido el cultivo de pimiento por ser el más importante en cuanto a superficie ocupada dentro del grupo de cultivos realizados en los invernaderos de Almería. Así en la campaña 94/95 ocupó 7090 ha en la provincia, seguido del cultivo de tomate con 5795 ha (JUNTA DE ANDALUCÍA, Memoria resumen año 1995).

2.- MATERIALES Y MÉTODOS.

Los parajes y términos municipales en los que se encuentran las explotaciones comerciales estudiadas se relacionan en el cuadro 1. Asimismo en este cuadro se dan las principales características de las explotaciones: superficies totales de cultivo, en que años se pusieron en regadío, en que años se implantó el suelo enarenado, (elemento común en todas las explotaciones), y por último las características de los invernaderos: formas de las cubiertas, alturas de las bandas y de las cumbreras en invernaderos no planos (a dos aguas multicapillas, también llamados 'raspas y amagados', y asimétricos), altura de los invernaderos planos, materiales que componen las estructuras y hacen la sujeción de los dos tejidos de alambre que fijan el plástico, en que años se construyeron y localizaciones de las aperturas para la ventilación.

En todas las explotaciones en seguimiento, se ha empleado para regar el sistema de riego por goteo. En el cuadro 2 se da información referida al riego: superficies en riego, distribución de los puntos de riego o goteros (que en todos los casos ha sido de 1 x 0,5 m), caudales de los goteros, coeficientes de uniformidad de las instalaciones (valores y fechas de medida), suministradores del agua y calidad de la misma.

La información sobre el cultivo de pimiento está en los cuadros 3 y 4: tipos y variedades de pimientos cultivados, superficies ocupadas por el cultivo en cada explotación, ciclos de cultivo realizados (fechas de plantación y fechas de arranque), densidades de plantación y lugares donde se comercializaron las cosechas. En el cuadro 3 está la información de la campaña 93/94 y en el cuadro 4 la de la campaña 94/95.

Los volúmenes de agua aportados se han medido en todas las explotaciones en seguimiento con contadores volumétricos.

Todas las explotaciones se han visitado periódicamente, una o dos veces al mes, para controlar los contadores y hacer la toma de los datos enumerados anteriormente.

Toda la información referida a una explotación en concreto se puede revisar y analizar, ya que se ha identificado cada una de ellas con un único número que aparece en todos los cuadros en la columna 'Finca n°', excepto en los cuadros 6 y 7, donde se resumen los resultados por tipos de pimiento y por campañas, respectivamente.

Cuadro 1: Localización y características de las explotaciones en seguimiento.

FINCA N°	LOCALIZACIÓN		SUPERF. TOTAL (m ²)	AÑO PUESTA EN REGADÍO	SUELO ENARENADO	INVERNADERO ¹				
	T. MUNICIPAL	PARAJE				AÑO DE IMPLANTACIÓN	CUBIERTA	ALT. (m)	ESTRUCTURA	AÑO
1	LA MOJONERA	CTJO. IBORRA	2500	1975	1975	PLANA	2,2	MADERA	1975	LATERAL
2	EL EJIDO	HAZA LA RITA	20000	1981	1985	PLANA	2,2	MADERA	1985	LATERAL
3	LA MOJONERA	SOLERA	4160	1947	1989	PLANA	2,6	MADERA CON RUEDO DE HIERRO	1989	LATERAL
4	LA MOJONERA	SOLANTILLO	8000	1954	1991	A DOS AGUAS MULTICAPILLAS	b:2,5 c:4,0	TUBO GALVANIZADO	1991	LATERAL CENTRAL
5	EL EJIDO	LOS MIGUELETES	8600	1986	1993	ASIMÉTRICA	b:2,5 c:4,0	MADERA	1993	LATERAL
			1400	1986	1986	PLANA	2,6	MADERA	1986	LATERAL
6	EL EJIDO	POZO LUQUE	9000	1968	1990	ASIMÉTRICA	b:2,5 c:3,7	MADERA	1990	LATERAL CENTRAL
7	EL EJIDO	GUARDIAS VIEJAS	8000	1982	1992	ASIMÉTRICA	b:2,5 c:3,7	TUBO GALVANIZADO	1992	LATERAL
8	EL EJIDO	EL TORIL-BAUSA VARELA	16000	1988	1988	A DOS AGUAS MULTICAPILLAS	b:2,0 c:3,0	MADERA	1988	LATERAL
9	EL EJIDO	LA ÑECA	9470	1953	1983	A DOS AGUAS MULTICAPILLAS	b:2,0 c:2,8	MADERA	1983	LATERAL
10	EL EJIDO	RAMBLA LAS PALOMAS	5300	1960	1991	A DOS AGUAS MULTICAPILLAS	b:2,0 c:3,5	MADERA	1991	LATERAL
11	ADRA	ALBUFERA	2500	1970	1975	PLANA	2,5	MADERA	1975	LATERAL
12	EL EJIDO	LAS PALMERILLAS	9000	1991	1991	A DOS AGUAS MULTICAPILLAS	b:2,2 c:3,0	MADERA CON RUEDO DE HIERRO	1991	LATERAL
13	EL EJIDO	LOS HORNILLOS	5173	1976	1976	PLANA	2,9	MADERA	1976	LATERAL

- (1) En todas las explotaciones el cerramiento de los invernaderos se ha hecho con polietileno de tres campañas.
- (2) En esta explotación, en la campaña 93/94 se hizo el seguimiento de 8600 m² de invernadero, y en la campaña 94/95 se controlaron 1400 m² más, con las características descritas.
- (3) En esta explotación el seguimiento se inició en la campaña 94/95.

Cuadro 2: Características de los sistemas de riego por goteo de las explotaciones, suministradores del agua y calidad de la misma.

FINCA N°	SISTEMA DE RIEGO: GOTEO					AGUA	
	SUPERFICIE RIEGO (m ²)	PTOS. DE RIEGO (m)	CAUDAL GOTEROS (l/h)	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD		SUMINISTRO	C.E. (ds/m)
				VALOR (%)	FECHA		
1	2500	1 x 0,5	3	83	9-8-95	C.R. SOL Y ARENA	1,1
2	20000	1 x 0,5	3	52	11-7-95	C.R. SOL Y ARENA	1,5
3	4160	1 x 0,5	3	-	-	C.R. SOL Y ARENA	1,7
4	8000	1 x 0,5	3	-	-	C.R. SOL Y ARENA	1,7
5 ²	8600	1 x 0,5	2	-	-	C.R. SOL PONIENTE	0,9
	1400	1 x 0,5	2	-	-	C.R. SOL PONIENTE	0,9
6	9000	1 x 0,5	2	-	-	C.R. SOL PONIENTE	0,9
7 ³	8000	1 x 0,5	3	-	-	C.R. SOL PONIENTE	0,9
8	16000	1 x 0,5	2	98	28-6-95	C.R. SOL PONIENTE	0,9
9	9470	1 x 0,5	2	-	-	POZO CUATRO VIENTOS	0,5
10	5300	1 x 0,5	3	-	-	C.R. SAN MARTÍN	0,5
11	2500	1 x 0,5	3	-	-	C.R. PLAYA BALANEGRA	0,7
12	9000	1 x 0,5	3	72	21-6-95	POZO LAS PALMERILLAS	0,36
13	5173	1 x 0,5	3	-	-	POZO RAMÓN GARCÍA	0,8

Cuadro 3: Cultivos de pimiento. Campaña 93/94.

FINCA N°	TIPO ¹	VARIEDAD	SUP. (m ²)	CICLO DE CULTIVO		DENS. (pl/m ²)	L. COMERCIAL.
				F. IMPLANT.	F. ARRANQUE		
1	LAM. AMARILLO	MARIBEL	2500	22-8-1993	18-5-1994	2	ALHÓNDIGA
2	LAM. ROJO	DRAGO	20000	23-9-1993	10-4-1994	2	ALHÓNDIGA
3	LAM. ROJO	DRAGO	4160	14-9-1993	18-4-1994	2	ALHÓNDIGA
4	LAM. ROJO	ATOL	8000	23-8-1993	23-3-1994	2	ALHÓNDIGA
5	LAM. ROJO	DRAGO	8600	27-8-1993	18-4-1994	2	COOPERATIVA
6	CALIF. AMARILLO CALIF. ROJO	OROBELLE	4500	9-7-1993	23-11-1993	2	COOPERATIVA COOPERATIVA
		SPARTACO	4500	25-7-1993	25-11-1993	2	
8	CALIF. ROJO	MARVELLO	16000	11-7-1993	18-1-1994	2	COOPERATIVA/ ALHÓNDIGA
9	LAM. ROJO	ROLDÁN	9470	18-8-1993	15-6-1994	2	COOPERATIVA
10	LAM. AMARILLO	MARIBEL	5300	20-7-1993	8-3-1994	2	COOPERATIVA
11	CALIF. NARANJA	SALSA	2500	23-6-1993	15-1-1994	2	COOPERATIVA
12	CALIF. ROJO	MAZURCA	9000	15-6-1993	29-12-1993	2	ALHÓNDIGA
13	LAM. ROJO	DRAGO	5173	10-9-1993	30-4-1994	2	COOPERATIVA

- (1) LAM.: Lamuyo, también denominado largo o tipo rectangular.
 CALIF.: California, también llamado corto o tipo cuadrado.

Cuadro 4: Cultivos de pimiento. Campaña 94/95

FINCA N°	TIPO ¹	VARIEDAD	SUP. (m ²)	CICLO DE CULTIVO		DENS. (pl/m ²)	L. COMERCIAL.
				F. IMPLANT.	F. ARRANQUE		
1	LAM. ROJO	DRAGO	2500	24-8-1994	26-5-1995	2	ALHÓNDIGA
2	CALIF. ROJO	MAZURCA	20000	9-6-1994	4-1-1995	2	ALHÓNDIGA
5	LAM. ROJO	DRAGO	10000	26-8-1994	3-5-1995	2	COOPERATIVA
7	LAM. ROJO	DRAGO	8000	2-9-1994	28-2-1995	1,7	COOPERATIVA
8	CALIF. ROJO	MAZURCA	16000	28-6-1994	20-1-1995	2	COOPERATIVA/ ALHÓNDIGA
12	CALIF. ROJO	RAY	9000	4-7-1994	1-2-1995	2	ALHÓNDIGA

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 5 se recogen para cada una de las campañas, los resultados por explotación y tipo de pimiento de: gasto de agua, producción y productividad del agua, (expresada en kg de cosecha producidos por m³ de agua empleada en el riego, y en ptas generadas por m³ de agua). Todos estos datos resumidos para cada uno de los tipos de pimiento se encuentran en el cuadro 6. Los datos medios del cultivo de pimiento, por campaña, aparecen en el cuadro 7.

Cuadro 5: Gasto de agua, producción y productividad.

FINCA N°	TIPO		GASTO DE AGUA (m ³ /ha)		PRODUCCIÓN (kg/ha)		PRODUCTIVIDAD			
							kg/m ²		ptas/m ²	
	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95		
1	LAM. AMARILLO	LAM. ROJO	4508,0	3940,0	59100	43400	13,11	11,01	1088	914
2	LAM. ROJO	CALIF. ROJO	1906,5	3183,0	44000	47500	23,08	14,92	2262	1462
3	LAM. ROJO		4865,4		93100		19,13		1875	
4	LAM. ROJO		4543,8		54400		11,97		1173	
5	LAM. ROJO	LAM. ROJO	3418,6	4333,0	56900	62000	16,64	14,31	1631	1402
6	CALIF. AMARILLO		3044,4		53300		17,51		1716	
	CALIF. ROJO		2855,6		54900		19,22		1884	
7		LAM. ROJO		3302,5		68000		20,59		2018
8	CALIF. ROJO	CALIF. ROJO	2645,6	4374,4	44900	63700	16,97	14,56	1663	1427
9	LAM. ROJO		3910,2		54900		14,04		1376	
10	LAM. AMARILLO		3264,2		58300		17,86		1750	
11	CALIF. NARANJA		4880,0		65400		13,40		1313	
12	CALIF. ROJO	CALIF. ROJO	5167,8	3852,2	70500	66600	13,64	17,29	1296	1643
13	LAM. ROJO		3230,2		45900		14,21		1393	

Cuadro 6: Resumen por tipos de pimienta de: gasto de agua, producción y productividad.

TIPO	GASTO DE AGUA (m ³ /ha)		PRODUCCIÓN (kg/ha)		PRODUCTIVIDAD			
					kg/m ²		ptas/m ²	
	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95	93/94	94/95
LAMUYO AMARILLO	3886,1		58700		15,11		1419	
LAMUYO ROJO	3645,8	3858,5	58200	57800	15,96	14,98	1618	1445
CALIFORNIA AMARILLO	3044,4		53300		17,51		1716	
CALIFORNIA ROJO	3556,3	3803,2	56800	59300	15,97	15,59	1614	1511
CALIFORNIA NARANJA	4880,0		65400		13,4		1313	

Cuadro 7: Datos medios por campaña de: gasto de agua, producción y productividad.

CAMPAÑA	PIMIENTO		
	GASTO DE AGUA (m ³ /ha)	PRODUCCIÓN (kg/m ²)	PRODUCTIVIDAD (kg/m ³)
93/94	3711	6	16
94/95	3831	6	16

4.- CONCLUSIONES

El gasto medio de agua del cultivo de pimiento ha sido de 3711 m³/ha, la campaña 93/94, y de 3831 m³/ha, la 94/95. Aunque los gastos de agua por explotación se mueven entre un mínimo de 1906,5 m³/ha y un máximo de 5167,8 m³/ha, debido a que se hacen diferentes ciclos de cultivo, hay varios tipos de pimientos, los invernaderos son distintos, así como los manejos del riego.

La producción media del cultivo de pimiento ha sido de 6 kg/m², en ambas campañas, con máximos de unos 9 kg/m² y mínimos de unos 4 kg/m².

La productividad media del agua en términos físicos ha sido de 16 kg/m³, las dos campañas, con un mínimo de 11 kg/m³ y un máximo de 23 kg/m³. En términos monetarios ha sido de 1568 ptas/m³, con un mínimo de 914 ptas/m³ y un máximo de 2262 ptas/m³.

5.- BIBLIOGRAFÍA

CARREÑO, J. 1995. La utilización del agua en el invernadero parral de Almería. I Simposium Iberoamericano sobre "Aplicación de los Plásticos en las Tecnologías Agrarias". Actas: 245-253. Organizado por Comité Español de Plásticos en Agricultura (CEPLA), y Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería (FIAPA).

CARREÑO, J. y C. PÉREZ MARTÍNEZ. 1995. El agua de riego en el Campo de Níjar: gasto y rendimiento. II Jornadas Técnicas Agrícolas. Níjar, 11, 12 y 13 de Diciembre de 1995. Organizan: Concejalía de Agricultura del Ayuntamiento de Níjar. Consejo Asesor de Agricultura.

JUNTA DE ANDALUCÍA. CONSEJERÍA DE AGRICULTURA Y PESCA. DELEGACIÓN PROVINCIAL DE ALMERÍA. Memoria resumen año 1995.

LÓPEZ-GÁLVEZ, J. y J. MOLINA HERRERA. 1993. Impacto del déficit de agua en la economía almeriense. I Jornadas de análisis del impacto del agua en la agricultura andaluza. Comunicaciones. Parte 1. Comunicación 5. Organizado por Asociación Agraria Jóvenes Agricultores (A.S.A.J.A. de Sevilla).

NAREDO, J. M.; J. LÓPEZ-GÁLVEZ y J. MOLINA. 1993. La gestión del agua para regadío. El caso de Almería. El Boletín. M.A.P.A. 9:15-22.

NAREDO, J. M.; J. LÓPEZ-GÁLVEZ. 1994. Información técnica y gestión económica del uso del agua en los regadíos españoles. *Revista de Estudios Agrosociales*. 167:185-207.

STANGHELLINI, C. 1994. Balance hídrico y manejo de microclima en invernadero. *Tecnología de invernaderos*. Curso superior de especialización. Pag. 49-62.

6.- AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los agricultores su colaboración.

VARIACION DE LAS PROPIEDADES FISICAS DE UN SUELO FRANCO ARENOSO CON LA APLICACION DE COMPOST DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS

Aguilar F.J.¹, de Haro J. M.² (P), Giráldez J. V.³, González P.²

(1) Universidad de Almería. Dto. de Ingeniería Rural, (2) Centro de Investigación y Desarrollo Agrario de Córdoba. Dto. de Suelos y Riegos, (3) Universidad de Córdoba. Dto. de Agronomía.

Resumen

Se estudió el efecto de la aplicación de compost de residuos sólidos urbanos sobre las propiedades físicas de un suelo franco arenoso clasificado como Xerofluvent típico. Se estimó la curva característica de retención de agua, la conductividad hidráulica y la distribución del tamaño de poros. Previamente se eliminó el efecto de disminución de densidad aparente (efecto de dilución) que se produce en los ensayos de campo.

Summary

Effects of municipal solid waste compost application on physical properties of a sandy loam soil classified as Typic Xerofluvent were studied. Water holding characteristic curve, hydraulic conductivity and pore size distribution were estimated. The effect of bulk density reduction (dilution effect), observed in field trials, was eliminated previously.

INTRODUCCION

Aplicaciones repetidas de compost de residuos sólidos urbanos (RSU) en suelos agrícolas tiene efectos significativos en las propiedades del suelo, similares a las causadas por compost de lodos de depuradora o de estiércoles (Khaleel y col., 1981). Estos efectos pueden ser clasificados en tres categorías: efectos en las propiedades químicas, biológicas y físicas.

Aunque se suelen olvidar los aspectos físicos, la mejora de estas características en el suelo es de suma importancia en las condiciones de cultivo de la España Mediterránea. En esta zona los inapropiados sistemas de manejo y el clima conducen a un deterioro de la estructura del suelo y a un aumento preocupante de los fenómenos erosivos.

Los cambios en las propiedades físicas del suelo debido a la aplicación de materiales orgánicos se manifiestan en una disminución de la densidad aparente, correlacionada con el incremento de carbono oxidable (Khaleel y col., 1981), y un aumento de la estabilidad de los agregados (Tisdall y Oades, 1982). Estos cambios implican un incremento de la capacidad de retención de agua (Hernando y col., 1989) y de la conductividad hidráulica saturada (De Haro y col., 1995).

El objetivo de este artículo es el estudio del efecto de la aplicación de compost de RSU sobre propiedades físicas del suelo como la capacidad de retención de agua y la distribución del tamaño de poros, eliminando previamente el efecto de disminución de la densidad aparente

(efecto de dilución) que se produce en los ensayos de campo.

MATERIALES Y METODOS

El suelo empleado en el ensayo procede del horizonte superficial de una parcela de olivar situada en la Alameda del Obispo, perteneciente al C.I.D.A. de Córdoba. Se trata de un Xerofluvent típico, con textura franco arenosa y bajo contenido en materia orgánica.

Las muestras de suelo se tamizaron con una malla de 2 mm y se mezclaron homogéneamente con distintas proporciones de compost de RSU tamizado también a 2 mm. De esta forma se obtuvieron los cinco tratamientos ensayados: 0% (testigo), 2%, 4%, 8% y 100% de compost expresado como porcentaje en peso sobre materia seca. Los tres tratamientos intermedios equivalen a aplicaciones en campo de 46, 92 y 184 t.ha⁻¹ (distribuidas en los primeros 15 cm de suelo).

Las características del suelo, compost y el análisis de materia orgánica oxidable de las muestras utilizadas en los ensayos se observan en la tabla I.

Suelo < 2 mm		
arcilla 14.42 %	arena 52.94 %	m. orgánica 0.90 %
pH 8.61	CO ₃ Ca 20 %	C.I.C 105 mequ/100g
Compost < 2mm		
pH 7.50	m orgánica 55.40 %	
CO ₃ Ca 10.15	m orgánica 57%	
Materia orgánica oxidable		
testigo 0%		0.90%
compost 2%		1.52%
compost 4%		2.25%
compost 8%		3.35%
compost 100%		55.40%

Tabla I. Características de las muestras empleadas.

Se realizaron cuatro repeticiones por tratamiento en cilindros de 4.8 cm de diámetro y 2 cm de altura, con una densidad aparente de 1.38 gr.cm⁻³, excepto en compost 100%, donde la densidad fue de 0.57 gr.cm⁻³.

Previa saturación de las muestras se obtuvieron los distintos puntos de la curva de retención (curva de desecación) de agua mediante el empleo de la placa de Richards. Para aumentar la sensibilidad del aparato en la lectura a tensiones pequeñas se utilizó un

piezómetro conectado al interior de la placa (figura 1). Las presiones utilizadas fueron 10, 30, 80, 306, 1020 y 3061 cm.

Las curvas características de contracción (Bronswijk y Evers-Veermer, 1990) se determinaron para conocer la variación de volumen con la pérdida de humedad, y obtener la humedad volumétrica correspondiente a cada potencial matricial (datos no publicados).

Todas las determinaciones se realizaron de acuerdo con las recomendaciones de Klute (1986).

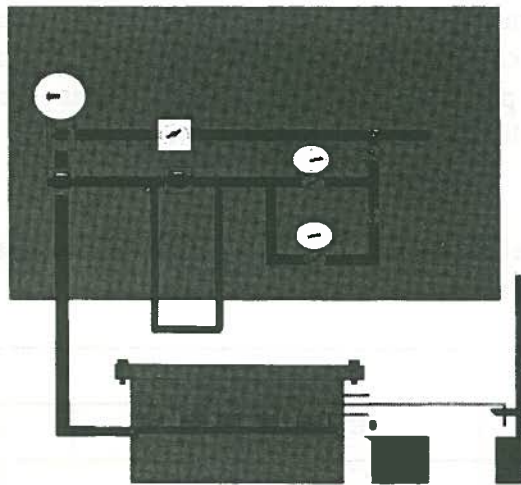


Fig. 1. Esquema de la placa de Richards con piezómetro empleada para la determinación de la curva de retención.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los datos experimentales de retención de agua para cada tratamiento se ajustaron a los modelos propuestos por Brooks y Corey (1964) y Van Genuchten (1980).

El modelo de Brooks y Corey describe la relación entre tensión matricial, h , y el contenido volumétrico de agua en el suelo, S_e , mediante la ecuación:

$$S_e = \left(\frac{h_b}{h} \right)^\lambda ; \text{ donde } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

donde S_e es el grado de saturación efectivo o contenido reducido de agua, h_b corresponde al valor de tensión de entrada de aire, λ es un parámetro relacionado con la distribución del tamaño de poros que afecta a la pendiente de la curva de retención, θ_r y θ_s son la humedad residual y la humedad de saturación respectivamente.

El modelo de Van Genuchten describe la relación anterior mediante la ecuación:

$$S_e = \frac{1}{\left(1 + (\alpha h)^n\right)^m}$$

donde n y m son constantes empíricas que afectan a la forma de la curva de retención y $\alpha = 1/h_b$.

Dentro del modelo de Van Genuchten m y n pueden considerarse independientes o una en función de la otra. Las relaciones entre m y n utilizadas para la determinación de la conductividad hidráulica subsaturada son $m=1-1/n$ y $m=1-2/n$, para los modelos de Mualem (1976) y Burdine (1953) respectivamente.

En la tabla II se presentan los coeficientes de determinación, r^2 , para cada modelo. Se observa como el modelo de Van Genuchten se adapta mejor a los datos experimentales que el de Brooks y Corey, confirmando los resultados de trabajos anteriores (De Haro y col., 1995) donde se ponía de manifiesto que este último modelo se adapta peor en los casos en donde los espacios porosos son irregulares. Este hecho se hace más evidente cuando se aplica al compost 100% (figura 2).

Modelo	r^2			
	testigo	2%	4%	8%
Van Genuchten m,n variables	0.9922	0.9838	.9678	0.9783
Van Genuchten m=1-1/n	0.9920	0.9819	0.9654	0.9781
Van Genuchten m=1-2/n	0.9922	0.9773	0.9605	0.9774
Brooks y Corey	0.9351	0.8055	0.7986	0.8687

Tabla II. Coeficientes de determinación para los distintos modelos ajustados.

En cuanto al modelo de Van Genuchten, las diferencias de ajuste cuando se consideran m y n variables o relacionadas son mínimas. Van Genuchten (1991) recomienda la utilización de m y n variables cuando se tienen una gran cantidad de datos experimentales, ya que el cálculo de $K(\theta)$ es más complejo, y debido a que la función Beta Completa es cero cuando $n=1$ por lo que no tiene solución para valores de $n < 1$ (teoría capilar de Mualem)

Fuentes y col. (1992) recomiendan obtener $h(\theta)$ empleando el modelo de Van Genuchten y la teoría capilar de Burdine ($m=1-2/n$). Para la obtención de la conductividad hidráulica subsaturada $K(q)$ consideran adecuada la ecuación dada por Brooks y Corey, ya que se satisfacen las condiciones de infiltración en todo tipo de suelos.

$$K(\theta) = K_s S_e^\eta \quad \text{si } h > h_b$$

$$K(\theta) = K_s \quad \text{si } h \leq h_b$$

donde $\eta = 3 + 2/l$ (teoría capilar de Burdine)

Siguiendo estas recomendaciones empleamos el modelo de Van Genuchten-Burdine para el cálculo de los parámetros de la curva de retención y la distribución del tamaño de poros. En la tabla III se observan los parámetros obtenidos a partir del ajuste del modelo a los datos experimentales. En las figuras 3 y 4 aparecen las curvas características para cada tratamiento en los tramos iniciales y hasta 15000 cm de agua.

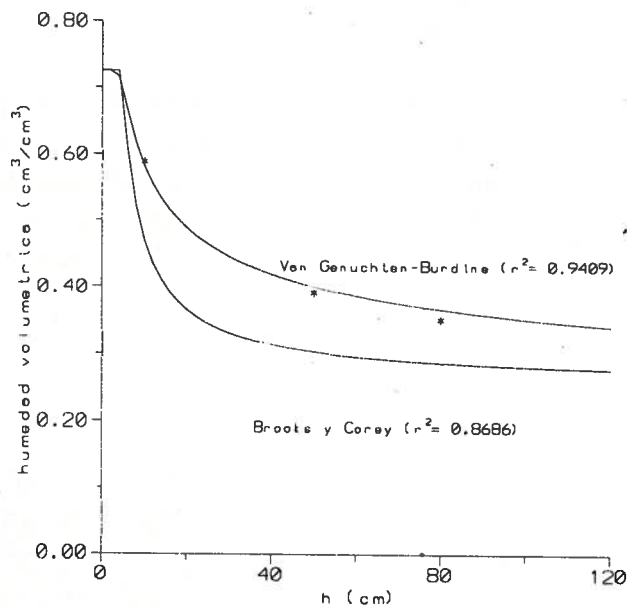


Fig. 2. Comparación del ajuste a los datos experimentales de los modelos de Van Genuchten-Burdine y Brooks y Corey.

Tratamiento	θ_r	θ_s	$\alpha \text{ cm}^{-1}$	n	CC ¹	PMP ²	Agua disponible ³ (l/m ³)
testigo	0.0169	0.437	0.045	2.356	0.175	0.058	117
compost 2%	0.0432	0.434	0.031	2.262	0.254	0.121	132
compost 4%	0.04229	0.483	0.038	2.238	0.281	0.140	141
compost 8%	0.0459	0.526	0.050	2.275	0.266	0.123	142
compost	0.2031	0.725	0.204	2.416	0.292	0.221	70

Tabla III. Parámetros de la curva característica de cada tratamiento. (1) Capacidad de Campo, CC, (humedad volumétrica a 1/3 de bar). (2) Punto de Marchitez Permanente, PMP, (Humedad volumétrica a 15 bares). (3) Agua disponible, (diferencia entre CC y PMP).

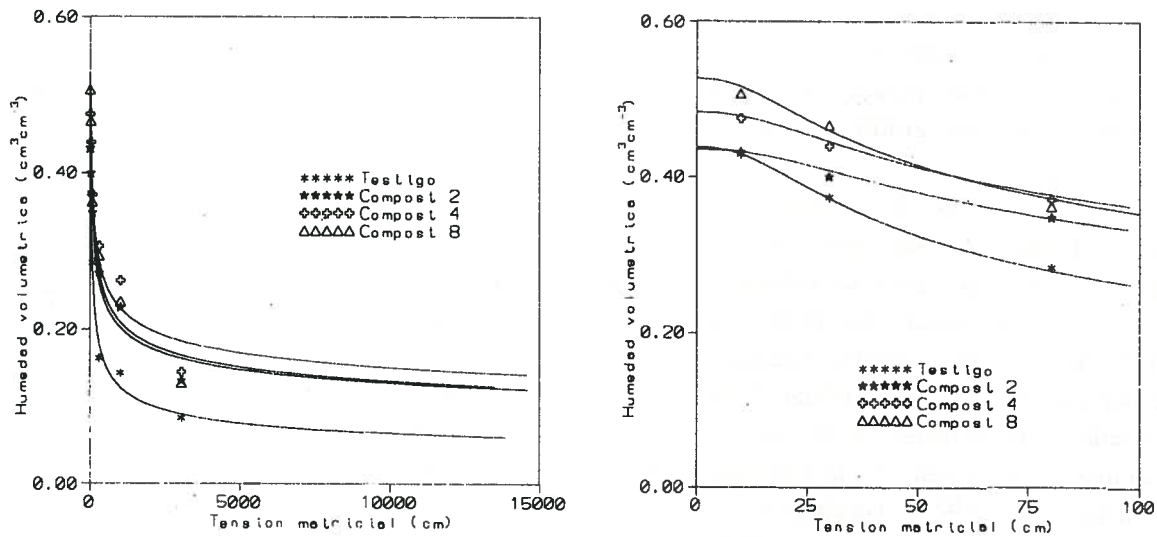


Fig. 3 y 4 Ajuste del modelo de Van Genuchten-Burdine a los distintos tratamientos.

Los resultados muestran la influencia del contenido de carbono oxidable en la forma de la curva característica. A potenciales altos (>100 cm, zona de saturación) la capacidad para retener agua depende fundamentalmente de fenómenos capilares, que se relacionan con la estructura, densidad aparente y porosidad. A pesar de igualar la variable densidad aparente en todos los tratamientos se observaron diferencias respecto al testigo en la humedad alcanzada a saturación sobre todo cuando las dosis de compost eran del 4 y 8 %, siendo insignificantes al 2%. Sin embargo rápidamente la curva correspondiente al testigo se separa del resto, evidenciando una cesión mas lenta del agua almacenada.

Cuando el suelo se seca, a potenciales menores de 1500 cm, las fuerzas de superficie (que intervienen en la adsorción) predominan en la retención de agua, dependiendo su intensidad, de la textura, mineralogía de la fracción de arcilla y del contenido en materia orgánica (Gupta y col., 1977). Es en esta zona donde el efecto de la aplicación de materia orgánica produce diferencias mas claras entre el testigo y el resto de tratamientos, elevando la capacidad de retención por sus propiedades coloidales y a la posibilidad de formar enlaces hidrogenados.

El incremento de la superficie específica, como veremos en el análisis de la distribución del tamaño de poros, debe contribuir a este aumento del agua almacenada.

De los datos obtenidos se deduce que la aplicación de compost produce un aumento gradual en el punto saturación a medida aumenta la dosis. Sin embargo cuando se comparan los efectos de los distintos tratamientos a potenciales altos no se observan apenas diferencias entre ellos, aunque sí respecto al testigo.

El agua disponible en el suelo para el cultivo, expresada como diferencia entre la retenida a capacidad de campo (-1/3 bar) y en el punto de marchitez permanente, se

incrementa a medida que lo hace la dosis de compost aplicada, aunque no de forma lineal. No obstante estos incrementos en el agua disponible para el cultivo pueden ser de suma importancia en el caso de cultivos de secano y en las condiciones climáticas de nuestra zona, teniendo en cuenta que con aplicaciones de unas 50 t/ha podríamos conseguir incrementos similares a los conseguidos con aportaciones superiores.

Para estimar la variación de la conductividad hidráulica frente al contenido de humedad con el modelo anterior era necesario obtener una estimación del valor de aquella a saturación. Esta se midió en laboratorio mediante un permeámetro de carga constante pero se obtuvieron unos resultados muy heterogéneos con altos coeficientes de variación para cada tratamiento. Autores como Cassel (1983), estiman que los coeficientes de variación en mediciones de la conductividad hidráulica (K_s), a menudo exceden el 100%, mientras que propiedades características del suelo como textura, contenido en materia orgánica y densidad aparente (relacionada con la porosidad) muestran coeficientes de variación inferiores al 30% (Courtin y col., 1983). Basándose en estas consideraciones se obtuvo K_s mediante el modelo propuesto por Rawls y Baumer (1989) a partir de características del suelo como contenido en arena y arcilla, densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico y contenido en materia orgánica.

Los resultados obtenidos se emplearon para la obtención de la conductividad hidráulica subsaturada según la expresión de Brooks y Corey (3).

En la figura 5 se observa como aplicaciones del 2% en peso de compost de RSU no alteran significativamente la conductividad hidráulica del suelo. Como sugieren otros autores (Chang y col., 1983) se necesitan altas aplicaciones de residuos orgánicos para lograr un incremento significativo de la conductividad hidráulica.

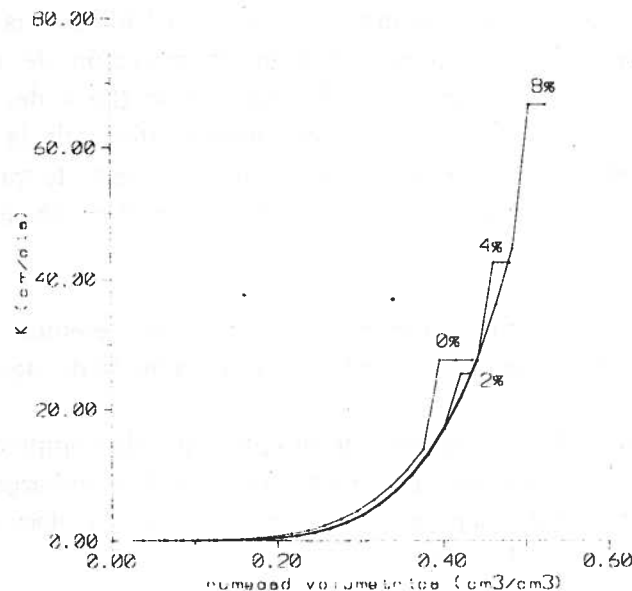


Fig. 5. Conductividad hidráulica subsaturada frente a contenido volumétrico de agua para cada tratamiento.

La distribución del tamaño de poros en cada tratamiento fue determinada a partir de la curva de retención mediante la descripción que Jurin hace del ascenso capilar (p. ej. Marshall y Holmes, 1979):

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$

donde σ representa la tensión superficial del agua, r la densidad, g la intensidad de campo gravitatorio, r el radio de poro y h la tensión matricial.

A partir de las ecuaciones (2) y (4) obtenemos la relación entre la humedad volumétrica y el diámetro de poro y determinamos las curvas que representan la variación de agua acumulada con el diámetro de poro. En la figura 6 se ven los resultados obtenidos y en la figura 7 se muestra la distribución del espacio poroso en función del diámetro de poros.

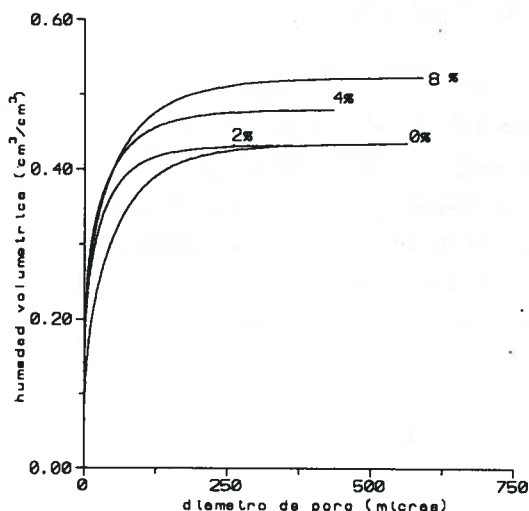


Fig. 6. Agua almacenada acumulada frente a diámetro de poro.

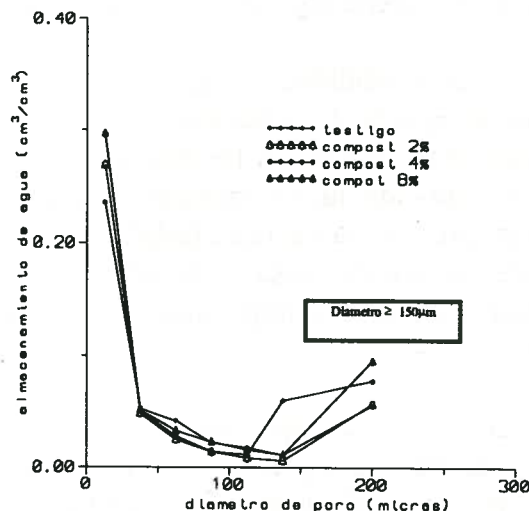


Fig. 7. Distribución del espacio poroso en función del diámetro de poros.

Observamos como a medida que se aumenta la dosis de compost lo hace la porosidad, fundamentalmente en el rango de 0 y 50 μm de diámetro de poro. Son precisamente estos poros, cuya función principal es la de almacenamiento de agua, los más abundantes en todos los tratamientos, representando entre el 66% y el 73% de la porosidad total. Este aumento en el volumen atribuible a poros menores de 50 μm conlleva un aumento de la superficie específica, que junto al aumento en el contenido de materia orgánica puede explicar la mayor capacidad de retención de agua a potenciales pequeños.

En la figura 7 se aprecia también un aumento de los poros con diámetro superior a 150 μm (poros que participan en la transmisión del agua) con el incremento de la dosis de compost. Así el tratamiento de compost 8% produce un incremento del 70% de poros con diámetro mayor de 150 μm respecto al testigo. Este aumento de poros transmisores contribuye a explicar el incremento en la conductividad hidráulica saturada y subsaturada tras la aplicación

de compost.

La distribución de tamaño de poros en el tratamiento compost 100%, pone de manifiesto un gran porcentaje de poros con diámetro superior a 200 μ m, concretamente el 55% del total, siendo el tamaño de poros más abundante. En el resto de los tratamientos el aumento de porosidad se manifiesta en los poros menores de 50 μ m, invirtiéndose en este caso esta tendencia.

CONCLUSIONES

Los resultados encontrados muestran la necesidad de determinar las curvas de variación de densidad aparente con el incremento de humedad del suelo (curvas características de contracción o encogimiento), ya que influyen notablemente en la obtención de la humedad volumétrica y en el ajuste de modelos matemáticos a los resultados experimentales.

El modelo propuesto por Van Genuchten (1980) muestra un mejor ajuste a los datos experimentales que el de Brooks y Corey (1964), fundamentalmente cuando se incrementa el contenido en materia orgánica del suelo y la irregularidad del espacio poroso.

La disponibilidad de agua para el cultivo aumenta con la dosis de aplicación de compost, aunque no de forma lineal. Con aportaciones del 2%-4% en peso podemos conseguir resultados muy similares a los obtenidos con dosis mayores. Sin embargo, la mejora de la conductividad hidráulica e incremento de la porosidad requieren dosis superiores. La adición en campo presenta la ventaja añadida de una disminución de la densidad aparente (variable constante en nuestro ensayo de laboratorio), con lo que con dosis menores se pueden conseguir incrementos importantes en la capacidad de infiltración del suelo (Aguilar y González, 1994).

El aumento de capacidad de retención de agua a bajos potenciales con la aplicación de compost de RSU se explica por un incremento en la superficie específica (más volumen de poros inferiores a 50 micras) y en el contenido en materia orgánica del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la CICYT y a la empresa Saneamientos de Córdoba S.A. la financiación del proyecto PTR94-0048, perteneciente a las Acciones del Programa de Estímulo a la Transferencia de Resultados de Investigación, mediante el cual se ha podido realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Aguilar, F.J., González, P. (1994). *"Efectos de la aplicación de compost de RSU en el régimen hídrico del olivar en no laboreo"*. Actas de las XII Jornadas de la AERYD, Pamplona. pp. 45-52.
- Aguilar, F.J., González, P. (1994). *"Efectos de la aplicación de compost de RSU sobre las propiedades químicas del suelo"*. Actas del III Congreso Internacional de la ANQUE,

Tenerife. Vol. I, pp. 149-157.

Bronswijk, J.J.B., Evers-Vermeer, J.J. (1990). "*Shrinkage of duth clay soil aggregates*". Neth. J. Agric. Sci. 38:175-194.

Brooks, R.H., Corey, A.T. (1964). "*Hydraulic properties of porous media*". Hydrology Paper n°3, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado. 27 pp.

Burdine, N.T. (1953). "*Relative permeability calculations from pore-size distribution data*". Petrol. Trans., Am. Inst. Min. Eng. 198:71-77.

Cassel, D.K. (1983). "*Spatial and temporal variability of soil physical properties following tillage of Norfolk loamy sand*". Soil Sci. Soc. Am. J. 47:196-201.

Chang, A.C., Page, A.L., Varneke, J.E. (1983). "*Soil conditioning effects of municipal sludge compost*". J. Environ. Eng. (ASCE) 109:574-583.

Courtin, P., Feller, M.C., Klinka, K. (1983). "*Internal variability in Some properties of disturbed soils in S.W. British Columbia, Canada*". J. Soil Sci. 63:529-539.

De Haro, J.M., Aguilar, F.J., Giráldez, J.V., González, P. (1995). "*Aplicación de compost de RSU en suelo de olivar como alternativa a otros sistemas de manejo*". Riegos y Drenajes XXI. n° 81. pp. 11-16.

Fuentes, C., Haverkamp, R., Parlange, J.Y. (1992). "*Parameter constraint on closed-form soilwater relationships*". Journal of Hydrology. 134:117-142.

Hernando, S., Lobo, M.C., Polo, A. (1989). "*Effects of the application of a municipal refuse compost on the physical and chemical properties of a soil*". Sci. Total Environ. 82:589-596.

Khaleel, R., Reddy, K.R., Overcash, M.R. (1981). "*Cahnges in soil physical properties due to organic waste applications: A review*". J. Environ. Qual. 10:133-141.

Klute, A. ed. (1986). "*Methods of soil analisys*". part I, physical analisys. Monog. 9, Wisconsin.

Marshall, T.J., Holmes, J.W. ed. (1979). "*Soil physics*". Cambridge University Press, London. pp. 45-47.

McRae, R.J., Mehuys, G.R. (1985). "*The effect of green manuring on the physical properties of temperate-area soils*". In: B.A. Stewart (ed.), Advances in Soil Science. Vol. 3. Springer-Verlag, New York. pp. 71-94.

Mualem, Y. (1976). "*A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*". Water Resour. Res. 12:513-522.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., (1989). "*Estimation of soil water retention and hydraulic properties*". In : H.J. Morel-Seytoux (ed.). Unsaturated flow in hydrologic modeling. Theory and practice. pp. 275-300. Kluwer Academic Publishers.

Tisdall, J.M., Oades, J.M. (1982). "*Organic matter and water-stable aggregates in soils*". J. Soil Sci. 33:141-163.

Van Genuchten, M. Th. (1980). "*A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*". Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898.

Van Genuchten, M. Th., Leij, F.J., Yates, R.S. (1991). "*The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*". EPA, 600 (2-91), Ada, Oklahoma. 67 pp.

APTITUD DE LAS AGUAS RESIDUALES DE ALMERIA TRATADAS CON OZONO PARA SU REUTILIZACION EN RIEGO

Rojo Aliaga, I.* ; Pérez Parra, J.J.* ; Vallverdu Arbos, A.M.**

* C.I.D.H. La Mojonera-La Cañada Almería

** TRAGSA

RESUMEN

La escasez de recursos hídricos naturales en zonas áridas y semiáridas constituyen un problema a veces dramático para la población asentada en ella como es el caso de las regiones mediterráneas, en las que la creciente acumulación de población unida a una escasa pluviometría irregularmente distribuida en el tiempo y a unos limitados recursos superficiales, están llevando al agotamiento y/o deterioro de los recursos subterráneos. En este contexto, la reutilización de las aguas residuales urbanas se perfila como una fuente adicional de agua merecedora de ser tenida en cuenta. En este sentido, en Almería se ha ejecutado un plan para la reutilización de las aguas residuales que incluye un tratamiento terciario de desinfección con ozono. Se presentan datos que confirman la aptitud del sistema diseñado a tal fin.

1.-INTRODUCCION

El litoral mediterráneo andaluz presenta unas características climatológicas adecuadas para el desarrollo de una agricultura intensiva muy productiva. Este sistema descansa sobre el agua, un recurso natural cada vez más escaso y que actúa como factor limitante.

La reutilización de las aguas residuales urbanas en riego, además de asegurar el suministro, aporta fertilizantes y a menudo actúa como una etapa más dentro del tratamiento de depuración de las aguas, consiguiendo la desnitrificación y desfosfatación de las mismas. (Bouwer, H., et al. 1987)

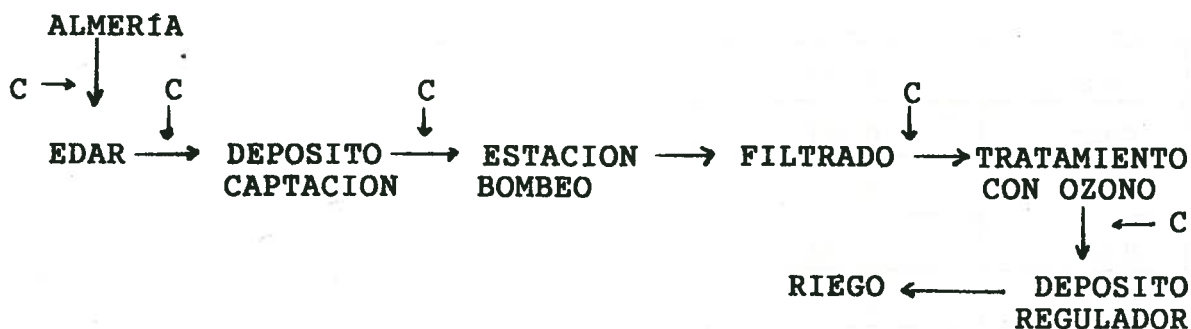
La reutilización debe realizarse de forma controlada y asegurar el cumplimiento de los criterios sanitarios para el uso sin riesgos de los productos vegetales regados por estas aguas.

En este trabajo, se presentan datos sobre los aportes o cargas que incorpora al agua el uso urbano, valorando sus efectos

sobre la aptitud resultante para el uso de éstas aguas en riego, mediante el análisis de parámetros físicos y químicos significativos. Asimismo, se presentan resultados que permiten valorar la capacidad desinfectante del ozono, en tratamiento terciario, a fin de garantizar la aptitud, desde el punto de vista sanitario, del agua obtenida para su empleo en riego de hortalizas de consumo en crudo.

2.- MATERIAL Y METODOS

El plan de trabajo consiste en el seguimiento de la calidad del agua desde el abastecimiento a Almería hasta la aplicación en riego según el siguiente esquema:



C → Control

El agua residual de Almería procedente del tratamiento secundario es conducida a un depósito, a partir de la cual se impulsa hasta la planta de ozono donde se trata terciariamente antes de ser distribuida para el riego.

En este trabajo se aportan datos analíticos de seguimiento en distintos puntos:

- Punto 1.- Entrada del agua a la ciudad de Almería.
- Punto 2.- Entrada del agua a la estación de depuración.
- Punto 3.- Salida del agua del proceso de ozonización.

3.- RESULTADOS Y DISCUSION

En la tabla 1 se presentan los valores analíticos correspondientes a la calidad de agua de entrada y salida de la ciudad de Almería. Los datos de salida de la ciudad han sido calculados a partir de los aportes urbanos obtenidos en campañas analíticas anteriores. (Alonso, C.)

Se produce un pequeño aumento de la mayoría de los componentes iónicos del agua. La mayor parte de ellos debido a la mineralización (degradación) de la materia orgánica, especialmente el N,P,K.El B y SO₄ aumentan por el aporte de detergentes; y los nitratos desaparecen al pasar a amonio.

TABLA 1

	Entrada Almería	Entrada Planta	Aporte Urbano
pH	7,9	8,26	0,36
CE	0.720	1,55	0,83
Cl ⁻	5	1,3	- 3,7
CO ₃ ⁼	0	0	0
CO ₃ H ⁻	3.27	7,47	4.2
SO ₄ ⁼	0.47	5,87	5.4
P	0	0.08	0.08
NO ₃ ⁻	0.31	0	-0.31
NO ₂ ⁻	0	0	0
NH ₄ ⁺	0	1.42	1.42
B	0	0.13	0.13
Ca ²⁺	2.5	3,3	0.8
Mg ²⁺	2.66	2,69	0,3
Na ⁺	3	3,3	0,3
K ⁺	0.74	1,19	0.45
DBO ₅		100-190 mg/l	
DQO		230-300 mg/l	
S.S.		90-180 mg/l	
Col.tot.		10 ⁸ col/100ml	

Los datos se dan en meq/l. En el caso de la DBO₅,SS y DQO se da un intervalo de valores debido a que existen notables diferencias dependiendo del momento de muestro.(variación horaria y estacional)

Desde el punto de vista de la posterior reutilización de estas aguas en riego consideraremos los aportes urbanos que podrían hacer limitantes las aguas para este uso (Feigin, A. et al. 1991).

El pH no es modificado de forma importante, permaneciendo el rango de variación dentro de los límites normales 7 - 8.

La conductividad eléctrica, sin embargo, es más limitante, valores elevados causan problemas en la nutrición. El incremento de conductividad como consecuencia del uso urbano produce aguas con conductividades del orden de 1,55 mmohs/cm, totalmente aptas para el riego de los cultivos propios de la zona.

La importancia de los distintos iones varía de unos a otros, y su efecto repercutirá a niveles diferentes. El Na, Cl⁻ y B son elementos que presentan una toxicidad específica en la planta y son limitantes por su efecto directo (necrosis, quemaduras...). Los valores de B y Cl⁻ encontrados en estas aguas permiten su uso, ya que se encuentran por debajo de los límites establecidos, 1mg.l⁻¹ en el boro y 350 mg.l⁻¹ en los cloruros. Estos valores varían sensiblemente en función de la tolerancia de cada cultivo.

El sodio afecta a distintos niveles. Además de su toxicidad específica produce desajustes nutricionales por competencia con el Ca y K, y a altas concentraciones en el suelo produce un deterioro en las condiciones físicas del mismo que da lugar a una reducción de su porosidad y permeabilidad.

El efecto del sodio contenido en un agua de riego depende de la relación entre sodio, calcio y magnesio por un lado, y de la composición de iones bicarbonatos y carbonatos, por otro, ya que la actividad de los mismos da lugar a la precipitación de calcio y magnesio, y en consecuencia, a la disminución de la concentración de estos elementos en beneficio de la acción degradante del sodio. Un método de evaluación de su efecto es el SAR ajust. de Rhoades.

$$SAR_{ajust} = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} (1 + (8,4 - pH_c))$$

Donde el pH_c es calculado en función de las concentraciones de Ca, Mg, Na, CO₃= y CO₃H⁻.

El cálculo de este dato se ha realizado sobre el agua de salida de la Estación de depuración que va a ser destinada al riego, teniendo en cuenta que la variación de estos elementos durante los tratamientos de depuración primario y secundario no son significativos. Según la expresión anterior el valor de SAR ajust en nuestro caso sería 4,75. Para evaluar este dato se tiene

en cuenta también la conductividad eléctrica del agua en cuestión. Cuando la conductividad se encuentra entre 0,4 y 1,6 mmhos.cm⁻¹ y el SAR ajust menor que 8, como en este caso, no existen riesgo de alcalinización del suelo.

Otros elementos como N,P,K, merecen una mención especial en temas de reutilización. Estos elementos, nutrientes importantes de las plantas, se encuentran en concentraciones superiores a las normales en un agua de riego estándar. Estos niveles son consecuencia de la mineralización de la materia orgánica aportada por el uso urbano, y el aprovechamiento de los mismos conlleva un ahorro de fertilización importante, sin embargo a este respecto hay que añadir ciertas limitaciones. Hay estudios que demuestran que valores muy elevados afectan a la calidad y cantidad de las cosechas, así como el medio ambiente al que van a parar los lixiviados que contienen los nutrientes no absorbidos por la planta. Los contenidos del agua residual de Almería están muy por debajo de los límites, no obstante, habrá que tener en cuenta el contenido de estos elementos para realizar las correspondientes correcciones en la fertilización de los cultivos.

Los metales pesados, que podrían limitar el uso de este agua, también han sido estudiados. Debido al bajo grado de industrialización de la ciudad de Almería sus valores se encuentran dentro de un rango permisible para el uso en riego.

Otros parámetros a considerara es el contenido de materia orgánica, Sólidos en suspensión y contaminación microbiológica.

La materia orgánica existente en un agua suele ser determinada por la DBO5 (demanda biológica de oxígeno) y en menor medida por la DQO. (Demanda química de oxígeno) . Dosis adecuadas de materia orgánica son decisivas en el suelo: aumentan la velocidad de formación de los complejos órgano-minerales; eleva la capacidad de intercambio iónico y mejora las propiedades del suelo. sin embargo, deben evitarse valores elevados, ya que crean situaciones de anaerobiosis que disminuye la disponibilidad de oxígeno en las zonas de la raíz, reduce los compuestos y se genera gases y malos olores. Las aguas residuales de Almería presentan valores entre 100 - 190 para la DBO5 y 230 -300 para la DQO.

Los solidos en suspensión elevados producen problemas de infiltración y aireación del suelo así como obstrucciones en goteros y estructuras hidráulicas. Las aguas de salida de la ciudad de almeria posee un contenido de SS entre 90 y 180. Valor alto inicialmente que será reducido por tratamientos posteriores.

En las aguas destinadas al riego de productos consumidos en crudo el grado de contaminación microbiológica adquiere una gran importancia . Las normativas existentes a nivel mundial son distintas y cada vez más restrictivas. En España se ha redactado recientemente el borrador del decreto por el que se establece las condiciones básicas para la reutilización directa de las

aguas residuales. En éste borrador, se limita para el uso en riego de productos consumidos en crudo a 10/100ml en coliformes fecales y 1 huevo de nematodos intestinales por l. El numero de coliformes fecales, indicador de contaminación microbiologica, encontrados en las aguas residuales de la ciudad de Almería es del orden de 10^7 - 10^8 , valores que hace imprescindible introducir un sistema de desinfección de las aguas que nos permitan conseguir niveles aptos para el riego.

El desinfectante elegido en este caso ha sido el ozono, elemento con propiedades bactericidas, germicida y virulicida superiores a otros productos destinados a este uso. Además, oxigena el agua residual y mejora otras cualidades de la misma de cara a su reutilización agrícola. Galvin, R.(1988)

El ozono es un tratamiento terciario y como tal se aplicara a las aguas tras haber sufrido un tratamiento primario y secundario, en los que se producirá una importante reducción de los parámetros indicadores de contaminación orgánica y materia en suspensión. La aplicación del ozono además de asegurar la desinfección del agua conseguira mejorar aún más la calidad estas aguas y reducir la DBO5 y los SS a valores inferiores a los recomendados, 20 mg.l^{-1} Para la DBO5 y 20 mg.l^{-1} para los S.S.

En la siguiente tabla, vemos el efecto del ozono sobre la DBO5, S.S., Coliformes totales, fecales y Streptococos fecales.

TABLA 2

	DBO5	S.S.	C.Tot.	C.Fec.	S.Fec.
Agua de entrada	16	12	10^5	10^4	10^3
Agua de salida	10	10	10^2	0 -10	0 -10

Dosis de ozono aplicada 4 - 8 mg/l. Con filtración previa.

Los datos dados en la tabla 2 corresponden a un estudio efectuado en planta piloto sobre el agua residual de salida del tratamiento secundario de Costacabana y una posterior filtración de la misma sobre filtros de arena de 0,7 a 1,5 mm. El agua ha sido filtrada previamente debido a que se mejoran de forma notable la eficacia de los procesos de ozonización (Lebesque Y. et all (1978)). La filtración elimina partículas del agua, lo que reduce los SS y afecta a la DBO5, DQO y contenido microbiológico, por tratarse en la mayor de los casos de partículas de origen orgánico a las que se encuentran adheridas carga microbiológica.

Actualmente, se están realizando estos mismos proceso con caudales de agua superiores en una planta de ozonización. Aún estando en etapas iniciales de estudio podemos dar ya algunos datos de grado de reducción de los parámetros que podrían ser

limitantes de cara a la reutilización en riego de las aguas.

	Grado de reducción %
DBO5	55
DQO	15,3
S.S.	40
Col.Tot.	99

Como hemos indicado, estamos en etapas iniciales. sin embargo, las posibilidades de estos estudios son importantes. Una vez optimizado el proceso de ozonización se realizará el seguimiento de las aguas ozonizadas y los suelos regados por las mismas, determinando los problemas y beneficios que se derivan de este uso.

1.- CONCLUSIONES

A partir de lo anteriormente expuesto podemos concluir afirmando la posibilidad de la reutilización en riego de las aguas residuales de Almería siempre que sean tratadas adecuadamente. Esta posibilidad puede ser extrapolable a otros municipios en los que el grado de industrialización no sea elevado y el contenido de metales pesados no sea alto.

El ozono es un desinfectante útil en el caso de la reutilización ya que además de eliminar carga microbiana oxigena el agua reduciendo la DBO5, DQO y S.S., únicos parámetros que limitan el uso en riego.

5.- BIBLIOGRAFIA

- 1.- Alonso Cobos, C. "Reutilización de aguas urbanas, aplicación al regadio. Ozonificación." Riegos y Drenajes XXI, 1993 (70)
- 2.- Bouwer, H.; Ideolowitch, E. (1987) "Quality Requirement for irrigation of sewage water."
- 3.- Feigin, A.; Ravina, I.; Shalhevet J. (1991) "Irrigation with treated sewage effluent " Springer-Verlag pag 34 - 156
- 4.- Lebesque, Y.; Legeron J. "Desinfection des eaux usées par l'ozone. Simposium I.O.I. 23-26 Mai 1978. Los Angeles.

5.- Marin Galvin, R. "Oxidación y desinfección de aguas para aguas de consumo publico, algunas consideraciones sobre el uso de cloro, dióxido de cloro y ozono". Química e Industria. 1988; 34 (6), 577-588

6.- Pérez Parra, J.; Vallverdu Arbos, A.M. (1995). "Reutilización de las aguas residuales de la ciudad de Almería en los regadíos del Bajo Andarax" Actas del II Seminario, El agua presente y futuro. Gestión y uso de los recursos hídricos. Septiembre 1995.

7.- Wescot, D.W.; Ayers, R.S. (1984). "Irrigation water quality criteria. Irrigation with reclaimed municipal wastewater: A guidance manual" G.S. Pettygrove y T. Asano Ed. 331-337 pp. California State Water Resource Control Board.

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA HÍDRICA DE DOS SISTEMAS DE CONTROL DE RIEGO EN SUSTRATO.

Lorenzo Mínguez, P¹. Medrano Cortés, E¹. García Lozano, M².

RESUMEN

Se ha evaluado comparativamente la eficiencia en la gestión hídrica de dos métodos de control para cultivo sin suelo: programación cíclica por tiempos con dotación constante y frecuencia variable e incorporación de un dispositivo para la activación del riego a la demanda, método 1 y 2 respectivamente.

El control de la fertirrigación mediante la activación de riego a la demanda es un método dinámico que ha permitido ajustar con mayor precisión el aporte de la solución nutritiva en función de las variaciones climáticas y del estado fenológico del cultivo, de forma que ha supuesto un ahorro de 120 l.m^{-2} , a la vez que ha reducido las oscilaciones en los parámetros de control. Esta disminución en la dotación de riego ha generado mayor eficiencia hídrica, dado que los resultados productivos con ambos métodos han sido similares.

ABSTRACT

Two methods for the water supply control on soilless culture has been evaluated comparatively. One of them (method 1) was a recurrent programming by times with constant dosage and variable frequency, and the other one (method 2) applies an activation device related to the water requirement of the crop.

Irrigation control by method 2 is a dynamic system which has allowed to adjust the nutrient solution supply with more precision in function to the climatic variations and crop ontogeny, so that it has supposed a saving of 120 l.m^{-2} , at the same time that it has reduced the oscillations of the control parameters. This watering supply decrease produced by method 2 has generated larger water efficiency than method 1, because the productive results with both methods have been similar.

(1) Unidad de Fisiología. Centro de Investigación y Desarrollo Hortícola. Almería.

(2) Cultivos Hidropónicos A.S.L. Almería.

INTRODUCCION

En los últimos 5 años el avance del cultivo en sustratos en la provincia de Almería ha sido relevante. En la actualidad existen entorno a 1000 Has dedicadas a cultivo sin suelo en su mayoría sustratos artificiales: lana de roca y perlita.

La gestión de la fertirrigación es uno de los factores determinantes de los resultados productivos de estos sistemas. Requiere un equipamiento que posibilite cubrir las necesidades hídricas y nutricionales del cultivo de forma dinámica a lo largo del día, pues estos sistemas se caracterizan por poseer baja energía de retención hídrica y una reserva limitada de solución en el entorno radicular, por lo que necesitan riegos frecuentes y dosis adecuadas, acordes a las propiedades físicas de cada sustrato y al volumen de que disponen.

La cantidad de solución aportada debe proporcionar suficiente agua para compensar la absorción del sistema sustrato/planta y las pérdidas debidas al flujo de lixiviación, para mantener una C.E. (Conductividad Eléctrica) o un potencial osmótico determinado en la rizosfera y evitar la acumulación de los iones no asimilados.

El factor que determina en mayor medida el porcentaje de solución que debe drenar es la calidad del agua de riego. Aguas de buena calidad (C.E. 0.6 mS.cm^{-1}) permitieron lixiviados inferiores al 20% para cultivo de tomate en perlita (Lorenzo, P. *et al.*, 1993), con agua de peor calidad (C.E. 2.6 mS.cm^{-1}) el porcentaje de drenaje requerido en el mismo sistema osciló entre el 35-50% (Medrano, E. *et al.*, 1995).

Existen diferentes métodos para gestionar el riego que permiten mayor o menor precisión en el ajuste de la demanda del cultivo. En buena medida las posibilidades de conseguir un uso mas eficiente del agua está asociada a la incorporación de mecanismos mas o menos complejos al equipo de control.

Experimentalmente se han desarrollado diversos métodos: Control del potencial hídrico del sustrato, éste requiere disponer de un número considerable de sensores capaces de registrar tensiones relativamente pequeñas de -1 a -3 kPa (Baille, M., 1994a). Microvariaciones del diámetro de los órganos, relacionadas con los procesos de hidratación y deshidratación de los mismos y provocados por el desfase entre absorción y transpiración en el curso del día (Cohen, M., 1994). Control del volumen de la solución lixiviada, basado en un registro continuo (Göhler, F. *et al.*, 1989). Pérdida de peso del sistema mediante balanza donde la transpiración de la planta causa una pérdida de peso que al alcanzar un cierto valor pone en funcionamiento el equipo de riego (Welleman, J.C.C. y Verwer, F.I., 1984). Evaluación de la transpiración por medio de sensores de clima, a partir de los valores obtenidos se estiman las necesidades hídricas de la planta mediante una función que relaciona la transpiración con la radiación absorbida por el dosel vegetal y el déficit de presión de vapor (de Graaf, R., 1988; Stanghellini, C., 1987; Baille, M., 1994b).

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de uno de los métodos desarrollados específicamente para cultivo en sustrato, que consiste en la incorporación en el sistema de control de una bandeja de activación de riego a la demanda, provista de sensores de nivel que responden a la dinámica de absorción de la planta, frente a una programación cíclica de riego, en un cultivo de tomate utilizando perlita como sustrato.

MATERIAL Y METODOS

La experiencia se realizó en el Centro de Investigación y Desarrollo Hortícola de Almería, durante la campaña 93-94, bajo invernadero de cubierta plástica.

Se compararon dos métodos de control de riego en un cultivo de tomate *Lycopersicon esculentum*, Mill) var. "Daniela". La siembra se realizó el 20/8 a una densidad de 2 plantas.m⁻². El periodo de recolección se inició el 5/1 y finalizó el 28/3.

El cultivo se desarrolló en perlita B6 de granulometría entre 0.1 y 0.5 mm, dispuesta en sacos de 120 cm de longitud, 15 cm de altura y 40 litros de volumen. Las características de la unidad de cultivo originan las siguientes relaciones volumétricas (Martínez, E. y García, M., 1993):

- Volumen total sustrato/Volumen agua fácilmente disponible(AFD)+agua de reserva(AR), 2.4
- Volumen total de sustrato / volumen aire, 3.5
- Volumen AFD+AR / volumen aire, 1.4
- Volumen total de sustrato / Volumen total de agua, 1.5.

La C.E. del agua de riego empleada era de 2.6 mS.cm⁻¹ con un contenido salino de 17 mmol.l⁻¹ de NaCl, la C.E. de las soluciones nutritiva y lixiviada se fijó en 3.5 mS.cm⁻¹ y 5.5 mS.cm⁻¹ respectivamente.

A lo largo del ciclo de cultivo el abonado mineral se incorporó a la red de riego localizado mediante un equipo automatizado con capacidad de ajustar el pH y la C.E. de la solución nutritiva a los valores establecidos y se distribuyó mediante un sistema de riego por goteo con 1 emisor por m² (3 emisores por unidad de cultivo) y caudal unitario de 2 l.h⁻¹ , a una presión de 1kg.cm⁻² con un coeficiente de uniformidad superior al 90%.

Diariamente se registró la cantidad de solución aportada y se midió el volumen y la C.E. de las soluciones lixiviadas en cuatro puntos (dos por tratamiento) situados en el centro de la zona sur del invernadero, donde se recogía la solución drenada por dos unidades de cultivo.

Se planteó un diseño experimental de cuatro bloques completos dispuestos al azar.

La cantidad de agua aplicada en cada riego se calculó en función de la relación volumétrica sustrato/agua útil de la unidad de cultivo (U.C.) (García, M. y Martínez, E., 1993):

Volumen sustrato:	40 l
Agua útil (AFD+AR):	16 l
Nivel de agotamiento agua útil (4%):	0.64 l
Agua de lixiviación (45% nivel agotamiento):	0.29 l
Dotación de agua.emisor ⁻¹ .riego ⁻¹ :	0.31 l
Tiempo de riego en minutos (Dotación/Caudal gotero):	9.3≅ <u>10 minutos</u> .

Métodos de gestión de la fertirrigación:

Método 1: Se realizó una programación de riego cíclica por tiempos con dotación constante y frecuencia variable, la dotación de riego se calculó en función de las relaciones volumétricas de la unidad de sustrato anteriormente citadas y se fijó en 10 minutos, la frecuencia de riego (n° de riegos.día⁻¹) varió con las necesidades del cultivo, teniendo en cuenta el % de la solución lixiviada el día anterior y su C.E.

Método 2: Se utilizó la bandeja de activación de riego a la demanda, donde se colocaron sobre un material absorbente 2 unidades de cultivo abiertas por la base para facilitar el contacto del sistema radicular con la solución nutritiva. El sistema dispone de dos sensores de nivel para activar y detener el riego de forma dinámica asociado a la evolución de la transpiración de las plantas. El dispositivo se puede regular graduando la profundidad de los sensores y la distancia entre ellos.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la evaluación comparativa entre los dos métodos de riego se muestran en la Tabla 1.

La cantidad de solución nutritiva aplicada fue mayor cuando se utilizó el método 1 basado en la programación cíclica de riegos . El método 2 que responde a un control dinámico supuso un ahorro de 120 l.m⁻².

La calidad del agua de riego (2.6 mS.cm⁻¹) con un contenido salino considerable exige lixiviar un porcentaje elevado de la solución nutritiva. El método que utiliza la activación de riego a la demanda, al mismo tiempo que ha reducido considerablemente el aporte hídrico, ha permitido disminuir ligeramente el volumen de solución lixiviada a la vez que ha mantenido la C.E. ligeramente más baja (Tabla 1).

La eficiencia del riego en la producción, expresada como gramos de fruto producido por litro de solución aportado, es de 19.7 g.l⁻¹ con el método 1 y de 25.3 g.l⁻¹ con el método 2. Se observa cómo el mayor aporte de agua y fertilizante con la programación cíclica no corresponde a un incremento productivo.

	Riegos cíclicos	Bandeja activación riego
C.E. solución nutritiva (mS.cm ⁻¹)	3.5	3.5
C.E. solución lixiviada (mS.cm ⁻¹)	5.5	5.3
% lixiviación	44.4	41.8
Riego total (l.m ⁻²)	565.0	445.0
Producción (k.m ⁻²)	11.1	11.3
Eficiencia del riego (g.l ⁻¹)	19.7	25.3

Tabla 1. Parámetros relacionados con la eficiencia hídrica.

DISCUSION

El método que utiliza la bandeja de activación de riego a la demanda se ha mostrado más eficiente para gestionar la fertirrigación en el sistema de sustrato descrito, supone un ahorro en el volumen de riego aportado y reduce las variaciones de concentración de la solución lixiviada, al adecuar dinámicamente las necesidades de la planta en función de las variaciones climáticas y de la fenología del cultivo.

La demanda hídrica de un reducido número de plantas actúa como indicador para cubrir las necesidades de todo el cultivo, por lo que es conveniente considerar la ubicación más adecuada y el número de bandejas necesarias en función de la superficie a controlar. El correcto funcionamiento del sistema requiere alta uniformidad del cultivo y del sistema de riego.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a la Dirección General de Investigación Agraria de la Junta de Andalucía que ha financiado el proyecto en el que se enmarca este estudio.

BIBLIOGRAFIA

- Baille, M. 1994a. Gestión global del cultivo fuera de suelo. *Áctas de Horticultura de la S.E.C.H. II Jornada de Sustratos* (en prensa).
- Baille, M.; Baille, A.; Laury, J.C. 1994b. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hortic.* 59:217-232.
- Cohen, M. 1994. Optimización de la producción mediante indicadores del estado hídrico de las plantas. *Phytoma* 57:50-60.
- de Graaf, R. 1988. Automation of the water supply of glasshouse crops by means of calculating the transpiration and measuring the amount of drainage water. *Acta Horticulturae*. 229:219-231.
- Göhler, F.; Heibner, A.; Schmeil, H. 1989. Control of water and nutrient supply in greenhouse vegetable production by means of hydroponic systems. *Acta Horticulturae* 260: 237-246.
- Lorenzo, P.; Medrano, E.; García, M. 1993. Irrigation management in perlite. *Acta Horticulturae* 335:429-434.
- Martínez, E.; García, M. 1993. Cultivos sin suelo: hortalizas en clima mediterráneo. *Compendio de horticultura 3. (de): Horticultura S.L.* pp-123.
- Medrano, E.; Lorenzo, P.; García, M. 1995. Manejo de riego de un cultivo de tomate en sustrato bajo abrigo. *VI Congreso de la S.E.C.H. Barcelona*; p:282.
- Stanghellini, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops, and aid to climate management. Ph D. thesis. Agricultural University, Wageningen, 150 pp.
- Welleman, J.C.C.; Verwer, F.I. 1984. Successfull growing on grodan rockwool in the Netherlands. *Acta Horticulturae* 150: 583-588.

SISTEMA DE TELECONTROL Y AUTOMATIZACION INTEGRAL DE REGADIOS: APLICACION A LOS REGADIOS DEL BAJO ANDARAX.

*Elola Jiménez, S.¹
Pérez de los Cobos Marín, D.²
Pérez Parra, J.³
Vega Betoret, A.⁴
Molina Castillo, M.¹
Olivares Ruiz, S.⁵*

RESUMEN

La optimización de las redes colectivas de riego, sobre todo en zonas de alta rentabilidad de explotaciones y escasez del recurso hídrico como es el caso del Poniente y Levante Almeriense, exige la necesidad de adoptar sistemas de telecontrol y automatismo que permitan además de una mejora considerable en la eficacia de la gestión, un importante ahorro en los costes de explotación, maximizando o minimizando determinadas variables objetivas (necesidades y calidades de agua de riego, consumos de energía, tareas de vigilancia y programación, etc.), siendo preciso para ello integrar el telecontrol y automatismo de todos y cada uno de los elementos y/o parámetros que constituyen o definen la red colectiva de riego.

Tal es el caso del sistema de telegestión que se está llevando a cabo en distintas fases, en la Zona de Transformación en Regadío del Bajo Andarax (Almería), cuyas características más significativas trata de poner de relieve la presente comunicación.

ABSTRACT

The improvement in the communal irrigation net, mainly in high profitability and scarcity water resource areas, as for example in the East of Almeria (Spain), require the adaptation of telecontrol and automatism systems which allow a better management apart from a significant saving in the exploitation costs taking into account a group of variables (irrigation water necessities and quality, energy consumption, supervision tasks and programming, etc..). In order to achieve this it will be necessary to join together all and every one of the communal irrigation net elements.

This telemanagement system is being carried out at different stages in the Andarax Irrigation Area (Almeria).

- (1) Empresa de Transformación Agraria, S.A. (TRAGSA).*
- (2) Departamento de Estructuras Agrarias. Consejería de Agricultura (Almería)*
- (3) Centro de Investigación y Desarrollo Hortícola (CIDH) Almería*
- (4) Ingeniería y Control Remoto, S.A. (I.C.R, S.A.)*
- (5) Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores (Univ. de Granada)*

1. ZONA REGABLE DEL BAJO ANDARAX: SISTEMA DE RIEGO Y CARACTERISTICAS.

La zona de transformación en regadío del Bajo Andarax (Almería), declarada de INTERES GENERAL abarca una superficie aproximada de 3.300 Has. ubicadas en ambos márgenes del Río Andarax, desde el T.M. de Santa Fe hasta su desembocadura próxima a la ciudad de Almería, cuya actual vocación está constituida principalmente por cultivos de hortalizas de consumo fresco, mayormente bajo plástico, y cítricos.

Se han establecido 5 Sectores hidráulicamente independientes, de los cuales el IV y V, con una superficie aproximada de 2.000 Has. se encuentran actualmente en fase de ejecución.

Próximamente comenzarán las obras de Red de Riegos de los Sectores I, II y III, con una superficie neta de 1.300 Has.

Las explotaciones se han agrupado en bloques de unas 4 Has. constituyendo la unidad de riego, donde se instala la borna o hidrante. El agua se entregará a la demanda, medida y con presión suficiente para el riego por goteo, disponiéndose por tanto en estos puntos de contador volumétrico y válvulas de cierre con limitador de caudal y regulador de presión.

Todas las obras anteriores están clasificadas de Interés común.

Como hito ya realizado esta toda la obra declarada de Interés General, que comprende además de la tubería de conducción principal, 5 depósitos con capacidad de regulación para 180.000 m³, 2 estaciones de Bombeo con una potencia total instalada de 2.520 KVA., un sistema de filtrado en arena de las aguas residuales, previo al sistema de tratamiento terciario mediante ozono, en la planta de reutilización donde hay instaladas 1.260 KVA. y siendo el caudal a tratar previsto de unos 500 l/sg., para alcanzar los parámetros de calidad exigidos en el protocolo del Servicio Andaluz de Salud, para este tipo de cultivos.

Todas las obras ejecutadas se entregarán a la Comunidad de Regantes de la Zona, constituida la Junta Central de Usuarios.

La complejidad y número de los distintos elementos que componen las redes colectivas de riego dentro de la zona de transformación que acabamos de relacionar, evidencia la necesidad de telecontrolar y automatizar la gestión de los mismos con el mayor grado de integración posible

2. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA

2.1 Estación Central

La estación central o sala de control se ubica en las oficinas de la Comunidad de Regantes. Desde esta sala de control se realizan las siguientes tareas:

- . Comunicación con cada estación remota ubicada en cualquier punto de la red de riego para realizar medidas periódicas y automáticas de caudales, consumos, presiones, posicionamiento de válvulas, niveles PH, conductividad, datos meteorológicos, humedad del suelo en los cultivos, consumos eléctricos en sondeos, volumen y caudal de agua depurada, etc. Visualización multimedia de datos (mapas, fotografías, gráficos, etc.)*
- . Actuación remota sobre cualquier elemento de control de la red hidráulica, tales como apertura o cierre de válvulas, regulación de presión, puesta en marcha o parada de bombas. Estas actuaciones se realizan de acuerdo con el plan de riego a demanda establecido (volúmenes contratados, riego diario o nocturno, tarifas, etc.)*
- . Gestión Administrativa Integral de la Comunidad con registros en base de datos de lecturas de consumos, gestión e impresión de recibos, remesas y cartera, contabilidad, informes, formas de pago, listado de socios, impresión automática de cartas, seguimientos de pagos y cobros, seguimiento de datos bancarios, compras de materiales, stock de almacén, balances y cuentas de explotación, etc.*

La estación central está compuesta por los siguientes equipamientos:

- . Red de ordenadores con sistema operativo Windows NT y periféricos.*
- . Software específico (configurado a medida) de Telecontrol, Telesupervisión y Telegestión (en base a SCADA INTOUCH y base de datos PROGRESS)*
- . Paquetes de Software de uso general (Hojas de cálculo, Procesadores de Textos, Correo Electrónico, Internet, ..)*
- . Equipos de Comunicaciones (modem telefónico, radiomodem, interfaz para comunicaciones via cable, ..)*

2.2 Medios y equipos de Comunicación entre la Central y las Estaciones Remotas de Campo.

Se emplean en forma independiente o combinada los siguientes métodos de comunicación digital:

Comunicación vía radio

- . *Entre la central (en el caso de que esté ubicada en el interior de poblaciones) y los equipos controladores de cada zona.*
- . *Con estaciones de bombeo, pozos y balsas y elementos lejanos en general.*

Para la transmisión digital de datos vía radio utilizamos el Sistema Radiomodem Spiral 1200, especialmente diseñado para comunicaciones vía radio (canales UHF de 12.5 KHz de ancho banda), con transmisión semi-duplex a 1200 baudios. Actualmente estamos finalizando el desarrollo de un nuevo radiomodem (SPIRAL 9600) que permite comunicaciones de 9.600 baudios en canales de 12.5 KHz y de 19.200 baudios a través de canales de 25 KHz.

Comunicación vía cable

Será de par trenzado de baja sección y bajo coste (1.5 mm²) con los hidrantes (compuestos por válvula y contador) y válvulas principales. Por un único cable se transmiten datos y se alimentan las estaciones remotas y válvulas. Longitudes de cable de hasta cientos de kilómetros y conexasionado con miles de estaciones de campo en tramos de 4 Km. con 256 nodos. Disponemos de los interfaces principales y repetidores adecuados. La transmisión se realiza a una velocidad mínima de 1.200 baudios y máxima de 9600 baudios, de manera que cada trama de comunicaciones se envía cada 250 milisegundos. La comunicación es semiduplex con consulta periódica de la estación central a todas y cada una de las estaciones remotas de campo.

Transmisión de datos /voz vía teléfono en sus diferentes versiones (Red Telefónica Conmutada, Telefonía Rural, GSM) para comunicación con bancos, socios, previsiones meteorológicas, otras comunidades, confederaciones, Internet, etc. Se emplea modem telefónico (a velocidad de comunicación de 28.800 baudios) o adaptador GSM.

2.3 Estaciones Remotas de Campo

Dependiendo del tipo de comunicación empleada, del número de entradas de medida y salidas de control necesarias para cada punto, de la presencia o ausencia de tomas de corriente eléctrica y de la complejidad de automatismos a realizar podemos elegir entre los siguientes sistemas:

HBREM-1. *Estación remota de bajo coste y pequeño tamaño, diseñada para el control de un único hidrante con comunicación por cable (HBUS). Control sobre una válvula de solenoide biestable y lectura de un contador de impulsos. Se alimenta*

por el mismo cable de comunicaciones (consumo: 2.5 mA y 10 microamperios en reposo). Está basada en microcontrolador PIC16C71 y dispone de batería de litio para un funcionamiento autónomo de hasta 10 años.

HBREM-2. Estación remota similar a la anterior pero con capacidad de lectura de hasta 4 contadores, y una lectura analógica (para 1 sensor).

HBREM-3. Estación remota con posibilidad de control sobre 3 válvulas, 8 lecturas de contadores y 8 entradas analógicas. Muy bajo consumo (igual que las anteriores), dispone también de batería de litio, está basada en microcontrolador PIC16C74. Se alimenta a través de la misma red HBUS salvo necesidad de un número alto de sensores.

SPIRAL-5000. Estación remota de pequeño tamaño (10cm x 16 cm x 7 cm) basada en microprocesador de 16 bits NEC-V25 con 11 entradas analógicas de 12 bits (para sensores), 8 entradas digitales optoacopladas, 8 salidas de relés, 512 KBytes de EPROM, 512 KBytes de RAM con batería de litio, 5 KBytes de EPROM, 2 puertos serie RS-232 y una comunicación de red RS-485. Se programa en C/C++. Software compatible con PC. Dispone de módulos de ampliación por cable (hasta 2 Km) y de interfaces de comunicaciones por radio (Radiomodem SPIRAL-1200), teléfono (MODTLF) y cable (HBUS). Su consumo es inferior a 1 watio. Requiere tendido de cable de alimentación además de datos o bien se alimenta de paneles fotovoltaicos.

AUTOMATAS PROGRAMABLES. Hemos adaptado a nuestro sistema los interfaces y protocolos de comunicaciones necesarios para el uso alternativo de PLCs de diferentes fabricantes (SIEMENS, ONROM, ALFA LAVAL, TELEMECANIQUE, ALLEN BRADLEY). De esta forma podemos implementar controles locales en instalaciones medianas o grandes (grupos de bombeo, desaladoras, depuradoras) y además enviar consignas o recibir datos en la estación central.

3. DEL TELECONTROL Y AUTOMATISMO A LA TELEGESTION. FASES DE IMPLANTACION.

La capacidad técnica del sistema de telecontrol y automatismo que acabamos de describir, es tal que permite alcanzar mayores niveles de sofisticación y complejidad en cuanto a la posibilidad de integrar de forma sencilla, toda una serie de variables o parámetros que van a permitir la consecución de un triple objetivo:

- Llevar el telecontrol y automatismo a nivel parcela en grandes redes colectivas cuyo diseño de la unidad de riego sea coincidente con la explotación (un hidrante por parcela).

- Minimizar los costos de explotación de la red colectiva mediante el ahorro de personal de operaciones y la gestión informatizada de la propia contabilidad de las comunidades de regantes como se ha descrito anteriormente.
- Optimizar en tiempo real las necesidades de agua en función de los datos meteorológicos, del tipo de cultivo, y características del suelo que permitan conseguir el máximo ahorro posible del recurso (medidas de ETP, balances hídricos, etc.).

El alcance y dimensión de los objetivos relacionados, y el hecho de que en la consecución de los mismos no sólo intervienen factores de índole técnico, sino también socioeconómico, de mayor inercia e imprevisión que aquellos, nos lleva a realizar una implantación del sistema en distintas fases que, condicionadas por las secuencias y ritmos de ejecución de las obras, pretenden avanzar un paso más en el telecontrol y automatismo de los diversos elementos que constituyen las Redes Colectivas, hasta alcanzar el Telecontrol Integral de la Zona Regable, y que cronológicamente son:

- Fase I: Telecontrol y automatización de los elementos comunes a toda la red (Depósitos, Estaciones de bombeo, Estación de filtrado, conducción principal, etc.).

Esta fase está actualmente concluida, habiéndose realizado mediante autómatas programables comerciales comunicados vía radio con la Estación Central, toda vez que se trataba de controlar pocos puntos (parámetros) muy distantes entre sí.

- Fase II: Telecontrol y automatismo de las redes colectivas (hidrantes)

La implantación de esta fase está aun pendiente de la finalización de las obras en la red colectiva de los sectores IV y V, que conllevará el telecontrol de 470 puntos hidrantes y cuyo software de gestión así como equipos de comunicaciones ya están diseñados y preparados para su instalación.

- Fase III: Telegestión Integral de la Zona Regable

Esta fase se encuentra actualmente a nivel de investigación aplicada, mediante una experiencia piloto que se está desarrollando en las instalaciones del Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER) del Ministerio de Agricultura, y de la cual se obtendrán los criterios básicos tanto a nivel de diseño como de integración que posibiliten su implantación en un futuro próximo.

PRESENTACIONES ESPECIALES

LAS COMUNIDADES DE REGANTES EN ESPAÑA: HISTORIA, CARACTERÍSTICAS, FINALIDAD Y GESTION.-

por

Andrés del Campo García¹

R E S U M E N

El presente trabajo tiene como objetivo principal el dar a conocer el incalculable valor histórico y práctico de las Comunidades de Regantes de España; su finalidad, bases legales y modo de gestionarse, así como su enorme importancia como corporaciones milenarias, hoy de Derecho público en las que los agricultores se agrupan con la única finalidad de autogestionarse para distribuir el agua para riego de un modo eficaz, ordenado y equitativo. Por el carácter milenario de las Comunidades de Regantes, su eficacia demostrada, ser genuinamente españolas y únicas en el mundo, resulta importante su conocimiento para poder exportar este tipo de asociación de regantes a otros países en desarrollo, con el objetivo de que el escaso recurso del agua pueda ser distribuido con el máximo rigor y equidad.

S U M M A R Y

The purpose of this presentation is to introduce to the untold historical and practical value of the Spanish Irrigators Communities, to their objectives, legal basis and managing operation, as well as to their huge importance as millennial corporations, presently of Public Law, where the farmers gather with the only aim to conduct a self-management of the irrigation water in order to allocate water in a more efficient, methodical and equitable way. Due either to the millennial character of the Irrigators Communities and to their proved efficiency, as well as to being pure Spanish and unique in the World, it is important to know them in order to be able to export this type of Farmer's Associations to other countries, so that the limited water resources might be distributed with the maximum strictness and equity.

- PALABRAS CLAVE (KEY WORDS): Regantes, Comunidades, Riego, Agua.

1.- ANTECEDENTES HISTORICOS.

La organización de las Comunidades de Regantes, no aparece en nuestro Derecho histórico claramente definido, ya que se trata de asociaciones regidas

¹ Ingeniero Agrónomo. Presidente de la Federación Nacional de Comunidades de Regantes de España, Paseo de la Castellana, 114 - 6º(8), 28046 MADRID

por sistemas y reglas propias de romanos y árabes, como las hermandades, sindicatos, juntas, etc. dotadas de una organización que permitía la administración y distribución del agua para el regadío de los cultivos.

Las normas de distribución del agua estaban basadas en el Derecho consuetudinario, transmitidas por generaciones verbalmente y contenían experiencias muy contrastadas. Con el tiempo estas prácticas habituales se plasmaron en Ordenanzas escritas, que en la actualidad constituyen un valor histórico incalculable.

El desarrollo del regadío en España estuvo fuertemente condicionado por el medio físico, quizás en mayor medida que cualquier otro fenómeno humano. El primer período de la historia del regadío en España se adecúa con la Prehistoria y la Edad Antigua. Este inicio es muy difícil de precisar y diferente para las distintas cuencas hidrográficas.

Quizás por falta de documentación se generaliza y la cuestión histórica del regadío español se ha visto sometida a dos criterios, opuestos en gran parte. El que niega la influencia de la cultura islámica, y el que se apoya en trabajos de prestigiosos arabistas, como predecesores de la teoría contemporánea de Américo Castro.

Historiadores más recientes (siglos XIX y XX), proponen ambas afirmaciones: la romana, quizás mejor, la romano-cristiana y la islámico-cristiana. Hay antecedentes históricos como para afirmar que la distribución del agua en común, y mediante acequias de riego, data de épocas muy anteriores a los musulmanes y puede demostrarse su fundación cristiana. De cualquier modo, es un hecho cierto, que una de las primeras Comunidades que se inscribieron en la Federación Nacional, que me honro en presidir, fué el Tribunal de las Aguas de la Vega de Valencia, que cuenta con más de mil años de edad y continua siendo joven, con una juventud, la suya, venerable, sencilla, solemne y señorial, que incluso sirvió de inspiración para que los legisladores de las Leyes de Aguas de 1866 y 1879 pudiesen con innegable acierto plasmar el régimen que conocemos de las Comunidades de Regantes de España, y por su influencia de diversos países de América.

2.- BASE LEGAL DE LAS COMUNIDADES DE REGANTES.

En España fué promulgada la más completa y eficaz Ley de Aguas el 13 de Junio de 1879; constaba de 258 artículos de los que 25 trataban de las Comunidades de Regantes.

A los 106 años de seguir en vigor esta Ley, el 2 de Agosto de 1985 se promulga la nueva y actual Ley de Aguas, que consta de 113 artículos de los

que sólo 11 tratan de Comunidades de Usuarios.

El Reglamento de la actual Ley de Aguas (1985) es otra de las normas jurídicas a que deben someterse las Comunidades de Usuarios, establece los principios jurídicos a que deben someterse los usuarios y el contenido de derechos y obligaciones que a los mismos les corresponde.

El Modelo Oficial de Comunidades de Regantes fué aprobado por R.O. de 25 de Junio de 1884, que establecía el modelo oficial de Ordenanzas y Reglamentos, inspirado en la regulación existente para las Comunidades de mayor importancia y tradición, conservando la aplicación de normas consuetudinarias. Esta Ley se modifica por la Orden de 13 de Febrero de 1968, es una norma muy necesaria porque fija el contenido de derechos, tanto respecto a la Comunidad como frente a los usuarios. Estas normas han servido de modelo para redactar el Reglamento de la vigente Ley de Aguas.

El cumplimiento del Derecho consuetudinario es una exigencia cuyo cumplimiento, como cualquier norma escrita que estuviera contenida en las Ordenanzas, se puede invocar ante la Administración y exigir ante los Tribunales, quienes, una vez justificada la costumbre, podrán imponer su cumplimiento. La Ley de Aguas anterior, que recogía el derecho histórico, llegaba a imponer a los Sindicatos de Riego la obligación de respetar los derechos adquiridos y las costumbres locales.

3.- IMPORTANCIA DE LAS COMUNIDADES DE REGANTES.

En España, entre el 80% (en épocas pasadas) y un 70% o menos (en épocas actuales) de los recursos hídricos consuntivos son demandados por el Sector de Regadíos.

Por imperativo legal, los usuarios del agua y otros fines de dominio público hidráulico que disfruten de una misma toma o concesión deberán constituirse en Comunidades de usuarios. Cuando el destino del agua es sólo para riego, se denominan Comunidades de Regantes.

Las Comunidades de Regantes son corporaciones de Derecho público, adscritas al Organismo de Cuenca. Se les concede autonomía interna para su gestión dentro de los límites de la Ley, a través de las Ordenanzas y Reglamentos propios, que deben ser redactados por los regantes y posteriormente son sometidos a su aprobación definitiva por el Organismo de Cuenca (Confederación Hidrográfica), que corresponda.

Por las competencias que la Ley de Aguas confiere a las Comunidades

de Regantes, difícilmente se duda de la importancia de estas organizaciones. A pesar de todo, y lamentablemente, no siempre este indudable peso específico que en la Organización Estatal hidráulica tienen las Comunidades de Regantes, se manifiesta en las decisiones administrativas y se transmite a la sociedad.

¿ Que es una Comunidad de Regantes ?; podría definirse como una zona concreta de tierra regable, la cual disfruta de una concesión de agua para regar esa superficie de tierra. Definida de este modo, se indica que la concesión de agua es dada a la tierra, y no al comunero propietario de la misma. Por lo tanto, cuando un comunero vende su tierra, está traspasando junto a su propiedad ese derecho que ya tiene la tierra, pero al no corresponderle a él, no puede venderlo a una tercera persona.

3.1.- FINALIDAD DE LAS COMUNIDADES DE REGANTES

Las Comunidades de Regantes deben organizar los aprovechamientos colectivos de aguas públicas, superficiales y subterráneas que le son comunes. Tienen como función prioritaria la distribución y administración de las aguas concedidas, sujetándose a normas sancionadas por la Administración y elaboradas por los propios usuarios.

La necesidad de que los usuarios de riego tengan que organizarse en Comunidades de Regantes, por imposición de la Ley, viene a mi juicio determinada por la existencia de unos bienes o medios comunes:

- Agua (generalmente con una o varias tomas en común).
- Obras hidráulicas de conducción y distribución.
- Servidumbres originadas por las obras realizadas.

Por estas razones, forzosamente han de Gestionarse, Explotarse y Financiarse de forma asociativa.

3.2.- CARACTERÍSTICAS DE LAS COMUNIDADES

Se caracterizan por:

- tener Personalidad jurídica, complementada con el carácter público del ejercicio de sus funciones.
- ser Corporaciones de Derecho público.
- tener Calificación de Administración pública.
- no tener consideración de Organismos Autónomos.

* Personalidad Jurídica.-

Su personalidad jurídica es independiente de los miembros que la forman, se las considera como centros autónomos de importación de relaciones jurídicas, lo que las faculta para comprar, vender, contratar, ejercitar acciones y realizar toda clase de actividades jurídicas. El ejercicio de estas acciones le corresponde a los órganos que las gobiernan y no a los usuarios de las Comunidades.

Su carácter público viene determinado por la finalidad que persiguen, que consiste en la administración de aguas públicas, distribuyendo sus caudales, resolviendo los litigios que plantean sus comuneros o partícipes y ejerciendo también las funciones de policía.

* Corporaciones de Derecho público.-

La personalidad es corporativa, pues se unen una serie de personas, con carácter obligatorio para la administración autónoma y común de aguas públicas. La razón de las Comunidades no está en unos bienes adscritos a su fin, sino a un conjunto de personas que se incorporan a una personalidad jurídica para ejercer funciones de administración autónoma de aguas públicas.

En las Comunidades de Regantes la titularidad de las fincas continúan ostentándola sus propietarios y no se transmiten a la Comunidad, sin perjuicio de las obligaciones comunitarias que pudieran recaer sobre las mismas.

* Calificación de Administración pública.-

Los fines de las Comunidades de Regantes son de interés público, al igual que los fondos y pueden serlo las propiedades afectas a dichos fines (ej: canales principales, embalses, estaciones de bombeo, etc.).

Las tres actuaciones administrativas más relevantes de las Comunidades de Regantes, son las de:

- Policía,
- Fomento, y
- Servicio público.

Las actas y resoluciones de las Comunidades, emitidas por sus órganos de gestión tienen carácter administrativo sometidas a la jurisdicción contencioso-administrativa.

* No son Organismos Autónomos del Estado.

La Administración del Estado, aunque tiene la facultad de constituir las Comunidades de Regantes, no la tiene para adscribir patrimonio que le es ajeno, ni para intervenirlo, ni nombrar cargos directivos, ni fiscalizar presupuestos, ni otras actividades que sean competencia específica de las Comunidades de Regantes.

4.- DERECHOS Y OBLIGACIONES DE LOS COMUNEROS

Las Comunidades de Usuarios están formadas por los comuneros, que son propietarios de las tierras agrupados, con la finalidad de utilizar un aprovechamiento colectivo de aguas, que quedan adscritas a la tierra y nunca al comunero.

4.1.- DERECHOS

*** Uso del agua**

Las Ordenanzas deben distinguir entre el uso común o general del agua a la Comunidad, y el propio de cada comunero, dentro del caudal otorgado a la Comunidad.

La distribución de las aguas se efectuará bajo la dirección de la Junta de Gobierno de la Comunidad. Nunca un regante puede tomar directamente el agua, aunque por turno le corresponda. Tampoco ningún regante en base a las necesidades del cultivo que adopte tiene derecho a reclamar más agua de la que en proporción le corresponda.

*** Ostentar cargos dentro de la Comunidad**

Dentro de las limitaciones que imponen las Ordenanzas; como son el no ser deudores de la Comunidad, mayoría de edad, saber leer y escribir, etc. todos los propietarios de bienes adscritos al aprovechamiento colectivo tendrán derecho a ser elegidos para desempeñar cargos en los órganos de gobierno de la Comunidad o en el Jurado de Riegos.

*** Voz y Voto**

Todos los usuarios tienen derecho a participar, asistiendo o interviniendo en los asuntos que se sometan a debate. El derecho a voto es una exigencia impuesta en razón del mayor o menor interés que para la Comunidad represente el aprovechamiento de cada comunero.

En la legislación vigente se establece que cualquiera que sea su

participación en los elementos comunes, todos los propietarios tendrán derecho a voto, en la medida de lo consignado en las Ordenanzas, pudiendo agruparse hasta alcanzar el número exigido para el ejercicio de este derecho. De cualquier modo, a ningún propietario podrá corresponderle un número de votos que alcance el 50% del conjunto de todos los comuneros.

El derecho a voto, que corresponde a los usuarios, según las Ordenanzas, es ajeno al derecho de voto que como miembros de la Junta de Gobierno o del Jurado de Riegos pudiera corresponderle. El voto del Presidente puede dirimir los empates en los órganos comunitarios que presida.

*** Derecho de información y de representación**

Al margen del derecho a interponer recursos administrativos o contencioso-administrativos, los comuneros tienen derecho a estar informados, asistiendo a las Juntas Generales y podrán revisar los acuerdos que figuren en los libros oficiales, si bien en algunas Comunidades se exige autorización de la Junta General o de Gobierno.

De igual modo, sólo los propietarios de los bienes adscritos al aprovechamiento colectivo o sus representantes legales tendrán derecho a participar en el funcionamiento de la Comunidad. El derecho que se otorga al representante, en ningún momento puede alcanzar para desempeñar un cargo de la propia Comunidad, ni podrá ser elegido para ocuparlo.

4.2.- OBLIGACIONES

*** Abono de las cuotas**

El Reglamento de la Ley de Aguas establece que ningún comunero pueda estar exonerado del pago de sus obligaciones y cargas inherentes a su participación en la Comunidad.

El abono de los gastos por conservación, limpieza o mejoras, como derivados de la administración y distribución de las aguas, podrán gravar la finca regada, estando la Comunidad facultada para exigir su importe por la vía de apremio y a prohibir el uso del agua mientras no se satisfagan, aun en aquellos casos en que la finca hubiese sido vendida a otro titular. Esta obligación, que la propia Ley de Aguas determina, se extiende también al pago de multas e indemnizaciones impuestas por los Tribunales o por los Jurados de Riegos.

Están también sujetos al pago de las obligaciones comunitarias, todos los terrenos comprendidos dentro de la Zona Regable de la Comunidad, aunque los

propietarios rehúsen al uso del agua.

En todo caso ningún usuario podrá separarse de la Comunidad sin renunciar al aprovechamiento de las aguas y a cumplir todas las obligaciones que con la misma tiene contraída. De igual modo, los gastos de construcción de presas, captaciones, conducciones, así como de explotación y conservación, deberán ser abonados según se especifique en sus Estatutos u Ordenanzas.

*** Acatamiento de las normas**

Todos los usuarios están obligados al cumplimiento de las ordenanzas de la Comunidad, así como a los acuerdos adoptados por los órganos de gobierno, pudiendo ser sancionados si cometen infracciones que estén tipificadas.

5.- GESTIÓN DE UNA COMUNIDAD DE REGANTES.-

5.1.- Gestión Directa

Constituye todo lo relacionado con el régimen interior de la propia Comunidad y sus relaciones con terceros.

Todas las Comunidades, con independencia de sus peculiaridades específicas, llevan a cabo en su gestión tres funciones: LEGISLATIVA, EJECUTIVA y JUDICIAL, y para ello dispone de tres órganos:

- **Junta General**: Está constituida por todos los comuneros o usuarios y es el órgano soberano de la Comunidad, correspondiéndole la gestión de las funciones LEGISLATIVAS y competencias específicas: (aprobación de presupuestos, elección de cargos, Concesiones nuevas de aguas, adquisición o enajenación de bienes, etc.)

- **Junta de Gobierno**: Constituida por comuneros elegidos por votación en Junta General, les corresponde la gestión de la función EJECUTIVA de la Comunidad, a través de las competencias que les corresponden por Ley y por las Ordenanzas propias: (Hacer cumplir las Ordenanzas, Nombrar y separar empleados, Elaborar Presupuestos, Organizar y distribuir el riego, Cuidar el estado de las Obras, etc.).

- **Jurado de Riego**: Está constituido por los comuneros elegidos en Junta General, correspondiéndoles la gestión de las funciones JUDICIALES de la Comunidad.

El Jurado de Riegos es el encargado de conocer las cuestiones que se susciten entre los usuarios de la Comunidad, pudiendo imponer a los infractores las sanciones reglamentarias. Su función principal es la de arbitraje para dar solución de las cuestiones que surjan entre regantes, regantes y guardas, etc. El objeto es dar una solución rápida a los problemas planteados, sin tener que acudir a los tribunales ordinarios de Justicia.

Los Jurados funcionan como tribunales de hecho, resolviendo las cuestiones que se les sometan sobre la distribución del agua. Las denuncias pueden ser formuladas por los vocales del Jurado, los guardas e incluso por cualquier regante ante el Presidente, quién ordenará al Secretario, si procede la denuncia, el envío a los interesados de papeletas de citación al juicio.

Los fallos del Jurado son adoptados por mayoría absoluta, y en caso de empate decide el Juez o Presidente del Jurado. Las resoluciones del Jurado son ejecutivas y sólo pueden ser revisables en reposición ante el propio Jurado, previo informe de la Junta de Gobierno. Resuelto el Recurso de reposición, se puede interponer ante los Tribunales de Justicia el recurso contencioso-administrativo.

5.2.- Gestión Indirecta

Denominamos de este modo, a la gestión llevada a cabo en colaboración con los órganos del Organismo de Cuenca o Confederación Hidrográfica que corresponda, y son:

- Consejo del Agua: Organismo de Planificación Hidrológica. Con la legislación actual los regantes se consideran muy poco representados, pues sólo un 15% es la representación de regantes en este importante órgano.

- Junta de Gobierno: Organismo de Gobierno del Organismo de Cuenca o Confederación Hidrográfica. Se adoptan decisiones sobre Presupuestos del Organismo, y en situaciones de sequía, al amparo de la Ley, adopta acuerdos sobre normas de riego. También los regantes se consideran muy poco representados, pues la Ley en vigor limita a un 15% su participación y sin embargo, utilizan más de un 70% del recurso de agua disponible y soportan más de un 50% de los gastos del Organismo de Cuenca que corresponda.

- Juntas de Explotación: Organismo de Gestión en el que se coordina la explotación de las obras hidráulicas y recursos de agua de una zona determinada.

- Comisión de Desembalses: Organismo de Gestión en el que se delibera y formula al Presidente del Organismo de Cuenca, los regímenes de vaciado y

llenado de los embalses y acuíferos para la campaña de riegos.

- Asamblea de Usuarios: De muy poca operatividad. De esta asamblea se eligen a los representantes de los usuarios en todos los órganos de gestión indirecta, relativos a la representación en los órganos de cada Cuenca Hidrográfica.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- ACEQUIA REAL DEL JUCAR (VALENCIA), 1992. Ordenanzas para el Régimen y Administración de la Comunidad de 1845 y modificadas en 1992.

- AL-MUDAYNA, 1991. Historia de los Regadíos en España. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.

- CABRERA DE LA COLINA, J.J. 1996. Comunidad de Propietarios Regantes del Pantano del Guadalquivir de Córdoba (1908-1985). Ed. Universidad de Córdoba.

- COMUNIDAD DE REGANTES DEL CAMPO DE CARTAGENA (MURCIA), 1992. Ordenanzas y Reglamentos de la Comunidad de 1952, modificadas en 1992.

- COMUNIDAD DE PROPIETARIOS REGANTES DEL PANTANO DEL GUADALMELLATO (CORDOBA), 1989. Estatutos de la Comunidad y Reglamento del Jurado de Riegos de 1908, modificados en 1989.

- DEL CAMPO GARCIA, A. 1994. Las Comunidades de Regantes Mecenas de los Abastecimientos. VII Congreso Nacional de Comunidades de Regantes. Castellón.

- DIEZ GONZALEZ, F. 1992. La España del Regadío y sus Instituciones básicas. Federación Nacional de Comunidades de Regantes de España y MOPU.

- MURILLO CUESTA, J. 1994. Comunidades de Regantes (Curso de IRYDA sobre Problemática del riego y regadío). Mecanografiado.

- SOUBRIER GONZALEZ, G. 1992. Asociaciones de Usuarios (Jornadas sobre Explotación de Sistemas de Riego. Aspectos Institucionales II). M.O.P.T. y C.E.D.E.X. Mecanografiado.