



Biomasa Forestal en Andalucía

1 | Modelo de existencias, crecimiento y producción. Coníferas

BIOMASA FORESTAL EN ANDALUCÍA. 1. Modelo de existencias, crecimiento y producción. Coníferas.

EDITA:

Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente. Junta de Andalucía

CONSEJERO DE AGRICULTURA, PESCA Y MEDIO AMBIENTE
Luis Planas Puchades

VICECONSEJERO DE AGRICULTURA, PESCA Y MEDIO AMBIENTE
Juan Antonio Cortecero Montijano

SECRETARIO GENERAL DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA
Sergio Moreno Monrové

DIRECTOR GENERAL DE GESTIÓN DEL MEDIO NATURAL
Francisco Javier Madrid Rojo

Este estudio se ha realizado con la financiación del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente a través del Fondo para el Aprovechamiento de la Biomasa Forestal Residual (Subconcepto 755.02) del Fondo del Patrimonio Natural de los Presupuestos Generales del Estado.

Coordinación:

José Ramón Guzmán Álvarez⁽¹⁾, Jaime González Seco⁽¹⁾, Joaquín Martínez Vila⁽²⁾.

Autores:

José Ramón Guzmán Álvarez⁽¹⁾, Javier Venegas Troncoso⁽²⁾, Ana Seseña Rengel⁽²⁾, María Luisa Sillero Almazán⁽²⁾, José Antonio Rodríguez Álvarez⁽³⁾.

Colaboradores:

Juan José Guerrero Álvarez⁽²⁾, Juan Jerónimo Leal Rodríguez⁽²⁾, Paloma Gómez González⁽²⁾, José Ignacio Morales Mesa⁽²⁾, Francisco Javier Salas Cabrera⁽²⁾, Francisco Salas Trujillo⁽¹⁾, Francisca María de la Hoz Rodríguez⁽¹⁾, Fernando González Marín⁽¹⁾, María José Colinet Carmona⁽⁴⁾, Sara Robles Fernández⁽⁴⁾, Amparo Manso Ramírez⁽⁴⁾, Guillermo Fernández Centeno⁽⁵⁾, Raúl Sánchez Salguero⁽⁶⁾.

⁽¹⁾ Dirección General de Gestión del Medio Natural. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente. Junta de Andalucía

⁽²⁾ Agencia de Medio Ambiente y Agua

⁽³⁾ Consultor Externo

⁽⁴⁾ Agencia Andaluza de la Energía

⁽⁵⁾ Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

⁽⁶⁾ Centro de Investigación Forestal (CIFOR-INIA) - Universidad de Córdoba

Fotografías y Figuras:

Agencia de Medio Ambiente y Agua, Jesús González-Cordero Ceballos, Daniel Burón Fernández, Mercedes Riera Gallardo, Javier Venegas Troncoso, José Ramón Guzmán Álvarez, Ricardo Montero Herranz, Noelia Jiménez López, Emma María Fuentenebro Arnillas, Antonio Jerez Fernández, Geoiberia.

I.S.B.N.:

978-84-92807-65-9

Depósito legal:

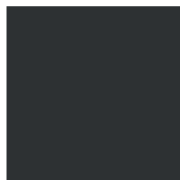
SE 3964-2012

Maquetación y diseño:

Geoiberia

Impresión:

Artes Gráficas Servigraf



Presentación

La extracción de biomasa en forma de madera, leñas y otros productos ha sido uno de los principales aprovechamientos que históricamente se han llevado a cabo en nuestros montes, hasta la revolución industrial y la utilización de materias fósiles como fuente de energía, caso del carbón, el gas o el petróleo.

Como toda actuación humana sobre la naturaleza, el uso de la biomasa forestal conllevó luces y sombras: cuando la demanda de leña para los hogares o de energía para las industrias superó los límites de la tasa de regeneración vegetal, se produjo la deforestación y, con ella, severos problemas ambientales como la desertificación o el empobrecimiento de nuestra fauna y flora.

Para compensar la pérdida de la cobertura forestal se llevaron a cabo trabajos especialmente intensos en las décadas centrales del siglo XX, sobre todo a raíz del impulso del Plan Nacional de Repoblaciones. Bajo unas circunstancias muy diferentes a las actuales, las repoblaciones aumentaron considerablemente la superficie forestal arbolada, en particular la cubierta por las cinco especies de pinos presentes bajo las condiciones mediterráneas de Andalucía: el pino piñonero, el carrasco, el negral o resinero, el salgareño y el silvestre.

Estas formaciones forestales forman parte hoy en día del paisaje y del patrimonio natural andaluz. Son sistemas forestales frágiles, que precisan de actuaciones técnicas que apoyen y guíen su evolución; pero, al mismo tiempo, son espacios con un gran potencial ecológico y productivo.

Estos pinares de repoblación aportan productos forestales renovables de gran calidad como madera, piña, setas o biomasa. Bajo su cobertura pueden desarrollarse otras especies vegetales y se comportan como nodrizas de otras formaciones, como encinares o alcornocales. Son territorios propensos, bien manejados, para aves o mamíferos amenazados.

Los pinares de repoblación requieren de nuestra atención. Así seguiremos obteniendo aprovechamientos a la par que su calidad mejora. Y evitaremos riesgos indeseables, como la ocurrencia de grandes incendios forestales o el decaimiento súbito asociado a densidades elevadas y al calentamiento de las temperaturas.

El Plan Forestal Andaluz, instrumento de planificación pionero en España, ya preveía en 1989 los posibles itinerarios futuros de los pinares de repoblación. Las sucesivas adecuaciones han profundizado en su carácter multifuncional y han corroborado su importancia para la sociedad andaluza como generadores de empleo, de renta y de paisaje y biodiversidad, lo que se ha traducido en las importantes inversiones forestales realizadas durante todo el periodo de aplicación del Plan Forestal.

En este contexto, el aprovechamiento como biomasa forestal de los pinares supone una gran oportunidad. La extracción responsable bajo criterios técnicos, basados en la aplicación del paradigma de la gestión forestal sostenible, permite disponer de una oferta de biomasa forestal para fines térmicos o eléctricos. Sin duda, un aprovechamiento perdurable, que debe convivir con otros usos, especialmente los que hacen posible la existencia del entramado industrial maderero andaluz.

Esta publicación cumple, justamente, esta finalidad: aportar conocimiento para planificar el aprovechamiento presente y futuro de la biomasa de los pinares de repoblación. Porque estimar lo que tenemos es el primer paso para proponer modelos de gestión particularizados para cada uno de nuestros montes públicos.

El buen estado de nuestros pinares está directamente vinculado al valor y al empleo que obtenemos de ellos, no solo a través de las funciones ecológicas, recreativas y paisajísticas sino también gracias al aprovechamiento de sus recursos como es el caso de la biomasa. Así como nos enseña la Ley Forestal de Andalucía, y nos dicta el sentido común.

Luis Planas Puchades
Consejero de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente

Índice

1	PLAN DE TRABAJO	9
2	OBJETIVO GENERAL	13
3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	21
	4.1. Metodología	22
	4.2. Resolución espacial	23
5	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE VEGETACIÓN Y DATOS DE PARCELAS DE INVENTARIO	25
	5.1. Materiales	26
	5.1.1. Parcelas del IFN3	26
	5.1.2. Proyectos de Ordenación	27
	5.1.2.1. Parcelas de Inventario	27
	5.1.2.2. División Dasocrática	30
	5.2. Metodología	32
	5.2.1. Parcelas de IFN3	32
	5.2.2. Proyectos de la Agencia de Medio Ambiente y Agua (anteriormente EGMASA)	33
	5.2.3. Proyectos de TRAGSATEC	33
	5.2.4. Proyectos de otras empresas	33
	5.3. Resultados	34
6	RECOPIACIÓN Y CÁLCULO DE VARIABLES AMBIENTALES	37
	6.1. Materiales	38
	6.1.1. Variables orográficas	38
	6.1.2. Variables climáticas	38
	6.1.2.1. Termométricas	38
	6.1.2.2. Pluviométricas	39
	6.1.3. Variables edáficas	40
	6.1.3.1. Información obtenida del estudio “Sistema de inferencia espacial de las propiedades físico-químicas e hidráulicas de suelos de Andalucía”	40
	6.1.3.2. Fuente de información para el cálculo de variables edáficas derivadas	42
	6.2. Planteamiento metodológico	43
	6.2.1. Variables orográficas	43
	6.2.2. Variables climáticas	44
	6.2.2.1. Termométricas	44
	6.2.2.2. Pluviométricas	47
	6.2.3. Variables edáficas	48
	6.2.3.1. Variables obtenidas a partir de la información proporcionada por el estudio “Sistema de inferencia espacial de las propiedades físico-químicas e hidráulicas de suelos de Andalucía”	48
	6.2.3.2. Variables edáficas derivadas	49
	6.3. Resultados	55
	6.4. Reducción, estandarización y eliminación de colinealidad de variables ambientales.	
	Análisis de componentes principales	56

7	DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE LAS ESPECIES DE PINOS	61
	7.1. Antecedentes y objetivos	62
	7.2. Materiales	63
	7.2.1. Mapa de Usos y Coberturas del Suelo de Andalucía escala 1:25.000, año 2007. Escala de detalle. (MUCVA)	63
	7.2.2. Información cartográfica Mapa Forestal Español (IFN3)	63
	7.2.3. Cartografía de vegetación 1:10.000 de la Masa Forestal de Andalucía, año 1996-2006. (VEGE10)	64
	7.2.4. Parcelas de inventario de los Proyectos de Ordenación de Montes Públicos de Andalucía	64
	7.3. Metodología	65
	7.4. Resultados	67
8	AUTOECOLOGÍA DE LAS ESPECIES DE PINOS	73
	8.1. Antecedentes y objetivos	74
	8.2. Metodología Caracterización Paramétrica	76
	8.2.1. Materiales	76
	8.2.1.1. Datos de inventario de las distintas especies del género <i>Pinus</i> . Parcelas del IFN3	76
	8.2.1.2. Variables ambientales	76
	8.2.2. Metodología	77
	8.2.3. Resultados y discusión	80
	8.3. Metodología MaxEnt	92
	8.3.1. Materiales	92
	8.3.1.1. Datos de presencia de las distintas especies del género <i>Pinus</i>	92
	8.3.1.2. Variables ambientales	92
	8.3.2. Metodología	92
	8.3.2.1. Configuración de MaxEnt	95
	8.3.3. Resultados	96
	8.4. Comparación de metodologías	106
	8.4.1. Comparación de resultados entre los dos métodos empleados: Autoecología paramétrica y MaxEnt	106
	8.4.2. Elección del método más apropiado para los fines de este estudio	108
9	CALIDAD DE ESTACIÓN FORESTAL	111
	9.1. Antecedentes y objetivo	112
	9.2. Materiales y metodología	114
	9.3. Resultados y discusión	122
10	MODELO DISTRIBUIDO DE CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE LAS MASAS DE PINOS EN ANDALUCÍA. ENFOQUE ESPACIO-TEMPORAL	131
	10.1. Introducción y antecedentes	132
	10.2. Materiales y métodos	134
	10.2.1. Formulación general del modelo	134
	10.2.2. Datos	138
	10.2.3. Homogeneización temporal de las variables dasométricas	139
	10.2.4. Interpolación espacial de las variables dasométricas (variables de estado)	139
	10.2.4.1. Densidad total e índice de competencia de otras especies	141
	10.2.4.2. Interpolación espacial del número de pies en clases diamétricas	142
	10.3. Resultados y discusión	143

Índice

11	RESULTADOS	149
11.1.	Introducción	150
11.2.	Resultados por grandes áreas forestales de pinar	154
11.3.	Resultados por provincias	172
12	MARCO DE REFERENCIA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA DE PINARES EN ANDALUCÍA	185
12.1.	Introducción	186
12.2.	La biomasa como fuente de energía	187
12.3.	La planificación energética y la planificación forestal: la biomasa como punto de encuentro	189
12.3.1.	Planificación energética y forestal en la Unión Europea	189
12.3.2.	Planificación energética y forestal en España	192
12.3.3.	Planificación energética y forestal en Andalucía	193
12.4.	La energía en Andalucía	196
12.4.1.	Contexto energético	196
12.4.2.	La aportación de la biomasa a la estructura energética de Andalucía	199
12.4.2.1.	Biomasa para uso eléctrico	201
12.4.2.2.	Biomasa para uso térmico	205
12.5.	Potencial de biomasa en los montes de Andalucía	208
12.5.1.	Autorizaciones para aprovechamientos forestales en montes públicos de Andalucía	208
12.5.2.	Potencial de biomasa en Andalucía de acuerdo con el Plan de Energías Renovables de España 2011-2020	209
12.5.3.	Fijación de carbono de los sistemas forestales andaluces	213
12.5.4.	Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal	214
12.5.5.	Potencial de biomasa de Andalucía 2010. Estimación de la Agencia Andaluza de la Energía	215
12.6.	Un modelo para la biomasa forestal de Andalucía	216
12.6.1.	Recapitulación de la biomasa forestal como fuente de energía	216
12.6.2.	Algunas lecciones aprendidas y retos para el futuro próximo	219
13	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	227

1. Radiación terrestre y número máximo de horas de Sol	238
2. Sistema de inferencia espacial de propiedades físico-químicas e hidráulicas de los Suelos de Andalucía. Resumen	242
3. Variables edáficas derivadas. Funciones de predicción y parámetros de los variogramas	252
4. Resumen estadístico de las variables ambientales	256
4.1. Altitud (m)	257
4.2. Pendiente (grados)	257
4.3. Curvatura media (1/m)	257
4.4. Orientación (grados)	258
4.5. Insolación (adimensional)	258
4.6. Precipitación anual (mm)	258
4.7. Precipitación de invierno (mm)	259
4.8. Precipitación de primavera (mm)	259
4.9. Precipitación de verano (mm)	259
4.10. Precipitación de otoño (mm)	260
4.11. Temperatura media anual (°C)	260
4.12. Temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)	260
4.13. Temperatura media de las máximas del mes más cálido (°C)	261
4.14. Oscilación térmica media (°C)	261
4.15. Temperatura media del mes más frío (°C)	261
4.16. Temperatura media del mes más cálido (°C)	262
4.17. Oscilación térmica total (°C)	262
4.18. Evapotranspiración de referencia anual (mm)	262
4.19. Suma de superávits (mm)	263
4.20. Suma de déficits (mm)	263
4.21. Duración de la sequía (meses)	263
4.22. Índice hídrico anual (adimensional)	264
4.23. Arena (%)	264
4.24. Limo (%)	264
4.25. Arcilla (%)	265
4.26. Profundidad del suelo (cm)	265
4.27. Conductividad hidráulica saturada (cm/día)	265
4.28. Materia orgánica (%)	266
4.29. Materia orgánica superficial (%)	266
4.30. pH	266
4.31. Tierra fina (%)	267
4.32. Caliza activa (%)	267
4.33. Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 gr)	267
4.34. Porcentaje de saturación de bases (%)	268
4.35. Nitrógeno superficial (%)	268
4.36. Capacidad de retención del agua (mm/m)	268
5. Curvas de respuestas de las variables ambientales	270



1

Plan de trabajo

Este estudio forma parte de los trabajos emprendidos por la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente para aumentar el conocimiento sobre el aprovechamiento de la biomasa forestal en Andalucía. Complementa desde la óptica forestal los trabajos que se han llevado a cabo en los sectores agrícola y ganadero en el marco de las acciones para el impulso de la producción y el uso de la biomasa agraria en Andalucía” (entre ellos, el estudio “Potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en Andalucía”).

Ha contado con la financiación del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente a través del Fondo para el Aprovechamiento de la Biomasa Forestal Residual (Subconcepto 755.02) del Fondo del Patrimonio Natural de los Presupuestos Generales del Estado.

El estudio se describe de modo sintético en el proceso metodológico ilustrado en el esquema de la **Figura 4.1** del que se deriva como resultado un modelo de existencias, crecimiento y producción de las cinco especies de pino presente en Andalucía: pino carrasco, pino piñonero, pino negral o resinero, pino salgareño y pino silvestre.

Si bien en esta publicación se presenta una síntesis ilustrativa de los resultados finales, su cometido principal es exponer de manera detallada los materiales de partida y los métodos que se han seguido en la modelización. Para ello, en cada capítulo se aborda una fase metodológica, presentando los resultados parciales derivados de su aplicación. Para facilitar la lectura, al principio de cada uno de los capítulos se ha situado la fase metodológica correspondiente en el contexto del esquema general del trabajo.



Tanto los resultados parciales de las diferentes fases metodológicas como los resultados finales (modelo de existencias, crecimiento y producción) se presentan en forma de coberturas de información territorial con una escala de resolución de 100 x 100 metros que se han integrado en la Red de Información Ambiental de Andalucía, con posibilidad de ser descargadas desde la página web de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.

Si bien el resultado final es aplicable a estudios y proyectos futuros relacionados con el aprovechamiento sostenible de la biomasa forestal en Andalucía, hay que destacar que los resultados obtenidos en cada una de las etapas metodológicas entran dentro del ámbito de los estudios básicos y aplicados de ecología forestal y silvicultura, pudiendo ser de utilidad en estas u otras disciplinas.

Se ha incluido un último capítulo de recapitulación y discusión con la finalidad de contextualizar los resultados en el marco actual del aprovechamiento energético de la biomasa, proponiendo por último algunas recomendaciones para el futuro desarrollo de este tipo de aprovechamiento a partir de las lecciones aprendidas en este y otros trabajos relacionados.





2

Objetivo general

El objetivo de este trabajo es estimar el volumen de existencias de biomasa de las especies de pinos presentes en el territorio andaluz. Este estudio está motivado por el gran interés actual en el aprovechamiento sostenible de la biomasa forestal como materia prima para la generación de energía. La utilización de parte de esta biomasa forestal, entendida como recurso, de manera compatible con otros usos y funciones de los sistemas forestales que la originan, requiere de una planificación adecuada que permita una oferta predecible.

Como condición inicial para abordar esta planificación es esencial conocer las existencias de biomasa en los montes, de manera que se puedan determinar los criterios de gestión forestal sostenible más sensatos desde el punto de vista ambiental y operativo.







3

Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo último de este trabajo (determinar las existencias de biomasa por unidad de superficie de los montes de Andalucía), es preciso elaborar previamente información de base que forme parte del modelo que genere los resultados finales, como la cartografía territorial de detalle de la distribución potencial y actual de cada una de las especies estudiadas y la distribución de la calidad de estación de las especies de pinos.

Por otro lado, el modelo de existencias propuesto permite elaborar modelos de producción complejos, basados en fundamentos de ecología forestal, y apoyados sobre análisis territoriales de multitud de variables explicativas, gestionadas y manipulados mediante sistemas de información geográfica.



A continuación, se relacionan los hitos metodológicos (objetivos específicos) necesarios para alcanzar el objetivo general:

- Recopilación, homogeneización y depuración de la información dasométrica y dasocrática disponible para las cinco especies de pinos que forman parte del estudio; particularmente a partir de los Proyectos de Ordenación Forestal de Montes Públicos y de la Información sobre vegetación disponible en la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) y del Inventario Forestal Nacional en su Tercera Edición (I.F.N.3).
- Recopilación y cálculo de variables ambientales o parámetros definitorios del biotopo.
- Estudio de la autoecología de los pinares andaluces.
- Distribución potencial de las cinco especies de pinos.
- Determinación de la calidad de estación forestal e índice de sitio.
- Estudio y determinación espacial de la distribución actual.
- Obtención de modelos de crecimiento y producción (funciones de transición) que permitan la estandarización temporal de la información dasométrica existente (variables de estado).
- Regionalización e interpolación espacial de las variables de estado actualizadas temporalmente.



4

Planteamiento metodológico

4.1. Metodología

El desarrollo metodológico de este estudio ha supuesto integrar una gran cantidad de información original y diseñar procedimientos para convertir esta información en parámetros y variables que alimenten el modelo propuesto para el cálculo de existencias de biomasa.

El esquema sintético de la metodología seguida se muestra en la **Figura 4.1**, que representa bajo la forma esquemática de diagrama de flujo, el procedimiento empleado en la elaboración de los Modelos Distribuidos de Crecimiento y Producción Territorial de Andalucía para las especies del género *Pinus* más representativas en nuestra superficie forestal: *Pinus halepensis* Mill., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus pinea* L., *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco y *Pinus sylvestris* L.

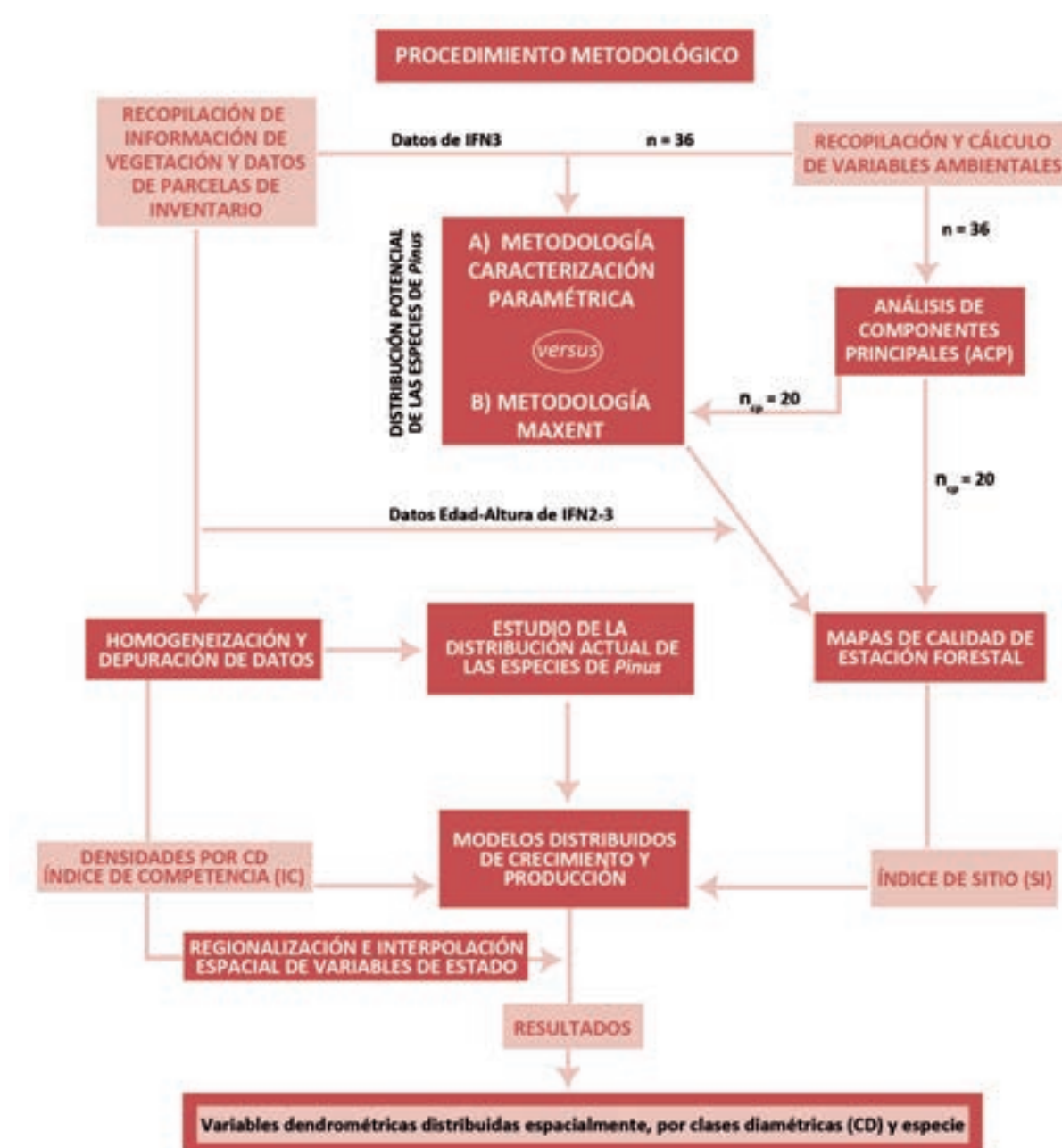


Figura 4.1. Esquema general metodológico

4.2. Resolución espacial

Previamente a la exposición metodológica, es importante presentar la resolución espacial que determina los resultados del estudio.

La primera decisión que se adoptó para el desarrollo de la presente metodología fue la elección de la resolución espacial (tamaño de píxel) de la cuadrícula de trabajo. De acuerdo con la extensión de la superficie de estudio, la disponibilidad de datos ambientales y dasométricos para cada especie del género *Pinus* y el coste de cálculo, se determinó que la resolución de 100 m garantiza un adecuado equilibrio entre el grado de detalle de las fuentes utilizadas, la precisión de los resultados y los recursos necesarios para efectuar los cálculos (McBRATNEY *et al.*, 2003; HENGL, 2006). Consecuentemente, todos los mapas temáticos utilizados y generados en este trabajo se han adaptado a la referencia espacial definida por esta cuadrícula de trabajo (retícula de 100 m x 100 m).

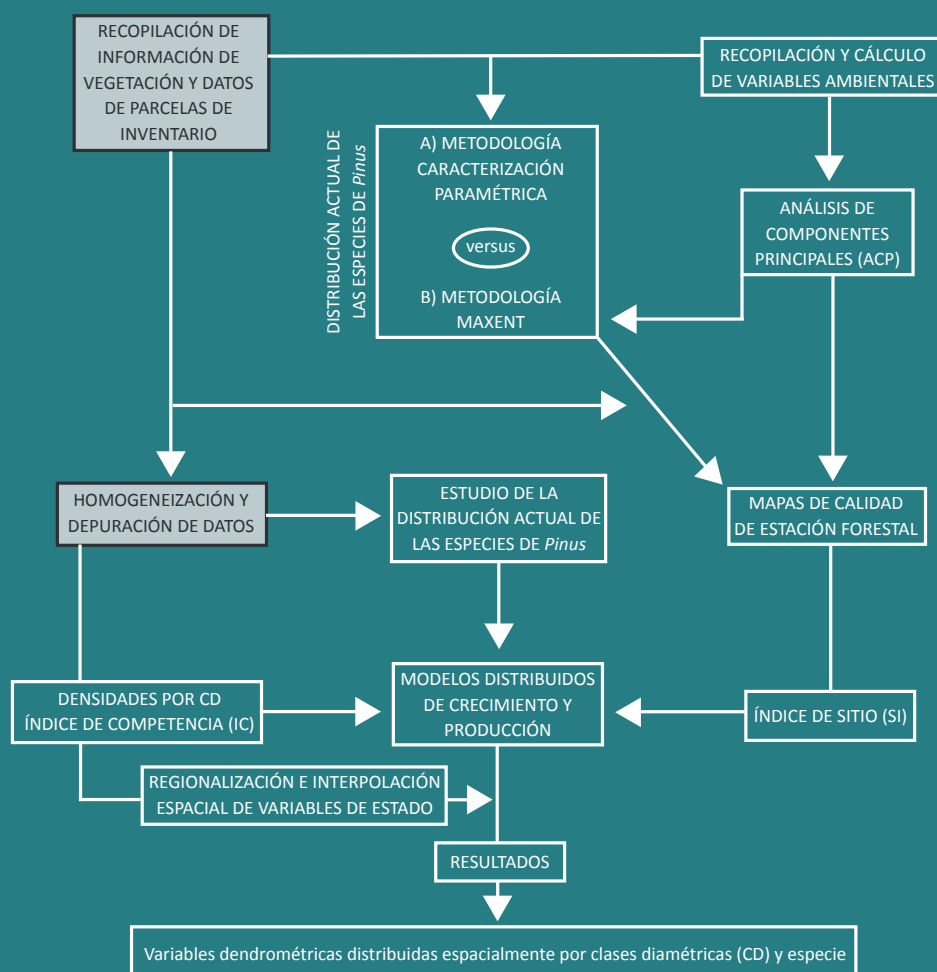
Es bien conocida la influencia decisiva de la resolución espacial sobre las variables ambientales, que exhiben diferente comportamiento y estructura espacial en función de la escala de representación utilizada. Por esta razón, debe remarcarse que la resolución espacial adoptada en este trabajo (100 m), además de otras posibles pérdidas de información derivadas de otras decisiones metodológicas, determina la calidad de los resultados y, especialmente, su capacidad de ajustarse a condiciones locales precisas. En relación con esto, el enfoque del estudio está especialmente indicado para obtener resultados de las variables de crecimiento, producción y biomasa a escala regional y con grado menor de precisión, a escala comarcal, lo que supone escalas de trabajo comprendidas entre 1:50.000 y 1:100.000. Sus resultados deben ser interpretados con mayor cautela en estudios de mayor detalle (locales).





5

Recopilación de información de vegetación y datos de parcelas de inventario



5.1. Materiales

5.1.1. Parcelas del IFN3

Los datos provinciales extraídos tras la realización de las parcelas del IFN3 (MARM, 2008) fueron proporcionados por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

El soporte en el que se proporcionaron los datos fueron bases de datos en ACCESS® y coberturas de vegetación en formato .e00 (Cobertura Arc-INFO® comprimida), con hasta tres niveles de desagregación para las teselas de vegetación arbórea.

El número de parcelas de inventario por provincias y el año de ejecución se detallan en la **Tabla 5.1**.

Tabla 5.1. Número de parcelas de inventario IFN3 y año de ejecución

PROVINCIA	NÚMERO DE PARCELAS	AÑO EJECUCIÓN INVENTARIO
Almería	838	2007
Cádiz	1.025	2007
Córdoba	1.053	2006
Granada	1.309	2007
Huelva	1.951	2008
Jaén	1.582	2006
Málaga	1.023	2007
Sevilla	1.060	2007
Total	9.841	

La metodología del IFN establece como puntos de muestreo los vértices de la malla kilométrica de la cartografía UTM que estén dentro de zonas clasificadas como arboladas. El resultado es un reparto de la muestra en los estratos con afijación proporcional a la cabida, con establecimiento sistemático de arranque aleatorio y con una intensidad de muestreo, generalmente, de una parcela por kilómetro cuadrado (100 hectáreas) (MMA, 1998).

El modelo de datos y la información contenida en las bases de datos de las parcelas de inventario de vegetación se puede consultar en la documentación explicativa del IFN3 ("Descripción de los códigos de la base de datos de campo y descripción de los códigos de la base de datos del SIG).

5.1.2. Proyectos de Ordenación

5.1.2.1. Parcelas del inventario

Los Proyectos de Ordenación de los montes públicos son aprobados por la Consejería de Medio Ambiente, si bien son elaborados por distintas empresas bajo la dirección de técnicos de la Consejería, que realizan los inventarios de campo, analizan la información y redactan los documentos que componen estos proyectos.

La gran diversidad de los sistemas forestales y de los usos posibles que se pueden presentar hoy en día en los mismos aconseja plantear como norma general en los Proyectos o Planes Técnicos de Ordenación un modelo de inventario versátil y flexible que concentre los esfuerzos para responder a las necesidades de cada caso concreto de planificación (siempre en consonancia con las especificaciones de las Instrucciones de Ordenación) y cuyo diseño detallado responde a los aspectos que sean relevantes en cada monte.

El diseño del inventario debe contemplar, por un lado, la obtención de información sobre las variables ambientales del sistema forestal que permita planificar correctamente su manejo, y, por otro, información que permita organizar adecuadamente y de forma sostenible los usos y aprovechamientos de los recursos del monte. Ambos aspectos están, obviamente, relacionados e integrados en un único inventario que permite recopilar toda esta información.

En definitiva, y en consonancia con una de las recomendaciones dadas en el Manual de Ordenaciones de Montes de Andalucía (CMA, 2004a), no existe un único modelo de inventario, sino que, cumpliendo unos mínimos que garanticen obtener unos resultados que permitan el manejo adecuado del sistema forestal y su persistencia, cada proyectista podrá diseñar su propio modelo de inventario de acuerdo con los procedimientos que, para cada uno de los aspectos mencionados, se establecen en las Instrucciones Generales para la Ordenación de Montes de la Comunidad Andaluza (I.G.O.M.C.A.). Esta característica del modelo de inventario, si bien dota de flexibilidad y adaptabilidad a las condiciones de cada monte, tiene importantes implicaciones en el momento de abordar un proceso de estandarización de la información procedente de los distintos inventarios, tarea que se ve facilitada por la utilización de plantillas semejantes por las diferentes empresas proyectistas.

La fase de recopilación documental identificó los proyectos de ordenación de montes públicos con potencial interés para este estudio. De éstos, se descartaron 36 por los siguientes motivos: proyectos con revisión ya realizada y en vigencia que actualizan la versión anterior, inclusión de parcelas de inventario sin localización espacial (no georreferenciadas), ausencia de datos espaciales, modelo de datos difícilmente homogeneizable, etc.

Los 174 proyectos de ordenación consultados incluyen un total 90.142 parcelas de inventario que se han tenido en cuenta para este estudio (**Tabla 5.2 y Figura 5.1**).



Tabla 5.2. Número de Proyectos de Ordenación de Montes Públicos y parcelas de Inventario. Información dasométrica

PROVINCIA	Nº PROYECTOS	Nº PARCELAS	FUENTE	Nº PROYECTOS	Nº PARCELAS
Almería	5	4.462	Egmasa	92	52.266
Cádiz	32	7.446	Tragsatec	28	17.635
Córdoba	17	9.099	Otras empresas	54	20.241
Granada	25	13.610	Total	174	90.142
Huelva	22	15.305			
Jaén	34	27.700			
Málaga	30	8.870			
Sevilla	9	3.650			
Total	174	90.142			

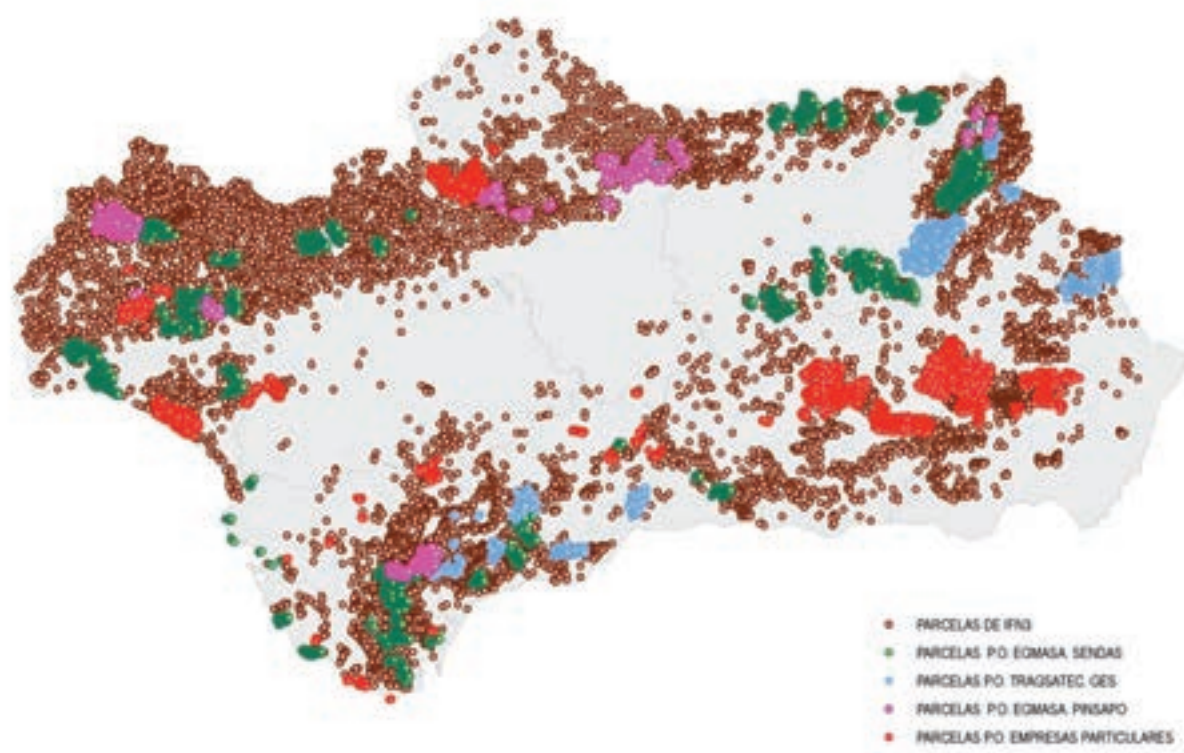


Figura 5.1. Distribución espacial de la parcelas de inventario del IFN3 y proyectos de ordenación utilizados en este estudio

Usualmente, cada empresa emplea una estructura tipo de presentación de datos de inventario, por los que para generar una única base de datos georreferenciada ha sido preciso homogeneizar la información disponible, creando un único modelo de datos (**Tabla 5.3**).

Tabla 5.3. Modelo de Datos

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Fuente:	Procedencia de los datos detallada
Fuente2:	Procedencia de los datos sintética
Prov:	Código numérico de la provincia
Provincia:	Código Provincia INE Siglas
Registro:	Código asignado al Proyecto de Ordenación de Montes Públicos en el Servicio de Gestión Sostenible de la CMA o número de parcela asignada en IFN3. En caso de no existir código en BD, se le ha dado una nomenclatura provisional hasta su aprobación definitiva
CoorX:	Coordenadas X UTM ED1950 Zone 30N
CoorY:	Coordenadas Y UTM ED1950 Zone 30N
Año_Inv:	Año de ejecución del Inventario
Especie:	Código especie según el IFN3
N_Cientifi:	Nombre científico de la especie
Dnm_i:	Diámetro normal medio de la especie y clase diamétrica correspondiente (i)
Npies_i:	Número de pies/ha de la especie y clase diamétrica correspondiente (i)
AB_i:	Área basimétrica en m ² /ha de la especie y clase diamétrica correspondiente (i)
VCC_i:	Volumen con corteza de fuste de la especie y clase diamétrica correspondiente (i), expresado en m ³ /ha
VLE_i:	Volumen de leñas de la especie y clase diamétrica correspondiente (i), expresado en m ³ /ha
IAVC_i:	Incremento anual de volumen con corteza de la especie y clase diamétrica correspondiente (i), expresado en m ³ /ha/año
HTm_i:	Altura media de los pies arbóreos de la especie presentes en la parcela y clase diamétrica correspondiente (i), expresada en m
Comp_i:	Competencia arbórea en la parcela para la especie y CD considerada, calculada como la resta de la densidad total menos la densidad de la especie y clase diamétrica correspondiente. Expresado en n°pies/ha
D_total:	Densidad total arbórea presente en la parcela, expresada en pies/ha
Total_Npie:	Suma de las densidades de las distintas CD para la misma especie dentro de la misma parcela. Expresado en pies/ha
Total_AB:	Suma del Área basimétrica de las distintas CD para la misma especie dentro de la misma parcela. Expresado en m ² /ha
Total_VCC:	Suma del volumen con corteza de las distintas CD para la misma especie dentro de la misma parcela. Expresado en m ³ /ha
Total_VLE:	Suma del volumen de leñas de las distintas CD para la misma especie dentro de la misma parcela. Expresado en m ³ /ha
Total_IAVC:	Suma del incremento anual de volumen con corteza de las distintas CD para la misma especie dentro de la misma parcela. Expresado en m ³ /ha/año

Para la homogenización de las clases diamétricas se han considerado los siguientes intervalos (**Tabla 5.4**):

Tabla 5.4. Intervalos de Clases diamétricas

CD	INTERVALO (cm)
10	7,5-12,5
15	12,5-17,5
20	17,5-22,5
25	22,5-27,5
30	27,5-32,5
35	32,5-37,5
40	37,5-42,5
45	42,5-47,5
50	47,5-52,5
55	52,5-57,5
60	57,5-62,5
65	62,5-67,5
70	67,5-72,5
75	72,5-77,5
80	77,5-82,5
85	82,5-87,5
90	87,5-92,5
95	92,5-97,5
100	97,5-102,5
105	102,5-107,5
110	107,5-112,5
115	>112,5

5.1.2.2 División Dasocrática

Además de la recopilación de las parcelas de inventario que permite contar con la información dasométrica de los proyectos de ordenación, se ha reunido la información cartográfica correspondiente a la *División Dasocrática* de los mismos, si bien esta información no es parte sustancial del procedimiento metodológico establecido en este estudio, se ha considerado interesante, una vez inmerso en el proceso de recopilación y homogeneización de datos de los proyectos de ordenación, proceder a su presentación como información adicional y complementaria del presente trabajo.

En la Ordenación de montes, las características dasocráticas hacen referencia a los aspectos estratégicos relacionados con la organización espacio-temporal de las actuaciones sobre la vegetación forestal, principalmente arbórea, en el estado final. Para este fin, el proceso de planificación incluye la división dasocrática del monte a partir de unidades denominadas secciones que, a su vez, se subdividen en unidades menores (cuarteles, cantones y rodales). Esta delimitación constituye la base de la organización espacio-temporal de las actuaciones selvícolas y de las soluciones adoptadas para compatibilizar los diferentes usos.

La división dasocrática parte del criterio técnico y se ajusta a las características propias del método de ordenación elegido en cada proyecto.

Del mismo modo que se comentó para las parcelas de inventario, cada empresa redactora tiene su propia estructura de presentación de esta información, por lo que una vez recopilada se procedió a una labor de homogeneización y generación de un único modelo de datos (**Tabla 5.3**).

Como se ha indicado con anterioridad, el número inicial de Proyectos de Ordenación revisados para la recopilación de datos fue de 210. De éstos, 37 proyectos fueron descartados en la aplicación de este apartado metodológico por ausencia de cartografía digital georreferenciada y apta para su integración en un único modelo de datos.

Tabla 5.5. Número de Proyectos de Ordenación de Montes Públicos. Información dasocrática

PROVINCIA	Nº PROYECTOS	FUENTE	Nº PROYECTOS
Almería	6	Egmasa	87
Cádiz	31	Tragsatec	27
Córdoba	18	Otras empresas	59
Granada	25	Total	173
Huelva	21		
Jaén	33		
Málaga	30		
Sevilla	9		
Total	173		

En la **Tabla 5.6** se muestra el modelo de datos resultante para la información dasocrática, pudiendo además consultarse en los metadatos disponibles de la geodatabase a través de la sección Red de Información Ambiental de la página web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

Tabla 5.6. Modelo de datos Información Dasocrática

CAMPO	DESCRIPCIÓN
<i>PROV_INE</i>	Código numérico de la provincia en el cual está incluido el monte. En el caso de que un monte se encuentre incluido en varias provincias, se añade el código de la provincia más representativa, es decir, el código de la provincia en el cual se localice una mayor superficie del monte
<i>PROV_COD</i>	Dos primeras iniciales de la provincia en la cual está incluido el monte. En el caso de que un monte se encuentre incluido en varias provincias, se añade las iniciales de la provincia más representativa, es decir, el de la provincia en el cual se localice una mayor superficie del monte
<i>PO_COD</i>	Código del instrumento de ordenación. Es el identificador del proyecto de ordenación. En caso de no existir código, se le ha asignado un código provisional
<i>ANO_APR</i>	Año en el que se aprobó el Proyecto de Ordenación o Plan Técnico del Monte Público
<i>SEC_ID</i>	Identificador de la sección en la división dasocrática del proyecto o plan técnico de ordenación. Es decir, corresponde al número de la sección del monte
<i>CUARTEL</i>	Identificador del cuartel en la división dasocrática del proyecto o plan técnico de ordenación de estudio. Corresponde a la letra del cuartel
<i>CANTON</i>	Identificador del cantón en la división dasocrática del proyecto o plan técnico de ordenación de estudio. Corresponde al número del cantón
<i>RODAL</i>	Identificador del rodal. El identificador del rodal comienza por la primera letra del abecedario y en minúscula
<i>ROD_ID</i>	Identificador completo del rodal en la división dasocrática del proyecto o plan técnico de ordenación de estudio. Es decir, corresponde a la letra del rodal, antecedida por el número de la sección, letra del cuartel y cantón en donde se encuadra dicho rodal
<i>TRAMO</i>	Código del tramo al que pertenece el rodal. Está expresado con números romanos
<i>OBSERV</i>	Campo en el que se introduce cualquier aspecto de interés que se crea conveniente detallar
<i>FECHA_VIGENCIA</i>	Fecha de fin de vigencia del proyecto o plan técnico de ordenación

5.2. Metodología

La recopilación de información sobre la vegetación y los datos de parcelas de inventario, la estandarización de los datos y su preparación para incorporarlos a los subsecuentes análisis se ha efectuado según distintos procedimientos en función de la fuente de información de origen.

5.2.1. Parcelas de IFN3

La información suministrada por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente estaba incluida en dos bases de datos (MARM, 2008):

- Base de datos de campo: correspondiente a los datos del levantamiento de las parcelas, que ofrece información relativa a la parcela y los valores recogidos en el inventario del estrato arbóreo y arbustivo.
- Base de datos de SIG: información correspondiente a las parcelas ya procesadas a partir de los datos obtenidos en el inventario (Densidad y Área Basimétrica, por Clase Diamétrica y Especie) y de las ecuaciones y tarifas aplicables que permiten obtener los parámetros dendrométricos característicos por especie y situación geográfica.

A partir de esta información, mediante consultas a las distintas bases de datos, se obtuvieron los datos necesarios para las fases posteriores de este estudio:

- Identificador de parcela de inventario, coordenada UTM X e Y y fecha de levantamiento.
- Para cada parcela, especie y clase diamétrica: Densidad (pies/ha), Área basimétrica, AB (m^2/ha), Volumen con corteza, VCC (m^3/ha), Volumen de leñas, VLE (m^3/ha) e Incremento anual de volumen con corteza, IAVC ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$).
- Para cada parcela con presencia de pinos y con datos de edad se calcula el valor medio de la altura de los pies mayores inventariados.

Cabe destacar que si bien estos datos han sido obtenidos en su totalidad de las parcelas del IFN3, los valores de edad para masas regulares y coetáneas de coníferas proceden también de las parcelas de inventario del IFN2 (MMA, 1998) (**Tabla 5.7**) en aquellas parcelas no levantadas en el IFN3.

Tabla 5.7. Parcelas con datos de Edad.

ESPECIE	PARCELAS IFN2	PARCELAS IFN3	PARCELAS TOTALES
<i>Pinus halepensis</i>	134	317	451
<i>Pinus pinaster</i>	125	321	446
<i>Pinus pinea</i>	139	422	561
<i>Pinus nigra</i>	44	277	321
<i>Pinus sylvestris</i>	47	196	243

5.2.2. Proyectos de la Agencia de Medio Ambiente y Agua (anteriormente EGMASA)

Hasta el año 2008, EGMASA utilizaba una aplicación llamada SENDAS en la elaboración de los proyectos de ordenación. Para recopilar la información de estos proyectos, se traspasaron los datos del programa SENDAS a una base de datos volcada a ACCESS®.

Los datos procedentes de SENDAS se han aplicado a tarifas de cubicación ajustadas para cada monte, sección, cuartel y cantón, con una entrada única en función del diámetro. Estas tarifas se han obtenido mediante ajustes de regresión de las tarifas de cubicación del IFN2 para cada provincia.

A partir del año 2008, el tratamiento de los datos de inventario pasó a hacerse mediante el programa PINSAPO, que permite un tratamiento más directo de la información.

De igual forma, se obtuvieron los resultados de las tarifas de cubicación ajustadas para cada monte, sección, cuartel o cantón.

5.2.3. Proyectos de Tragsatec

La empresa TRAGSATEC entrega en cada proyecto archivos denominados GES que aportan bases de datos en formato DBF (archivo de dBASE, formato simple de almacenamiento de datos estructurados). Se han extraído de cada proyecto tres tipos de archivos de los cuales se obtienen: datos de pies mayores, en el que se incorporan las existencias por clase diamétrica y parcela; fecha en la que se inventarió cada parcela; y tarifas de cubicación ajustadas para cada monte, sección, cuartel, tramo, cantón y especie.

A esta información se le añaden campos con las coordenadas X e Y en UTM calculadas a partir de las coberturas de parcelas, siempre que éstas estén localizadas en los proyectos de ordenación, así como el código de registro del monte y la provincia en la que se localiza.

5.2.4. Proyectos de otras empresas

Cada empresa tiene una forma particular de estructura y elaboración de datos de inventario, si bien existe una homogeneidad en los proyectos elaborados por cada una de ellas.

Para resolver el problema de la heterogeneidad que se presenta en estos datos, se implementó una metodología de trabajo particularizada para cada empresa con el fin de localizar, estandarizar y adecuar la información al modelo de datos establecido para el desarrollo del presente estudio.

5.3. Resultados

Una vez recopilada toda la información de los proyectos de ordenación se procedió a su normalización empleando el modelo de datos propuesto en la **Tabla 5.3**, dando como resultado una geodatabase espacial consultable en la página web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía a través de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).

La información contenida en la geodatabase espacial procede de los datos recogidos a fecha del levantamiento del inventario dasométrico en las parcelas de los distintos proyectos de ordenación. En aquellos casos en que alguna de las variables contempladas en el modelo de datos faltase en la información original, se procedió a su estimación mediante las ecuaciones propias para cada especie incluida en los proyectos de ordenación; si éstas no existieran, la estimación se realizó a partir de los modelos del IFN3 para la provincia concreta. Este último procedimiento se llevó a cabo puntualmente para proyectos de ordenación (4% de los analizados) cuya especie principal era una distinta de las de estudio (Quercíneas, Eucaliptos, etc.) y por ello no se contaba con tarifas propias para pinos.

En aras a la calidad de los resultados, se llevó a cabo la depuración de los datos dendrométricos ofrecidos por las distintas empresas redactoras, comparando la información de partida de las parcelas de inventario con los datos que se obtienen empleando las ecuaciones del IFN3. A raíz de este análisis, se descartaron los datos de las parcelas de inventario de los proyectos de ordenación que no tuviesen un coeficiente de correlación superior a 0,7 con los ofrecidos por las supertarifas del IFN3 (7% de los proyectos analizados), sustituyendo en estos casos los datos originales por los valores resultantes de aplicar las tarifas del IFN3 correspondientes.

También se revisaron exhaustivamente las parcelas, detectando las duplicadas procedentes de distintas fuentes (es decir, diferentes parcelas de inventario ubicadas en el mismo emplazamiento definido por similares coordenadas UTM), seleccionando la fuente de información más fiable o actualizada, con el fin de evitar que en los análisis estadísticos posteriores pudieran producirse desviaciones en los modelos. Para ello se elaboró a través del programa ACCESS® una consulta en la que se detectaron las parcelas duplicadas y la fuente de la que procedían. Los resultados de valores duplicados fueron analizados, determinando aquellas que debían eliminarse y dejando siempre la fuente más actualizada o de mayor fiabilidad.

A modo de resumen, en las **Tablas de 5.8, 5.9 y 5.10**, se muestran los datos cuantitativos de la geodatabase resultante para las parcelas de inventario y división dasocrática:

Tabla 5.8. Resumen cuantitativo geodatabase. División dasocrática

PROVINCIA	Nº P.O.	Nº DE CUARTELES	Nº DE CANTONES	Sup. con división dasocrática (ha)	Parcelas Inventario P.O.	Parcelas Inventario IFN3	P.O. vigentes a enero de 2012	P.O. pendiente de aprobación	P.O. sin vigencia a diciembre de 2011
Almería	6	25	98	25.499,42	4.462	115	6		
Cádiz	31	95	495	29.921,24	7.404	104	29	1	1
Córdoba	18	54	831	48.414,48	8.840	198	10	6	2
Granada	25	119	1.242	94.729,63	13.594	347	24		1
Huelva	21	125	2.153	95.272,22	13.327	306	17	4	
Jaén	33	147	2.104	119.249,35	24.854	541	28	4	1
Málaga	30	80	777	57.495,43	8.324	309	30		
Sevilla	9	31	426	16.276,07	3.402	46	9		
TOTAL	173	676	8.126	486.857,83	84.207	1.966	153	15	5

Tabla 5.9. Resumen cuantitativo geodatabase. Distribución del número de muestras entendidas como la desagregación de las parcelas de inventario por especie y clase diamétrica

NOMBRE CIENTÍFICO	PRESENCIA EN PARCELAS DE INVENTARIO	MUESTRAS (Desagregación de parcelas por CD y especie) CLASES DIAMÉTRICAS													TOTAL
		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	
<i>Pinus halepensis</i>	19.634	7.281	12.245	12.447	11.216	9.051	6.448	4.014	2.449	1.303	695	353	138	145	67.785
<i>Pinus nigra</i>	16.638	6.815	11.680	10.437	8.531	6.687	5.187	3.981	3.078	2.284	1.650	1.094	653	708	62.785
<i>Pinus pinaster</i>	21.365	6.183	12.177	13.131	12.398	10.024	7.497	5.069	3.535	2.140	1.291	609	388	272	74.714
<i>Pinus pinea</i>	23.700	9.120	14.232	13.675	12.073	9.429	6.353	3.725	2.048	961	422	161	92	74	72.365
<i>Pinus sylvestris</i>	3.214	1.917	2.494	2.058	1.353	703	325	154	85	43	29	15	9	13	9.198
Total Pinus	84.551	31.316	52.828	51.748	45.571	35.894	25.810	16.943	11.195	6.731	4.087	2.232	1.280	1.212	286.847
Otras especies	59.595	25.962	33.060	23.272	17.385	13.081	10.318	8.084	7.044	5.246	3.711	2.471	1.999	3.518	155.151
Total general	144.146	57.278	85.888	75.020	62.956	48.975	36.128	25.027	18.239	11.977	7.798	4.703	3.279	4.730	441.998

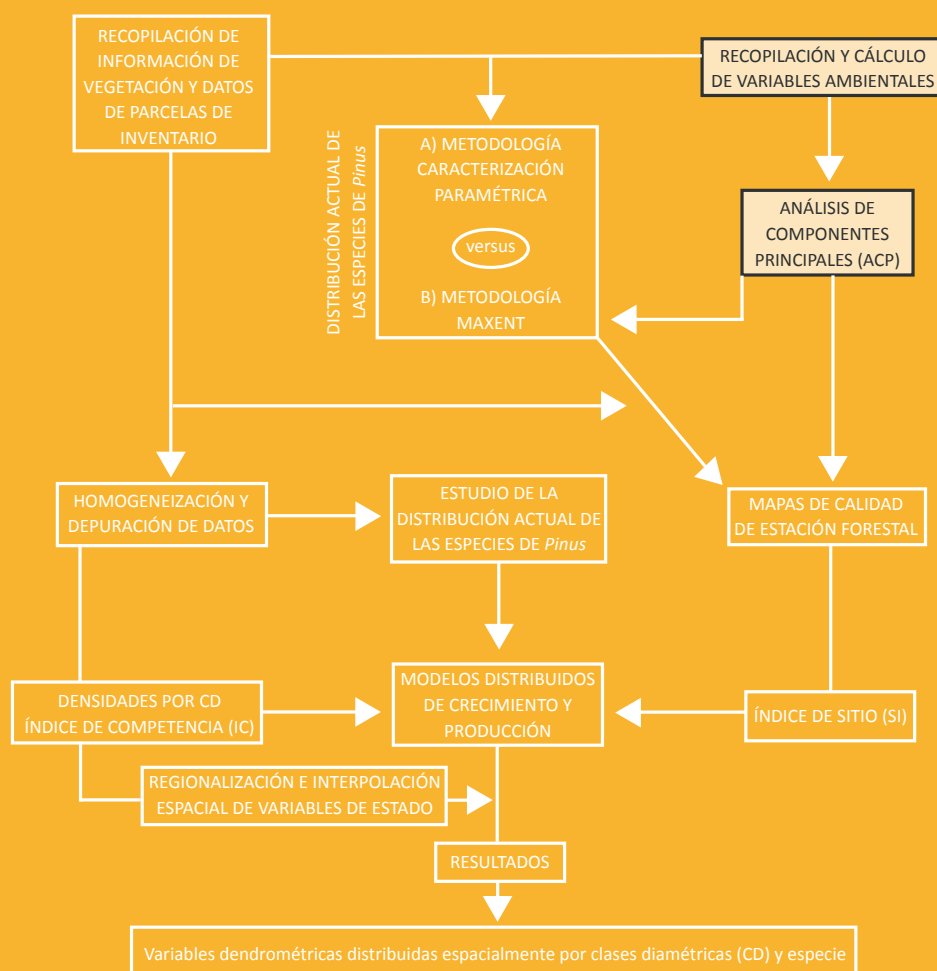
Tabla 5.10. Resumen cuantitativo geodatabase. Distribución del número de muestras procedentes de la desagregación de las parcelas de inventario por provincia y empresa redactora del P.O.

PROVINCIA	FUENTE	Nº PARCELAS	Nº MUESTRAS
Almería	IFN3	838	2.995
	Tragsatec	2.472	9.685
	Otras empresas	1.990	6.869
Cádiz	IFN3	1.025	5.186
	Egmasa	7.015	40.182
	Otras empresas	431	1.667
Córdoba	IFN3	1.053	4.023
	Egmasa	8.853	32.271
	Tragsatec	224	893
	Otras empresas	22	79
Granada	IFN3	1.039	5.296
	Tragsatec	646	3.194
	Otras empresas	12.964	62.815
Huelva	IFN3	1.951	6.829
	Egmasa	11.689	44.729
	Otras empresas	3.616	10.021
Jaén	IFN3	1.582	8.190
	Egmasa	17.417	79.077
	Tragsatec	10.283	56.551
Málaga	IFN3	1.023	4.670
	Egmasa	4.493	23.676
	Tragsatec	4.010	14.016
	Otras empresas	367	1.078
Sevilla	IFN3	1.060	3.571
	Egmasa	2.799	11.001
	Otras empresas	851	3.424
Total general		99.983	441.998



6

Recopilación y cálculo de variables ambientales



6.1. Materiales

Se relaciona a continuación la información de partida que se ha utilizado para la determinación y cálculo de las variables ambientales definidoras del biotopo.

Las variables ambientales pueden englobarse en tres grandes grupos:

6.1.1. Variables orográficas

□ **Modelo Digital de Elevaciones de Andalucía**

Se han utilizado los Modelo Digital de Elevación correspondiente a los años 2006 y 2007 con resolución espacial de 5 m y 10 m disponible en la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).

6.1.2. Variables climáticas

6.1.2.1. Termométricas

Se ha utilizado la información termométrica generada por la REDIAM y consultable en el Subsistema de Información de Climatología Ambiental (CLIMA) a partir de un conjunto de 90 estaciones con datos termométricos (**Figura 6.1**), con 30 años de registros comprendidos entre los años 1971-2000.

La técnica de inferencia espacial utilizada por la REDIAM para la generación de la cartografía termométrica para la totalidad del territorio andaluz se basa en el desarrollo de funciones de predicción espacial de las variables climáticas y la interpolación espacial de las fracciones no explicadas por las funciones (residuos), procedimiento conocido como IDW (Inverso de la Distancia). Para el desarrollo de las funciones de predicción se emplearon técnicas de regresión lineal múltiple que explicaron las correlaciones entre las variables climáticas y las variables fisiográficas.

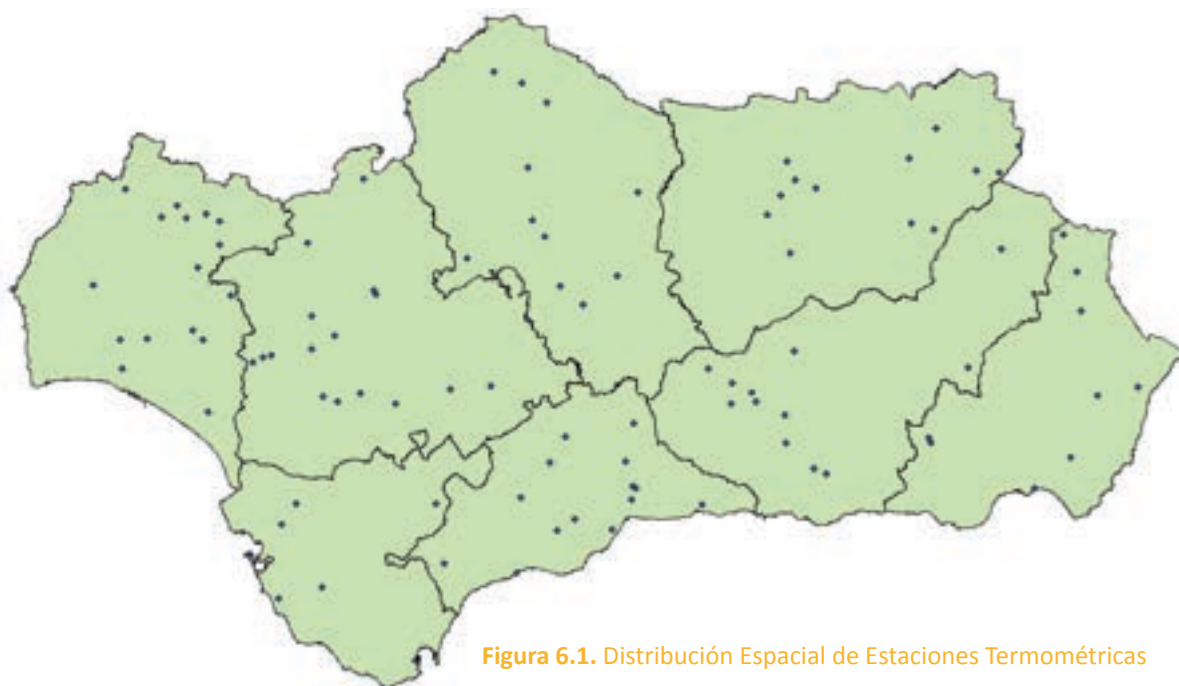


Figura 6.1. Distribución Espacial de Estaciones Termométricas

Las variables termométricas obtenidas del subsistema CLIMA empleadas en el presente estudio fueron las siguientes:

- **Modelo Digital de temperatura media anual**
Media aritmética de las doce temperaturas medias mensuales para la serie de años estudiada (1971-2000). Ráster de 100 m. Medida expresada en °C.
- **Modelo Digital de temperatura media mensual**
Media aritmética de las temperaturas medias del mes para la serie de años estudiada (1971-2000). Ráster de 100 m para cada una de las mensualidades. Medida expresada en °C.
- **Modelo Digital de la temperatura media de las máximas mensuales**
Media aritmética de las temperaturas máximas del mes, para la serie de años estudiada (1971-2000). Ráster de 100 m para cada una de las mensualidades. Medida expresada en °C.
- **Modelo Digital de la temperatura media de las mínimas mensuales**
Media aritmética de las temperaturas mínimas del mes, para la serie de años estudiada (1971-2000). Ráster de 100 m para cada una de las mensualidades. Medida expresada en °C.
- **Modelo Digital de la temperatura máxima mensual**
Temperatura máxima mensual (valor absoluto) para la serie de años estudiada (1971-2000). Ráster de 100 m para cada una de las mensualidades. Medida expresada en °C.
- **Modelo Digital de la temperatura mínima mensual**
Temperatura mínima mensual (valor absoluto) para la serie de años estudiada (1971-2000). Ráster de 100 m para cada una de las mensualidades. Medida expresada en °C.
- **Modelo Digital de velocidad del viento por cuadrante**
Mediciones reales de la velocidad de viento para una altura $z = 10$ m sobre el terreno de cada estación meteorológica. Ráster de 500 m para cada cuadrante NO, NE, SO, y SE. Medida expresada en km/h.

6.1.2.2. Pluviométricas

Se ha utilizado la información pluviométrica obtenida a partir del estudio *“Sistema de Inferencia Espacial de las propiedades Físico-Químicas e Hidráulicas de Suelos de Andalucía”* (RODRÍGUEZ, 2008), aportado por la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.

Este estudio ha partido del análisis de 860 estaciones meteorológicas con datos pluviométricos. Todas las estaciones seleccionadas disponían de más de 15 años de registros continuos de estas variables y los registros seleccionados cubrían el período desde el año 1942 hasta el 1988, existiendo 279 estaciones con más de 25 años de registros pluviométricos. Estas series fueron depuradas con la finalidad de eliminar aquellas estaciones con errores de observación o de registro, reduciendo el número de estaciones a 817 (Figura 6.2).



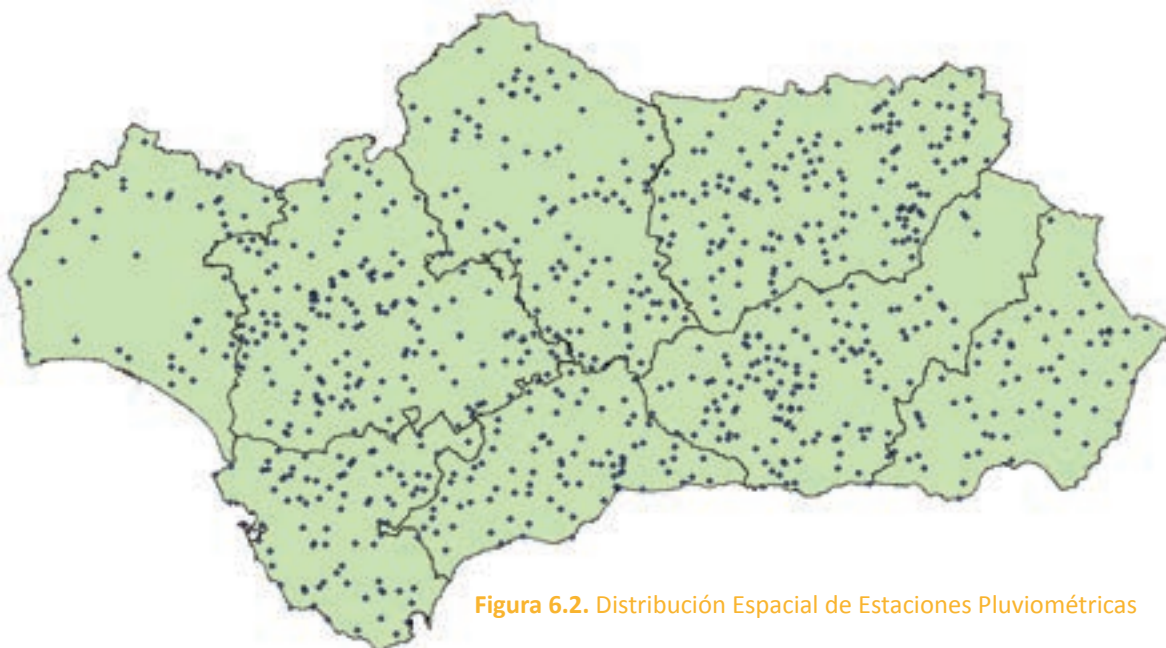


Figura 6.2. Distribución Espacial de Estaciones Pluviométricas

Una vez concluida esta fase previa, RODRÍGUEZ procedió a la generación de la cartografía territorial continua de las variables pluviométricas a partir de los datos puntuales registrados en las estaciones meteorológicas. El método utilizado para la generación de los mapas ha sido la regresión-kriging que se basa en el desarrollo de funciones de predicción espacial de las variables climáticas y la interpolación espacial de las fracciones no explicadas por las funciones (residuos) (RODRÍGUEZ, 2008).

En este estudio se utilizó la precipitación mensual:

- **Modelo Digital de Precipitación Mensual**
Media aritmética de las precipitaciones medias mensuales, para la serie de años estudiada (1942-1988). Ráster de 250 m para cada una de las mensualidades. Medida expresada en mm.

6.1.3. Variables edáficas

6.1.3.1. Información obtenida del estudio “Sistema de inferencia espacial de las propiedades físico-químicas e hidráulicas de suelos de Andalucía”

Se ha utilizado la información de variables edáficas derivadas del mencionado estudio “*Sistema de Inferencia Espacial de las propiedades Físico-Químicas e Hidráulicas de Suelos de Andalucía*”.

La cartografía territorial de las diferentes variables edáficas fue obtenida a partir de la información de partida suministrada por las bases de datos de perfiles de suelos de Andalucía. Para la generación de la distribución territorial continua de cada variable se aplicaron técnicas edafométricas que permitieron correlacionar la información obtenida de las observaciones directas del suelo (perfiles) con las principales variables ambientales que contribuyen a la formación del suelo. La técnica de inferencia espacial empleada en la mayoría de los casos fue el procedimiento híbrido de predicción espacial (regresión-kriging) basado en la combinación del análisis de regresión no paramétrico (árboles de regresión) con técnicas geoestadísticas de interpolación espacial (kriging ordinario). Las regresiones permitieron correlacionar las variables ambientales con las propiedades físicas del suelo, mientras que los residuos se interpolaron espacialmente para mejorar la precisión espacial de las predicciones (RODRÍGUEZ, 2008).

Toda la información fue suministrada por la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, en formato ráster con una resolución de 250 m y particularizada para los horizontes superficial y subsuperficial.

- **Arena**
Porcentaje de partículas de diámetro comprendido entre 2.000 y 50 μm respecto a la tierra fina mineral. Medida expresada en %. Para la inferencia espacial de esta variable, en el estudio de RODRÍGUEZ (2008) se emplearon datos de 2.107 perfiles de suelos para el horizonte superficial y 1.522 perfiles para el subsuperficial.
- **Limo**
Porcentaje de partículas de diámetro comprendido entre 50 y 2 μm respecto a la tierra fina mineral. Medida expresada en %. Para la inferencia espacial de esta variable en el estudio de RODRÍGUEZ (2008) se emplearon datos de 2.107 perfiles de suelos para el horizonte superficial y 1.522 perfiles para el subsuperficial.
- **Arcilla**
Porcentaje de partículas de diámetro inferior a 2 μm respecto a la tierra fina mineral. Medida expresada en %. Para la inferencia espacial de esta variable en el estudio de RODRÍGUEZ (2008) se emplearon datos de 2.107 perfiles de suelos para el horizonte superficial y 1.522 perfiles para el subsuperficial.
- **Profundidad de suelos**
Para mostrar la profundidad del suelo se transformó la información de partida de los perfiles en cinco variables categóricas atendiendo al rango de profundidad, sin distinguir entre horizonte superficial y subsuperficial (**Tabla 6.1**). Para la inferencia espacial de esta variable en el estudio de RODRÍGUEZ (2008) se emplearon datos de 738 perfiles de suelos.

Tabla 6.1. Clases de profundidad de suelos

CLASE	RANGO DE ESPESOR (cm)
1	0-25
2	25-50
3	50-100
4	100-150
5	150-250

- **Conductividad Hidráulica Saturada**
La permeabilidad expresa la facilidad que un suelo ofrece al flujo de un fluido. Si el fluido es agua y el suelo está saturado, se utiliza el concepto de conductividad hidráulica saturada que expresa la velocidad con la que circula el agua a través de un suelo saturado. Se expresa en cm/día.

Debido a la escasez de datos en la base de datos de los perfiles de suelo, en el estudio de RODRÍGUEZ (2008) no se pudo aplicar la metodología de inferencia espacial utilizada para otras variables. Por esta razón, se relacionó dicha variable con otras propiedades del suelo que pueden ser medidas con más facilidad como la textura, la densidad aparente y el contenido de materia orgánica (BOUMA, 1989, citado en RODRÍGUEZ, 2008). Estas funciones relacionales se denominan funciones de edafotransferencia (FET). De entre las FET analizadas, se optó por utilizar las desarrolladas por SCHAAP *et al.* (2001), contenidas en el software ROSETTA.
- **Materia Orgánica**
Porcentaje de materia orgánica de cada horizonte. Variable expresada en %. Para la inferencia espacial de esta variable en el estudio de RODRÍGUEZ (2008) se emplearon datos de 2.099 perfiles de suelos para el horizonte superficial y de 1.508 perfiles para el subsuperficial.
- **pH**
El pH es la medida de acidez o alcalinidad del suelo en cada horizonte. Para la inferencia espacial de esta variable en el estudio de RODRÍGUEZ (2008) se emplearon datos de 2.168 perfiles de suelos para el horizonte superficial y de 1.547 perfiles para el subsuperficial.
- **Densidad aparente superficial**
La densidad aparente se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco (medida expresada en gr/cm^3). Este volumen incluye tanto sólidos como los poros, por lo que la densidad aparente refleja la porosidad total del suelo. Este parámetro está influenciado por la textura, la estructura y la presencia de materia orgánica.

En el estudio de RODRÍGUEZ (2008), la predicción de la densidad aparente del suelo no se efectuó con el procedimiento de regresión-kriging comentado en epígrafes anteriores debido a que las observaciones de densidad aparente recopiladas en el trabajo de referencia a partir de los perfiles de suelo no presentaban una distribución y cobertura espacial suficientemente adecuada como para realizar análisis geo-estadísticos (se contaba con 435 perfiles con datos válidos de densidad aparente). Por esta razón, se elaboraron funciones de edafotransferencia que correlacionan la densidad aparente con otras propiedades físicas de los suelos de la región.

Para obtener estas funciones de edafotransferencia se escogieron como variables independientes los contenidos de limo y arcilla, la materia orgánica y la profundidad del suelo (definida como profundidad del horizonte superficial y subsuperficial). Las regresiones se realizaron con el procedimiento de árboles de regresión implementado en el software GUIDE (RODRÍGUEZ, 2008).

□ **Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente**

La capacidad de campo (CC) es el contenido volumétrico de agua en el suelo para un potencial matricial de -33 kPa. El punto de marchitez permanente (PMP) es el contenido volumétrico de agua en el suelo para un potencial matricial de -1500 kPa. Ambas variables están expresadas en cm^3/cm^3 y se particularizan para el horizonte superficial y subsuperficial.

Los datos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente originales procedieron de 2.032 perfiles de suelos y fueron utilizados en el trabajo de referencia (RODRÍGUEZ, 2008) para generar funciones locales de edafotransferencia.

La distribución territorial continua de la CC y el PMP se basó en el desarrollo y aplicación de funciones de edafotransferencia calibradas con los datos locales disponibles (textura, densidad aparente y materia orgánica, PACHEPSKY y RAWLS, 2005, citado en RODRÍGUEZ, 2008). En el citado trabajo se utilizó la aplicación informática *k-Nearest Neighbor*, desarrollada por NEMES *et al.* (2008) para calibrar las funciones de edafotransferencia de CC y PMP con los datos disponibles en la región. *k-Nearest Neighbor* (KNN) es una técnica no paramétrica de exploración de datos que se basa en el reconocimiento de patrones similares. Esta herramienta ha permitido inferir los contenidos del agua en el suelo para los potenciales matriciales de -33 kPa (CC) y -1500 kPa (PMP). Aplicando una ponderación en función de una medida (distancia euclidiana) que cuantifica la similitud entre propiedades físicas de la muestra y los elementos de la base de datos original (NEMES *et al.*, 2006 citado en RODRÍGUEZ, 2008).

6.1.3.2. Fuente de información para el cálculo de variables edáficas derivadas

Adicionalmente a la información procedente del estudio de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente (centrado fundamentalmente en variables edáficas físicas e hidráulicas), para el presente estudio fue preciso introducir propiedades químicas de los suelos que tengan influencia en la capacidad productiva de los ecosistemas forestales, por lo que se llevó a cabo un trabajo específico de recopilación, selección y análisis de información procedente de distintas bases de datos de perfiles de suelos:

- **Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.** Esta base de datos contiene información detallada de 1.721 perfiles, distribuidos por toda la región andaluza, aunque con una mayor densidad de muestreo en Andalucía Oriental.
- **Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNASE)** perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, a través del acceso al Banco de Datos SEISnet y Tecnología MicroLEIS, disponibles en la página web de la *Spin-Off* del CSIC, Evenor-Tech, SL., incluye un total de 963 perfiles de suelos con datos analíticos, referidos fundamentalmente a Andalucía Occidental.
- **Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino** a través del estudio Inventario Nacional de Erosión de Suelos (I.N.E.S.). Proporciona datos de un total de 3.882 puntos de muestreo, distribuidos en una malla regular de 5 Km.

6.2. Planteamiento metodológico

A continuación se describe la metodología seguida para obtener las variables ambientales empleadas en el estudio para la caracterización del biotopo y que posteriormente han formado parte de las variables independientes de los modelos que se proponen para la determinación de la calidad de estación o índice de sitio y de la distribución potencial de las distintas especies de pinos en el territorio andaluz.

Para la selección de las variables ambientales se han analizado estudios precedentes que abordan la caracterización paramétrica de la autoecología de distintas especies forestales del territorio nacional (GANDULLO y SÁNCHEZ PALOMARES, 1994; GÓMEZ *et al.*, 2002; GANDULLO *et al.*, 2004a; 2004b, SÁNCHEZ PALOMARES, *et al.*, 2007, 2008; ALONSO PONCE *et al.*, 2010), incorporándose variables no incluidas en estos estudios previos consideradas interesantes para el desarrollo del presente trabajo.

6.2.1. Variables orográficas

En los ecosistemas mediterráneos, el papel de los factores topográficos es fundamental para explicar el comportamiento de la calidad de estación por condicionar de manera determinante el microclima, los gradientes edáficos, el flujo del agua y otras variables ecológicas de gran trascendencia sobre la vegetación.

Para el desarrollo del presente estudio se utilizaron los Modelos Digitales de Elevaciones de Andalucía con una resolución espacial de 5 y 10 m.

El procedimiento seguido consistió en primer lugar en la agregación del MDE a la resolución de trabajo (100 m). La agregación de un MDE es muy útil para reducir las variaciones del terreno a pequeña escala y conseguir una mejor representación regional de la estructura espacial. Sin embargo, este proceso puede repercutir decisivamente sobre la precisión de la representación territorial de las variables orográficas (THOMPSON *et al.*, 2001). Para minimizar esta incidencia, se puso en práctica la siguiente metodología: a cada celda original del MDE se le asignó el valor medio de las elevaciones contenidas en una ventana local de 100 x 100 m mediante la herramienta *FocalMean* del *Spatial Analyst Tools* de ArcGIS®; posteriormente, el MDE atenuado resultante de la operación anterior se reensambló a la resolución de trabajo de 100 m con el método de interpolación bi-lineal implementado en ArcGIS®. Asimismo, se calculó la desviación estándar de las elevaciones contenidas en cada ventana local de 100 m; estos valores se utilizaron para cuantificar la incertidumbre que introdujo el proceso de agregación.

La elevación media y la desviación estándar de cada celda de 100 m se utilizaron para generar múltiples simulaciones estocásticas de la elevación a través del software DIGEMAN (BISHOP *et al.*, 2006) que es capaz de generar realizaciones estocásticas del MDE basados en la técnica de muestreo Hipercubo Latino, considerando la correlación espacial entre las celdas vecinas contenidas en una ventana local de 5 x 5 celdas. El método de muestreo Hipercubo Latino es más eficiente en la identificación de la incertidumbre que otros métodos convencionales de muestreo aleatorio simple (McKAY *et al.*, 1979, BISHOP *et al.*, 2006, MINASNY y McBRATNEY, 2006) fijándose en 100 las realizaciones del MDE para generar el modelo final. Para cada realización estocástica del MDE se calcularon las variables fisiográficas pendiente y curvatura media, obteniendo los mapas resultantes como la media aritmética de todas las realizaciones generadas.

A continuación se relacionan y describen brevemente las variables del relieve consideradas en este trabajo:

- **Altitud.** Elevación del punto del terreno respecto del nivel del mar, expresada en metros.
- **Pendiente.** Desnivel máximo del terreno por unidad de longitud, expresada en grados. Calculado mediante el software DIGEMAN.

- **Curvatura media.** La curvatura es una variable topográfica que representa el grado de cambio de la pendiente en el espacio. Se ha calculado a partir de la metodología propuesta por SHARY (1995), mediante el software DIGEMAN.
- **Orientación.** Cuantifica el grado de exposición de la ladera a los rayos solares, y se mide mediante el ángulo horizontal respecto del norte del vector normal a una faceta del terreno. Se procedió a su cálculo a partir del MDE atenuado de 100 m empleando para ello la herramienta *Aspect* del *Surface Analyst - Spatial Analyst Tools* de ArcGIS®.
- **Insolación.** La insolación es la cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un lugar de la Tierra. Estimada mediante el **Coefficiente de Insolación de Gandullo** (GANDULLO, 1974). Esta variable se ha determinado mediante una expresión (**Ecuación 6.1**) que combina la orientación de la ladera y la pendiente:

$$I = \cos(\varphi) \cdot [1 + f(\alpha) \cdot \tan(\varphi)]$$

donde :

$\varphi \Rightarrow$ pendiente del terreno

$f(\alpha) \Rightarrow$ expresión tabulada en función de la orientación α

(6.1)

6.2.2. Variables climáticas

Para este estudio se han considerado diversos índices termopluviométricos y balances hídricos que permiten explicar las condiciones ecológicas de un emplazamiento y su relación con el desarrollo de la vegetación estudiada.

6.2.2.1. Termométricas

Las variables termométricas proceden de los modelos digitales citados en el apartado anterior, con la adición de un conjunto de variables derivadas que se han generado específicamente para este trabajo:

- **Temperatura media anual.** Media aritmética de las temperaturas medias mensuales, expresada en °C.
- **Temperatura media del mes más frío.** Valor mínimo de las temperaturas medias mensuales de todo el año. Expresada en °C.
- **Temperatura media del mes más cálido.** Valor máximo de las temperaturas medias mensuales de todo el año. Expresada en °C.
- **Oscilación térmica media.** Diferencia entre la temperatura media del mes más cálido y la temperatura media del mes más frío. Expresada en °C.
- **Temperatura media de las mínimas del mes más frío.** Valor mínimo de las temperaturas medias de las mínimas mensuales de todo el año. Expresada en °C.
- **Temperatura media de las máximas del mes más cálido.** Valor máximo de las temperaturas medias de las máximas mensuales de todo el año. Expresada en °C.

- **Oscilación térmica total.** Diferencia entre la temperatura media de las máximas del mes más cálido y la temperatura media de las mínimas del mes más frío. Expresada en °C.
- **Evapotranspiración de referencia.** Para caracterizar el régimen de humedad de los suelos de la región fue necesario considerar otra variable climática, la evapotranspiración de referencia. El cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ET_o) se ha llevado a cabo mediante el método Penman-Monteith (**Ecuación 6.2**), particularizado para masas de coníferas, que a continuación se especifica (GUEVARA, 2006).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right) \cdot v_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot v_2)} \quad (6.2)$$

donde Δ es la pendiente de la curva de tensión de vapor saturado, cuya expresión es:

$$\Delta = \frac{2503,6 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 273,3} \right)}}{(T + 237,3)^2} \text{ siendo } T \text{ es la temperatura media.}$$

R_n es la radiación solar neta sobre la superficie del terreno, cuya expresión es:

$$R_n = R_s \cdot (1 - \alpha) - \sigma \cdot \frac{(273 + T_{\max})^4 + (273 + T_{\min})^4}{2} \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

y $R_s = k \cdot R_a \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \cdot \frac{s}{S_{ph}} \cdot \left(\frac{N + 2 \cdot n}{3 \cdot N} \right)$ la radiación solar que llega a la superficie del terreno.

$T_{\max}$ y $T_{\min}$ son las temperaturas medias máxima y mínima del periodo considerado.

k es un parámetro variable entre 0,16 y 0,19 (se ha adoptado para este estudio la media 0,17).

R_a es la radiación solar extraterrestre (obtenida de la tabla que se adjunta en el **Anejo 1**; GUEVARA, 2006).

s/S_{ph} es la relación entre el flujo neto de energía incidente sobre el plano del terreno y el plano horizontal.

n es el número de horas reales de sol.

N es el número máximo de horas de sol (obtenida de la tabla que se adjunta en el **Anejo 1**; GUEVARA, 2006).

α el albedo del terreno (0,10 para masas forestales de coníferas).

σ es la constante de *Stefan-Boltzmann*, e igual $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJK}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

R_{so} la radiación solar en un día despejado a una altura h , cuya expresión es la siguiente:

$$R_{so} = (2 \cdot 10^{-5} \cdot h + 0,75)$$

G es el flujo de calor hacia el suelo:

$$G_{mes(i)} = 0,07 \cdot (T_{mes(i+1)} - T_{mes(i-1)}) \approx 0,14 \cdot (T_{mes(i)} - T_{mes(i-1)})$$

y es el calor latente de vaporización $\gamma = 0,001628 \cdot \frac{P}{\lambda}$ donde P es la presión atmosférica:

$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot h}{293} \right)^{5,26}$$

$$\text{y } \lambda = 2,501 - 0,002361 \cdot T$$

v_2 es la velocidad media del viento a 2 metros del suelo cuya magnitud se obtiene a partir de la velocidad a una altura de medición z con la siguiente expresión:

$$v_2 = \frac{4,87 \cdot v_z}{\ln(67,8 \cdot z - 5,42)}$$

y por ultimo $(e_s - e_a)$

Donde $e_s = 0,611 \cdot e^{\frac{17,27 \cdot T}{T+237,3}}$ y e_a se puede aproximar a: $e_a = 0,611 \cdot e^{\frac{12,27 \cdot T_{\min}}{T_{\min}+237,3}}$

De esta forma, se calcula la ETo para cada mes, obteniendo la ETo resultante y final como la suma de las 12 ETo mensuales. Expresada en mm.

- **Suma de Superávits.** Es la suma a lo largo del año de las diferencias de la precipitación y la evapotranspiración potencial de los meses con superávits de agua. Evalúa el agua sobrante en los meses húmedos que queda en el suelo, incrementando sus reservas, o que drena a profundidad. Expresada en mm.
- **Suma de Déficits.** Es la suma a lo largo del año de las diferencias entre la evapotranspiración potencial y la precipitación de los meses con déficits de agua. Evalúa el déficit de agua climática de la estación que puede ser compensado, más o menos parcialmente, por el agua que haya quedado en el suelo en los meses de superávits. Expresada en mm.
- **Duración de la sequía.** Esta variable se define a partir del diagrama de Walter-Gaussen como el periodo de tiempo en el cual la gráfica de temperaturas se encuentra por encima de la gráfica de precipitaciones (**Figura 6.3**).

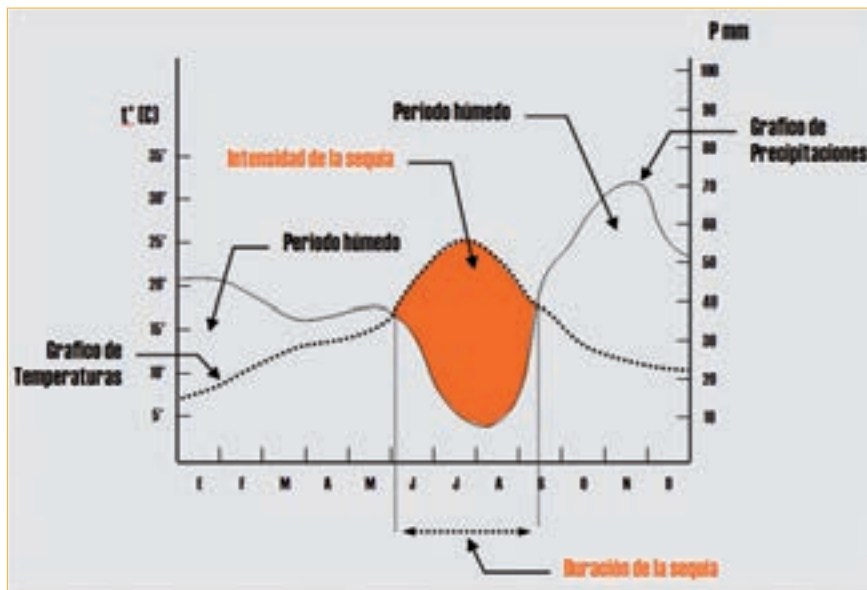


Figura 6.3. Diagrama de Walter-Gaussen

- **Índice Hídrico Anual.** Es un indicador que sintetiza en una sola expresión el déficit, el superávit y la evapotranspiración potencial de referencia (**Ecuación 6.3**):

$$IH = \frac{100 \cdot SUP - 60 \cdot DEF}{ET_o} \quad (6.3)$$

6.2.2.2. Pluviométricas

Dado que la resolución espacial del estudio de referencia (RODRÍGUEZ, 2008) es de 250 m, se llevó a cabo un cambio de resolución de trabajo para transformarla a 100 m mediante la herramienta *Resample* del *Ráster Processing* de las *Arctoolbox* de ArcGIS®, empleando para ello el método de interpolación bi-lineal.

Tras esta transformación, se determinaron las siguientes variables pluviométricas:

- **Precipitación anual.** Suma de las precipitaciones medias mensuales, expresadas en mm.
- **Precipitación de Invierno.** Suma de las precipitaciones medias de los meses de diciembre, enero y febrero, expresada en mm.
- **Precipitación de Primavera.** Suma de las precipitaciones medias de los meses de marzo, abril y mayo, expresada en mm.
- **Precipitación de Verano.** Suma de las precipitaciones medias de los meses de junio, julio y agosto, expresada en mm.
- **Precipitación de Otoño.** Suma de las precipitaciones medias de los meses de septiembre, octubre y noviembre, expresada en mm.



6.2.3. Variables edáficas

6.2.3.1. Variables obtenidas a partir de la información proporcionada por el estudio “Sistema de inferencia espacial de las propiedades físico-químicas e hidráulicas de suelos de Andalucía”

Como ya se ha expuesto, el estudio de RODRÍGUEZ, 2008 proporciona la información particularizada para los horizontes superficial y subsuperficial; sin embargo, para los fines de este trabajo se simplificó esta información de partida, obteniendo una variable edáfica única para la totalidad del espesor del perfil como media ponderada de los valores de ambos horizontes.

Igualmente se ajustó la resolución de trabajo, pasando de 250 m a 100 m mediante la herramienta *Resample* del *Ráster Processing* de las *Arctoolbox* de ArcGIS®, empleando para ello el método de interpolación bi-lineal.

- **Arena.** Porcentaje de partículas de diámetro comprendido entre 2.000 y 50 μm respecto a la tierra fina mineral. Medida expresada en %.
- **Limo.** Porcentaje de partículas de diámetro comprendido entre 50 y 2 μm respecto a la tierra fina mineral. Medida expresada en %.
- **Arcilla.** Porcentaje de partículas de diámetro inferior a 2 μm respecto a la tierra fina mineral. Medida expresada en %.
- **Profundidad de suelo.** Unidad expresada en cm. Esta variable, originalmente ofrecida de forma categórica por clases, se transformó considerando como valor de profundidad de cada clase el límite inferior (**Tabla 6.2**).

Tabla 6.2. Profundidad de suelos

CLASE	RANGO DE ESPESOR	PROFUNDIDAD (cm)
1	0 - 25	25
2	25 - 50	50
3	50 - 100	100
4	100 - 150	150
5	150 - 250	250

- **Conductividad Hidráulica Saturada.** Variable considerada para estimar la permeabilidad de los suelos. Expresada en cm/día.
- **Materia Orgánica.** Porcentaje de materia orgánica. Variable expresada en %.
- **Materia Orgánica Superficial.** Porcentaje de materia orgánica del horizonte superficial. Variable expresada en %.
- **pH.** Los valores de pH asignados a los horizontes se obtuvieron como la media ponderada en función de los espesores de los horizontes edáficos superficial y subsuperficial.

6.2.3.2. Variables edáficas derivadas

Adicionalmente a las variables obtenidas del estudio RODRÍGUEZ (2008) se han obtenido específicamente un conjunto de variables edáficas derivadas siguiendo el mismo procedimiento metodológico, la Regresión-Kriging.

En dicho estudio se aplicaron técnicas edafométricas (para más detalle ver **Anejo 2**) que permitieron correlacionar la información obtenida de las observaciones directas del suelo (perfiles) con las principales variables ambientales que contribuyen a la formación del suelo. Para ello se utilizó un procedimiento híbrido de predicción espacial (regresión-kriging) basado en la combinación del análisis de regresión no paramétrico (Árboles de Regresión) con técnicas geoestadísticas de interpolación espacial (Kriging Ordinario). Así, las regresiones permitieron correlacionar las variables ambientales con las propiedades físicas del suelo, mientras que los residuos de las regresiones se interpolaron espacialmente para mejorar la precisión espacial de las predicciones.

Muchas de las variables ambientales originalmente recopiladas en dicho trabajo están altamente correlacionadas entre sí, por lo que si se usaran directamente como variables independientes en las funciones de predicción espacial se originarían serios problemas de multicolinealidad. Para quitarlos se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) que permitió reducir drásticamente la dimensionalidad de los datos originales sin pérdida significativa de información.

Previamente al cálculo del conjunto de variables edáficas derivadas, se procedió a agregar la información de partida de los perfiles de suelo correspondientes a los diferentes horizontes edáficos para disponer de un único valor representativo de todo el perfil. Una vez promediada la variable edáfica en todo el perfil, se detectaron valores atípicos siguiendo el procedimiento de IGLEWICZ y HOAGLIN (1993). Para todas las observaciones pertenecientes a una misma unidad de suelo (unidades definidas en el mapa de suelos de Andalucía, CSIC-IARA, 1989) se calcularon la mediana y la desviación absoluta de la mediana (*DAM*). La *DAM* se calculó como la mediana de las diferencias entre cada observación y la mediana de la muestra (6.4.).

$$DAM = \text{mediana}_j (|X_i - \text{mediana}_j(X_j)|) \quad (6.4)$$

Posteriormente se calculó el valor Z-score modificado (M_j) (6.5):

$$M_j = [0,6745 * (X_i - \text{mediana}_j(X_j))] / DAM \quad (6.5)$$

Las observaciones (X_i) con valores de M_j superiores a 3,5 en valor absoluto se consideraron como atípicas y se eliminaron de la base de datos.

Las variables edáficas derivadas, a partir de la información de partida descrita en el apartado 6.1.3.2, son las siguientes (en el **Anejo 3** pueden consultarse las funciones de predicción resultante para cada variable edáfica derivada, así como los parámetros de los variogramas utilizados para interpolar los residuos de las funciones de predicción espacial):

□ Tierra Fina:

Porcentaje de partículas con un diámetro menor a 2 mm en el suelo. Dado que los datos de los que se disponían proporcionaban exclusivamente el porcentaje en peso de elementos gruesos en los 10-15 cm superiores del suelo (horizonte superficial), fue necesario establecer una función que permitiese derivar el porcentaje de tierra fina del tanto por ciento de elementos gruesos en dicho horizonte.

El procedimiento seguido consistió en obtener una regresión multivariable que relacionara los datos de porcentaje de elementos gruesos procedentes de la base de datos de perfiles de suelo del Inventario Nacional de Erosión de Suelos (3.851 registros, **Figura 6.4**) con los componentes principales en los que en su estudio RODRÍGUEZ (2008) sintetiza la información cuantitativa territorial de las variables edáficas. Tras la interpolación de los residuos, la fracción de tierra fina del horizonte superficial se estimó mediante la **ecuación 6.6**.

$$TF = 100 - EG \quad (6.6)$$

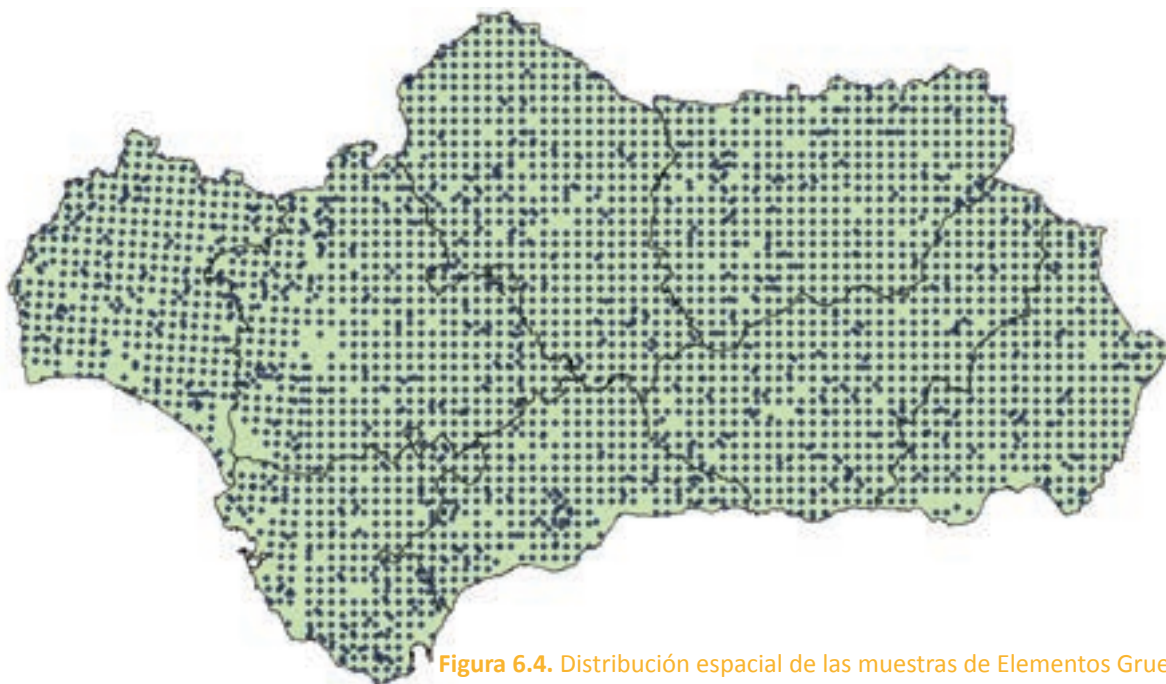


Figura 6.4. Distribución espacial de las muestras de Elementos Gruesos

□ **Caliza Activa:**

Contenido de caliza activa expresado en %. Es la fracción más fina de la caliza (<50 micras) que desde el punto de vista químico es la más activa, pudiendo tener mucha influencia en el desarrollo de los vegetales. Si el porcentaje de caliza es alto se pueden producir inmovilizaciones de elementos nutritivos, y si es muy bajo, pueden manifestarse deficiencias del elemento.

Para el cálculo e inferencia espacial de dicha variable se ha contado con datos de 1.565 perfiles incluidos en la base de datos del I.N.E.S. (**Figura 6.5**)

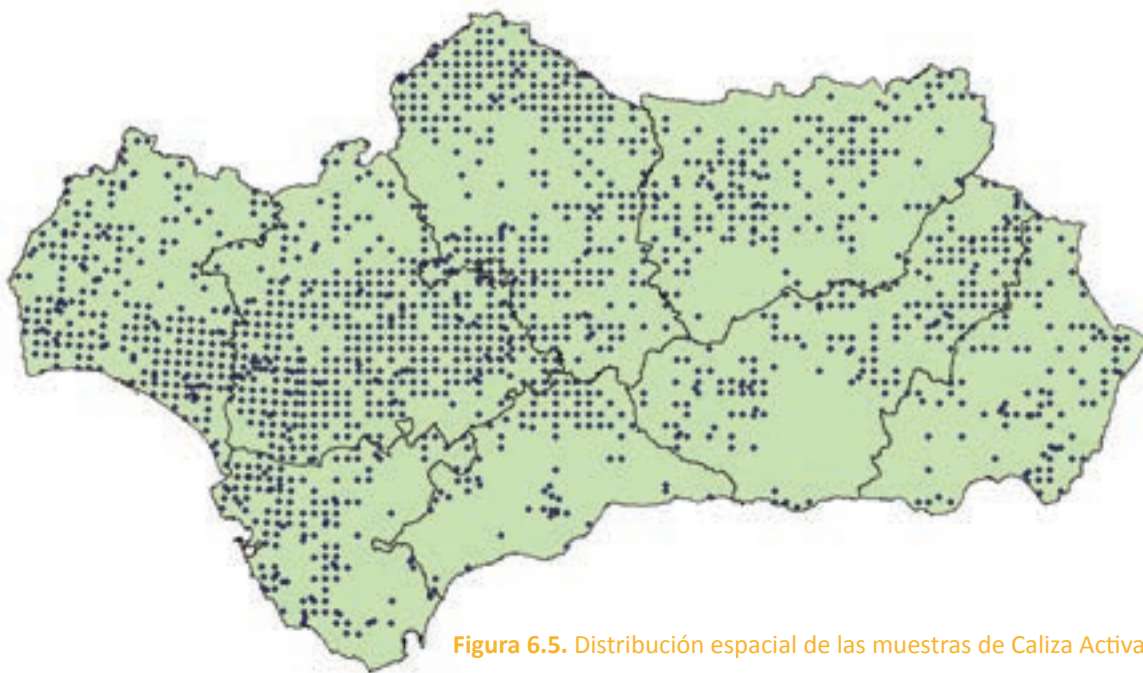


Figura 6.5. Distribución espacial de las muestras de Caliza Activa

□ **Capacidad de Intercambio Catiónico:**

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos, merced a su contenido en arcillas y materia orgánica. Las arcillas están cargadas negativamente, por lo que suelos con mayores concentraciones de arcillas exhiben capacidades de intercambio catiónico mayores. Ofrece una medida de la capacidad de retener cationes intercambiables. Variable expresada en meq/100g.

Para obtener la distribución espacial de esta variable se utilizaron 1.888 perfiles con datos analíticos de dicha variable (357 perfiles proporcionados por el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, I.R.N.A.S.E. y 1.531 por la C.M.A.). Tras proceder a un análisis de los datos y su depuración, se detectaron valores atípicos que fueron eliminados, por lo que la regresión multivariable y la posterior inferencia de residuos se efectuó con un total de 1.465 parcelas de control (**Figura 6.6**).

Como los datos originales de esta variable en los perfiles del I.R.N.A.S.E. y de la C.M.A. correspondían a cada estrato u horizonte, se promedió dicha variable a la totalidad de la potencia del perfil, tomando para ello como valor medio de la profundidad total del perfil el valor obtenido de espesor de suelo en el estudio de RODRÍGUEZ (2008).

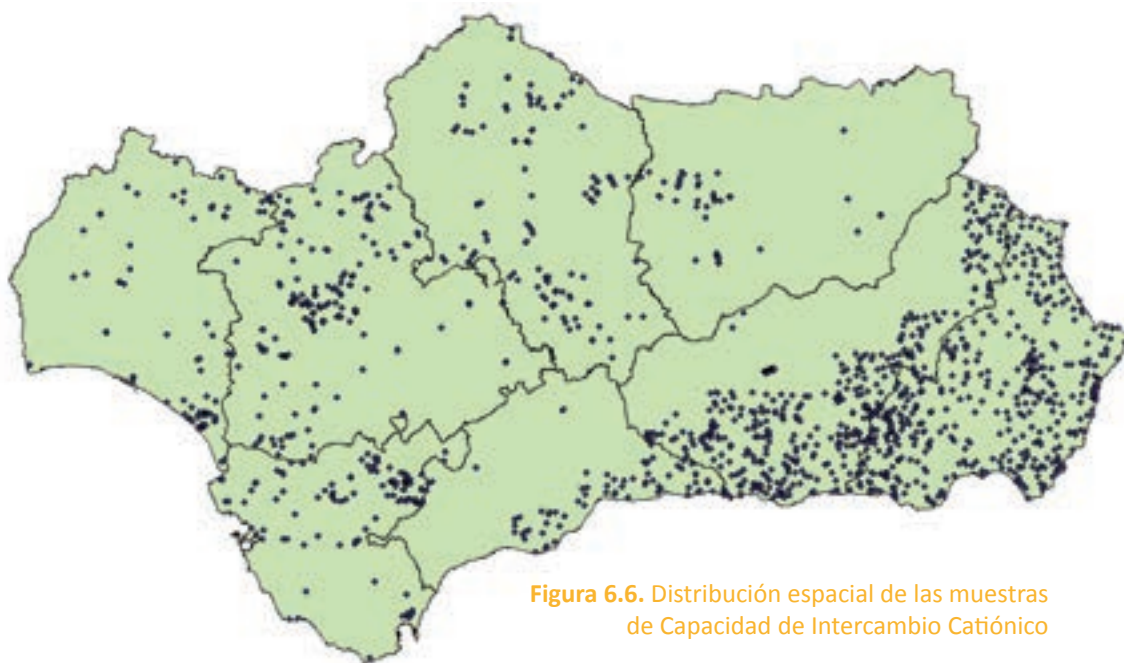


Figura 6.6. Distribución espacial de las muestras de Capacidad de Intercambio Catiónico

□ **Porcentaje de Saturación de Bases:**

El porcentaje de saturación de bases expresa la proporción de bases (K, Ca, Mg y Na) que hay respecto del total de la capacidad de intercambio de cationes (CIC). Expresada en %.

Para la inferencia espacial en el conjunto del territorio andaluz de dicha variable se emplearon un total de 1.018 perfiles de control, una vez depurados los datos de los perfiles originales, que ascendían a 1.693 (**Figura 6.7**), de los cuales 262 procedían de la base de datos del I.R.N.A.S.E. y 1.431 de la C.M.A. También hubo que promediar los datos originales para cada estrato u horizonte del mismo modo que para la anterior variable.

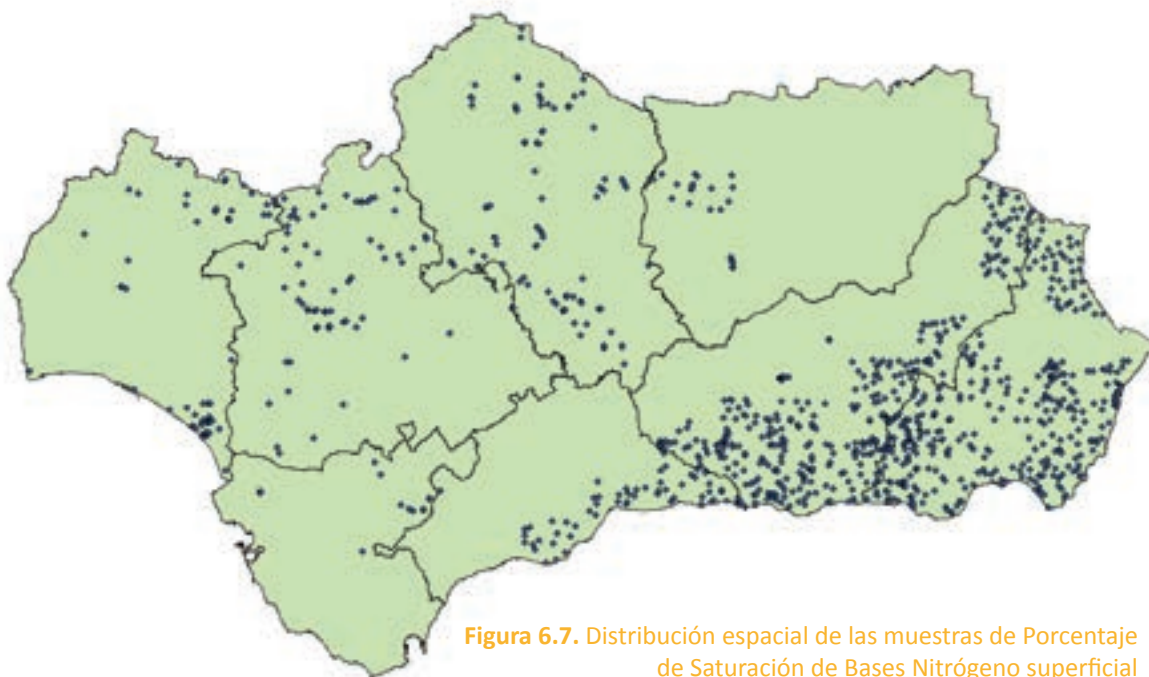


Figura 6.7. Distribución espacial de las muestras de Porcentaje de Saturación de Bases Nitrógeno superficial

□ **Nitrógeno superficial:**

Para su cálculo se partió originalmente de un total de 2.368 datos (822 datos procedentes de perfiles del I.R.N.A.S.E. y 1.546 de la C.M.A.), los cuales, una vez analizados tanto estadística como geográficamente (ya que muchos de ellos estaban duplicados en ambas fuentes de información) y detectado valores atípicos, quedaron reducidos a 1.821 perfiles de control. Expresada en %.

Dado que lo que se pretendía era obtener la fracción de nitrógeno presente en el estrato superficial, se seleccionaron los datos de nitrógeno de los horizontes superficiales (hasta los 30 cm de espesor), llevando a cabo en su caso la ponderación para dicha profundidad máxima.

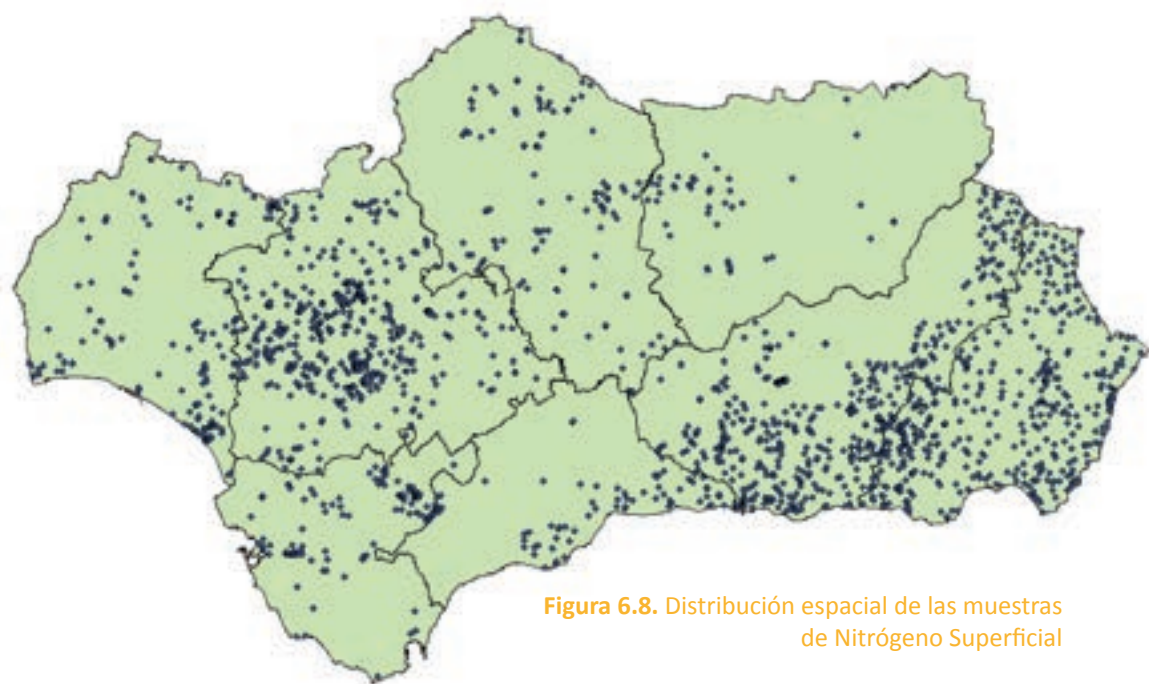


Figura 6.8. Distribución espacial de las muestras de Nitrógeno Superficial

□ Capacidad de Retención de Agua:

La capacidad de retención de agua disponible es el intervalo de humedad disponible que se define como el agua del suelo que puede ser absorbida a un ritmo adecuado para permitir el crecimiento normal de las plantas.

La capacidad de retención de agua (CRA) es una variable ampliamente utilizada en España por técnicos forestales e investigadores en ecología forestal como uno de los factores estimadores de la disponibilidad de agua para las plantas y, por ende, de la calidad de estación. El método más extendido es el propuesto por GANDULLO (1985) que la hace equivalente a la suma de la capacidad de retención de agua de los distintos horizontes en función de la pendiente de la parcela, de su humedad equivalente, del porcentaje de elementos gruesos y de la permeabilidad comparada entre cada horizonte y el inmediatamente inferior. No obstante, en este estudio se ha seguido el modelo expuesto en DOMINGO *et al.* (2006) que modifica el anterior, permitiendo obtener valores de CRA más acordes con la calidad de estación en los terrenos forestales de fuerte pendiente y que extiende el modelo al cálculo de la máxima reserva de agua disponible en el suelo (**Tabla 6.17**).

Como exponen DOMINGO *et al.* (2006), al aplicar la ecuación de Gandullo en el proyecto “*Caracterización de suelos forestales de la provincia de Huelva*” se apreciaron una serie de anomalías en los valores obtenidos para el parámetro CRA, especialmente en lo referente a la influencia de la pendiente sobre el modelo (la corrección por la pendiente anulaba la capacidad de retención del agua en el suelo en zonas con pendiente fuertes). Asimismo, en el modelo de Gandullo se asume que toda el agua que es capaz de retener el suelo está disponible para las plantas, lo que entra en contradicción con el hecho de que las plantas no pueden extraer el agua cuando el contenido de humedad en el suelo alcanza el punto de marchitez permanente. Estos autores demostraron que el CRAD calculado tras sus correcciones se correlaciona mejor con la calidad de estación que el CRA original de Gandullo.

Tabla 6.17. Comparación entre expresiones de CRA de GANDULLO y DOMINGO *et al.*

GANDULLO (1985)	DOMINGO <i>et al.</i> (2006)
$CRA(mm/m) = \left[12,5 \cdot h_e + 12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot \frac{k}{2} \right] \cdot \frac{TF}{100}$	$CRAD(mm/m) = \left[12,5 \cdot h_e \cdot d + 12,5 \cdot (50 - h_e) \cdot \frac{k}{2} \right] \cdot \frac{TF}{100}$
Donde: h_e = equivalente de humedad de la tierra fina de ese horizonte. c = complemento a uno de la pendiente que caracteriza al suelo, expresada en tanto por uno. TF = porcentaje de tierra fina secada al aire de ese horizonte, con respecto a tierra natural. k = coeficiente que depende del valor permeabilidad de ese horizonte (p_s), del valor de permeabilidad del horizonte inmediato inferior (p_i) y de la pendiente del terreno.	Siendo d el cociente: $d = \frac{\theta_{33} - \theta_{1500}}{\theta_{33}}$ Donde: θ_{33}: contenido en agua para un potencial hídrico $\Psi = 33$ kPa (suelo en capacidad de campo). θ_{1500}: contenido en agua para un potencial hídrico $\Psi = 1500$ kPa (suelo en punto de marchitez permanente).

Dichos autores recomiendan que las fórmulas de aproximación aportadas para el cálculo de la h_e (equivalente de humedad de la tierra fina) podrían ser revisadas para obtener una mayor precisión en el caso de que se disponga de información de base de calidad. Por este motivo, dado que en este estudio se disponen de datos para el conjunto de la región andaluza de elementos gruesos (horizonte superficial), capacidad de campo y punto de marchitez permanente (estas dos variables obtenidas en el trabajo de RODRÍGUEZ, 2008), se procedió a llevar a cabo la sustitución de términos en el modelo dado por DOMINGO *et al.* (2006) de acuerdo con la **ecuación 6.7**.

Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD_{sup}) para el horizonte superficial

$$CRAD_{sup} = \left[(CC_{sup} - PMP_{sup}) + \frac{(SAT_{sup} - CC_{sup}) \cdot c \cdot k}{2} \right] \left(1 - \frac{EG_{vol}}{100} \right) \cdot 1000 \quad (6.7)$$

donde $CRAD_{sup}$ es la capacidad de retención del agua disponible en el horizonte superficial del suelo expresada en (mm/m), CC_{sup} y PMP_{sup} son la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente respectivamente del horizonte superficial (cm^3/cm^3), y SAT_{sup} es el contenido de agua de saturación del horizonte superficial (cm^3/cm^3), obtenida igualmente de RODRÍGUEZ (2008). Finalmente, c y k son dos parámetros del modelo original de GANDULLO (1985) siendo c el complemento a uno de la pendiente ($1 - \tan(\text{Pendiente})$) con la pendiente expresada en grados, y k es un coeficiente que depende de la permeabilidad de los horizontes del suelo. EG_{vol} es el porcentaje volumétrico de elementos gruesos, variable derivada del porcentaje de elementos gruesos descrita anteriormente (referida a porcentaje en peso), por lo que es precisa su transformación mediante la expresión (6.8):

$$EG_{vol} = \frac{\left(\frac{DA_{sup}}{2.65}\right) \cdot EG_{peso}}{1 - \left(\frac{EG_{peso}}{100}\right) \left(1 - \frac{DA_{sup}}{2.65}\right)} \quad (6.8)$$

Siendo DA_{sup} (RODRÍGUEZ, 2008) la densidad aparente del horizonte superficial (g/cm^3) y EG_{peso} los Elementos gruesos en % de peso.

Capacidad de Retención de Agua Disponible ($CRAD_{sub}$) para el horizonte subsuperficial

$$CRAD_{sub} = \left[(CC_{sub} - PMP_{sub}) + \frac{(SAT_{sub} - CC_{sub}) \cdot c \cdot k}{2} \right] \cdot 1000 \quad (6.9)$$

Esta expresión (6.9) es similar a la descrita con anterioridad, pero con los parámetros de suelo correspondiente al horizonte subsuperficial. Se elimina la corrección por elementos gruesos ya que no se dispone de esos datos para el horizonte subsuperficial.

Finalmente, el $CRAD$ de todo el perfil del suelo se calcula como la media ponderada de los $CRAD$ en cada horizonte (**Ecuación 6.10**):

$$CRAD = \frac{(CRAD_{sup} \cdot 25) + [CRAD_{sub} \cdot (ProfSuelo - 25)]}{ProfSuelo}, \quad (6.10)$$

Donde $ProfSuelo$ se expresa en cm.

Estas expresiones difieren aparentemente de las anteriormente citadas, (**Tabla 6.17**) pero conceptualmente son análogas a las que proponen DOMINGO *et al.* (2006) como mejora del modelo original de GANDULLO (1985). Puesto que en este estudio, variables que estos autores sustituyen por aproximaciones basadas en valores medios o funciones de edafotransferencia han sido calculadas a partir de la información de partida, especialmente del trabajo de RODRÍGUEZ (2008).

Por ejemplo, he (equivalente de humedad) en el modelo de Gandullo es equivalente a la capacidad de campo y su valor se aproxima con una función de edafotransferencia, mientras que en este estudio se han usado directamente los valores de capacidad de campo. El coeficiente 12,5 de las ecuaciones de Gandullo y Domingo es un valor medio de la densidad aparente (multiplicada por 10) que se utiliza para convertir he a porcentaje volumétrico; en este trabajo, como se dispone de la CC y PME volumétrico, no se ha recurrido a ningún coeficiente. El parámetro ($50-he$) que aparece en el segundo término de la ecuación de Gandullo procede de la utilización de 50 como un valor medio de la porosidad total del suelo, o humedad de saturación, variable que en este estudio se puede utilizar.

6.3. Resultados

Como resultado final del proceso de recopilación y cálculo de variables ambientales se ha obtenido un mapa digital o ráster con resolución 100 m para la totalidad del territorio andaluz de cada una de las variables consideradas (**Tabla 6.18**).

Tabla 6.18. Resumen de variables ambientales empleadas en el presente trabajo

VARIABLES OROGRÁFICA		
1	mde	Elevación del terreno (m)
2	pte	Pendiente del relieve (grados)
3	cur_md	Curvatura media (1/m)
4	orien	Orientación del relieve (grados)
5	ins	Insolación (adimensional)
VARIABLES CLIMÁTICAS		
6	ptt	Precipitación anual (mm)
7	pin	Precipitación de invierno (mm)
8	pp	Precipitación de primavera (mm)
9	pv	Precipitación de verano (mm)
10	po	Precipitación de otoño (mm)
11	ta	Temperatura media anual (°C)
12	tminf	Temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C)
13	tmaxc	Temperatura media de las máximas del mes más cálido (°C)
14	osc1	Oscilación térmica media (°C)
15	tmf	Temperatura media del mes más frío (°C)
16	tmc	Temperatura media del mes más cálido (°C)
17	osc2	Oscilación térmica total (°C)
18	etott	Evapotranspiración de referencia anual (mm)
19	ssup	Suma de superavits (mm)
20	sdef	Suma de déficits (mm)
21	dseq	Duración de la sequía (meses)
22	iha	Índice hídrico anual (adimensional)
VARIABLES EDÁFICAS		
23	are	Media ponderada del contenido de arena en todo el perfil del suelo (%)
24	lim	Media ponderada del contenido de limo en todo el perfil del suelo (%)
25	arc	Media ponderada del contenido de arcilla en todo el perfil del suelo (%)
26	ps	Profundidad del suelo hasta el horizonte R (cm)
27	cod_hid	Media ponderada de la conductividad hidráulica saturada en todo el perfil del suelo (cm/día)
28	mo	Media ponderada de Materia Orgánica en el perfil del suelo (%)
29	mo_sup	Contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo (%)
30	ph	Media ponderada del pH en todo el perfil del suelo
31	tf	Media ponderada del contenido de tierra fina en todo el perfil del suelo (%)
32	ca	Caliza activa (%)
33	cic	Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 gr)
34	psb	Porcentaje de saturación de bases (%)
35	n_sup	Contenido de nitrógeno en el horizonte superficial del suelo (%)
36	crad	Media ponderada de la capacidad de retención del agua en todo el perfil del suelo (mm/m)

En el **Anejo 4** se presenta un resumen estadístico de cada una de las variables ambientales para toda la superficie andaluza.

Toda esta información ambiental está integrada en el canal de la REDIAM con los metadatos, identificación, distribución y datos de calidad correspondientes.

6.4. Reducción, estandarización y eliminación de colinealidad de variables ambientales. Análisis de componentes principales

Previamente a la modelización de la calidad de estación y del índice de sitio y posterior obtención de los modelos de existencias de biomasa, se procedió al análisis de correlación de las variables ambientales para reducir el efecto de la multicolinealidad y mejorar el análisis de regresión.

Para ello, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) que permitió construir transformaciones lineales de las variables ambientales originales, de modo que las nuevas variables transformadas son ortogonales entre sí y, consecuentemente, carecen de correlación. Además, el ACP permitió reducir la dimensionalidad de los datos originales sin pérdida significativa de información (**Figura 6.9**).

El gran número de variables ambientales consideradas, el amplio ámbito de estudio de dichas variables (región andaluza) y la resolución espacial de trabajo (100x100 m) impidieron llevar a cabo dicho análisis mediante software estadístico al uso, ya que la capacidad o tamaño de archivo necesario para este análisis sobrepasaba la memoria de procesamiento de los ordenadores convencionales. Por ello, se empleó el módulo *Principal Components*, dentro de las herramientas *Multivariate, Spatial Analysis Tools* de las *Arctools box*, disponible para tal efecto en la versión de ArcGis® 10.0 y con capacidad de trabajo de más de 20 variables.

Como paso previo para poder ejecutar de forma adecuada el Análisis de Componentes Principales mediante ArcGis® 10.0, se estandarizaron las variables de estudio con la finalidad de llevar todas las escalas de medida a una escala común de media igual a cero y varianza igual a uno, con lo cual se elimina el problema de la medición y variabilidad diferente de las variables originales (GARCIA PEREZ, 2005).

La estandarización se llevó cabo mediante la herramienta *Ráster Calculator* de ArcGis® 9.3, aplicando la expresión de tipificación más utilizada, es decir sustrayendo de cada dato la media y dividiendo el resultado por la desviación estándar.

Tras la estandarización de las variables ambientales, se realizó el Análisis de Componentes Principales. En la **Figura 6.10**, se puede apreciar que las primeras 20 componentes principales (CP) explican el 98,2% de la varianza total de los datos, considerándose apropiado usar estas primeras 20 CP como variables independientes en los modelos de regresión.

Las componentes principales se calculan mediante la **expresión 6.11**:

$$X_{ij} = a_{i1} \cdot Z_{1j} + \dots + a_{ik} \cdot Z_{kj} = \sum_{k=1}^k a_{ik} \cdot Z_{kj} \quad (6.11)$$

Siendo “a” los coeficientes o puntuaciones factoriales y “Z” los valores estandarizados que tienen las variables de la muestra.

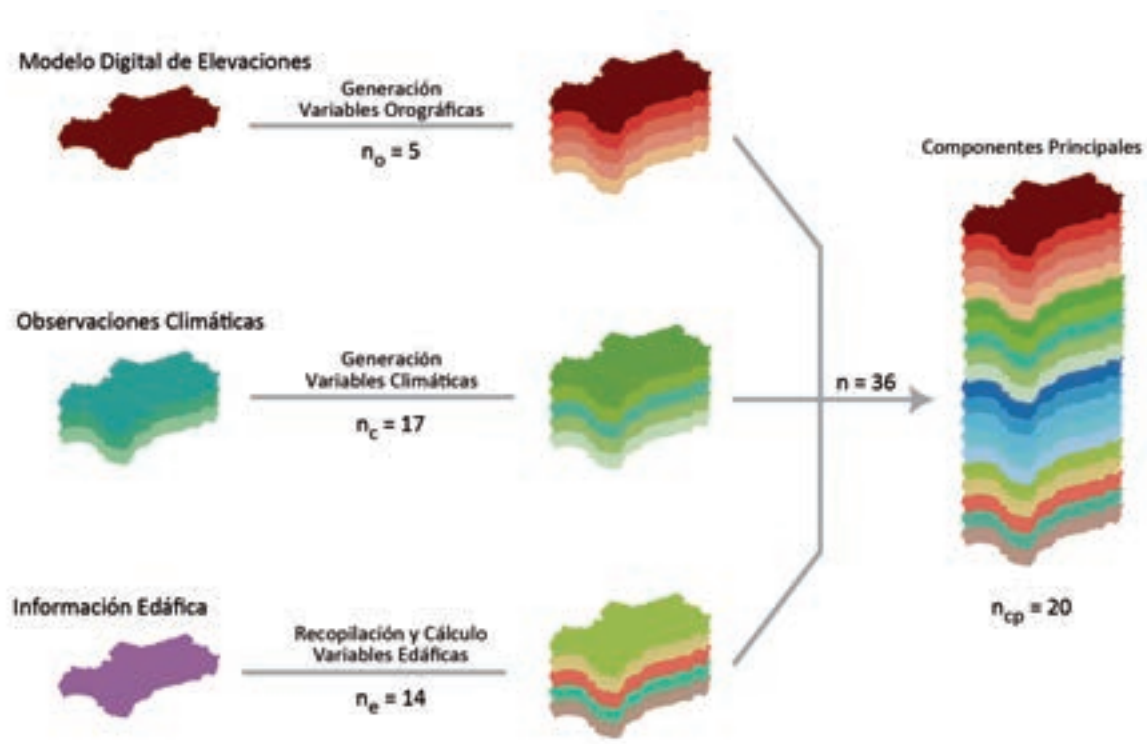


Figura 6.9. Esquema del procedimiento metodológico ACP

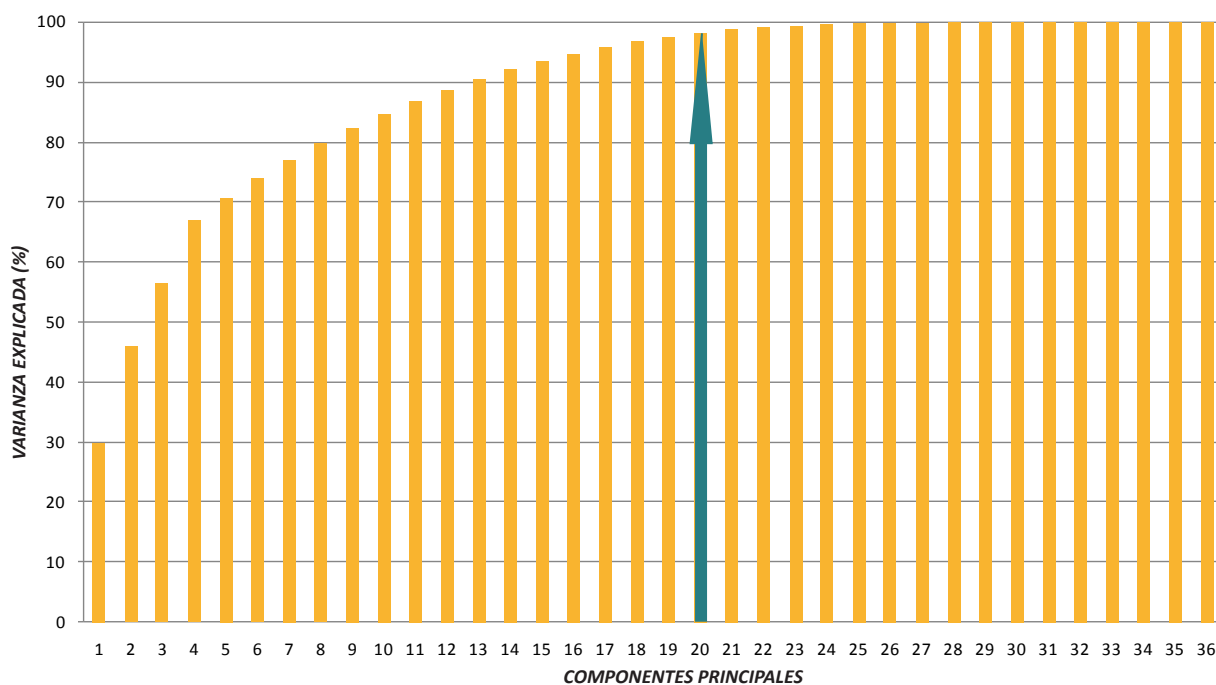


Figura 6.10. Porcentaje de varianza explicada por las CP

Para ilustrar la importancia relativa de las diferentes variable ambientales se presenta el análisis de las 5 primeras CP, que representan un 71% de la varianza explicada, especificando los coeficientes asociados (autovectores o *Eigen vector*) que permiten calcular cada CP como combinación lineal de las variables ambientales originales.

En la **Tabla 6.18** (Carga de los Factores) se puede observar el peso o influencia de cada variable sobre cada CP, quedando sombreadas las variables con mayor importancia o peso.

Tabla 6.18. Carga de Factores

VARIABLE	CP 1		CP 2		CP 3		CP 4		CP 5	
	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)	Corr.	% (Tot. %)
arc	0,0896	1 % (1 %)	-0,157	2 % (3 %)	-0,744	55 % (59 %)	-0,379	14 % (73 %)	-0,208	4 % (77 %)
are	0,1259	2 % (2 %)	-0,175	3 % (5 %)	0,5808	34 % (38 %)	0,6877	47 % (86 %)	-0,066	0 % (86 %)
ca	0,2113	4 % (4 %)	0,0428	0 % (5 %)	-0,536	29 % (33 %)	0,2078	4 % (38 %)	-0,366	13 % (51 %)
cic	-0,119	1 % (1 %)	-0,122	1 % (3 %)	-0,535	29 % (31 %)	-0,388	15 % (47 %)	-0,187	3 % (50 %)
codhi	0,1193	1 % (1 %)	-0,228	5 % (7 %)	0,4806	23 % (30 %)	0,5663	32 % (62 %)	-0,28	8 % (70 %)
crad	0,1287	2 % (2 %)	0,346	12 % (14 %)	-0,335	11 % (25 %)	-0,425	18 % (43 %)	0,5043	25 % (68 %)
curmd	-0,059	0 % (0 %)	0,0069	0 % (0 %)	0,0247	0 % (0 %)	0,0477	0 % (1 %)	-0,251	6 % (7 %)
dseq	0,554	31 % (31 %)	-0,057	0 % (31 %)	0,3947	16 % (47 %)	-0,294	9 % (55 %)	0,0005	0 % (55 %)
etott	0,751	56 % (56 %)	0,0552	0 % (57 %)	-0,45	20 % (77 %)	0,2998	9 % (86 %)	0,0755	1 % (87 %)
iha	-0,854	73 % (73 %)	-0,44	19 % (92 %)	-0,126	2 % (94 %)	0,0733	1 % (94 %)	0,0073	0 % (94 %)
ins	0,1718	3 % (3 %)	-0,027	0 % (3 %)	0,0409	0 % (3 %)	0,0507	0 % (3 %)	0,1159	1 % (5 %)
lim	-0,303	9 % (9 %)	0,4589	21 % (30 %)	-0,037	0 % (30 %)	-0,633	40 % (70 %)	0,3469	12 % (82 %)
mde	-0,731	53 % (53 %)	0,6104	37 % (91 %)	0,1543	2 % (93 %)	0,0776	1 % (94 %)	-0,028	0 % (94 %)
mo	-0,712	51 % (51 %)	0,1743	3 % (54 %)	0,0745	1 % (54 %)	-0,238	6 % (60 %)	-0,275	8 % (67 %)
mo_sup	-0,76	58 % (58 %)	0,1496	2 % (60 %)	-0,04	0 % (60 %)	-0,161	3 % (63 %)	-0,296	9 % (72 %)
n_sup	-0,479	23 % (23 %)	-0,099	1 % (24 %)	-0,085	1 % (25 %)	-0,291	8 % (33 %)	0,0992	1 % (34 %)
orien	-0,004	0 % (0 %)	0,0099	0 % (0 %)	-0,046	0 % (0 %)	0,0042	0 % (0 %)	-0,05	0 % (0 %)
osc1	0,0005	0 % (0 %)	0,7368	54 % (54 %)	-0,408	17 % (71 %)	0,4703	22 % (93 %)	0,03	0 % (93 %)
osc2	0,1947	4 % (4 %)	0,6507	42 % (46 %)	-0,477	23 % (69 %)	0,5054	26 % (94 %)	0,0661	0 % (95 %)
ph	0,0628	0 % (0 %)	0,3316	11 % (11 %)	-0,086	1 % (12 %)	-0,639	41 % (53 %)	-0,416	17 % (70 %)
pin	-0,643	41 % (41 %)	-0,662	44 % (85 %)	-0,292	9 % (94 %)	0,1427	2 % (96 %)	0,0715	1 % (96 %)
po	-0,663	44 % (44 %)	-0,63	40 % (84 %)	-0,284	8 % (92 %)	0,1433	2 % (94 %)	0,091	1 % (95 %)
pp	-0,795	63 % (63 %)	-0,366	13 % (77 %)	-0,358	13 % (89 %)	0,233	5 % (95 %)	0,02	0 % (95 %)
ps	0,5528	31 % (31 %)	-0,291	8 % (39 %)	-0,423	18 % (57 %)	0,0034	0 % (57 %)	-0,17	3 % (60 %)
psb	0,26	7 % (7 %)	0,3259	11 % (17 %)	-0,147	2 % (20 %)	-0,321	10 % (30 %)	-0,363	13 % (43 %)
pte	-0,727	53 % (53 %)	0,0475	0 % (53 %)	0,0307	0 % (53 %)	-0,041	0 % (53 %)	-0,048	0 % (54 %)
ptt	-0,727	53 % (53 %)	-0,548	30 % (83 %)	-0,325	11 % (93 %)	0,1906	4 % (97 %)	0,0631	0 % (97 %)
pvt	-0,638	41 % (41 %)	0,4515	20 % (61 %)	-0,293	9 % (70 %)	0,387	15 % (85 %)	0,0085	0 % (85 %)
sdef	0,8216	67 % (67 %)	0,1703	3 % (70 %)	-0,008	0 % (70 %)	-0,092	1 % (71 %)	0,0389	0 % (71 %)
ssup	-0,806	65 % (65 %)	-0,497	25 % (90 %)	-0,142	2 % (92 %)	0,0509	0 % (92 %)	0,0456	0 % (92 %)
ta	0,7564	57 % (57 %)	-0,584	34 % (91 %)	-0,093	1 % (92 %)	-0,098	1 % (93 %)	0,0333	0 % (93 %)
tf	0,5008	25 % (25 %)	-0,103	1 % (26 %)	-0,012	0 % (26 %)	0,1856	3 % (30 %)	-0,247	6 % (36 %)
tmaxc	0,6665	44 % (44 %)	0,0456	0 % (45 %)	-0,564	32 % (76 %)	0,3845	15 % (91 %)	0,0988	1 % (92 %)
tmc	0,7961	63 % (63 %)	-0,219	5 % (68 %)	-0,363	13 % (81 %)	0,1687	3 % (84 %)	0,0517	0 % (84 %)
tmf	0,5779	33 % (33 %)	-0,754	57 % (90 %)	0,0655	0 % (91 %)	-0,257	7 % (97 %)	0,0133	0 % (97 %)
tminf	0,4326	19 % (19 %)	-0,83	69 % (88 %)	0,0555	0 % (88 %)	-0,281	8 % (96 %)	0,014	0 % (96 %)
Var. Expl.	30 % (30 %)		16 % (46 %)		11 % (57 %)		10 % (67 %)		4 % (71 %)	

Tabla 6.19. Autovectores o Valor Propio (Eigen Vector)

VARIABLE ESTANDARIZADA	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
arc	0,006911	0,998937	0,027283	-0,065468	-0,381601	-0,19672	-0,17793
are	-0,005697	1,000746	0,038328	-0,072832	0,298016	0,356651	-0,056076
ca	0,009395	1,00103	0,064319	0,017803	-0,274894	0,107762	-0,312933
cic	0,005994	1,004303	-0,036284	-0,050598	-0,274313	-0,201236	-0,159999
codhi	-0,000086	1,019269	0,036318	-0,094979	0,24662	0,293696	-0,23992
crad	-0,002966	0,998948	0,039167	0,144056	-0,171873	-0,220244	0,431474
curmd	-0,002537	0,99805	-0,017982	0,002854	0,012693	0,024728	-0,215039
dseq	-0,005654	0,974704	0,168623	-0,023586	0,202503	-0,152263	0,000413
etott	0,007745	1,001508	0,228558	0,022984	-0,231072	0,155451	0,064586
iha	0,003403	0,999072	-0,259891	-0,183356	-0,064578	0,038008	0,006251
ins	-0,004241	0,999535	0,052298	-0,011356	0,021003	0,026299	0,099165
lim	0,000799	0,997714	-0,09213	0,191067	-0,019116	-0,328154	0,296865
mde	0,000311	0,996758	-0,222454	0,254163	0,079171	0,040263	-0,02376
mo	-0,001493	0,993512	-0,216592	0,072595	0,038216	-0,123454	-0,235028
mo_sup	0,000639	1,002609	-0,231381	0,062291	-0,020275	-0,083674	-0,252883
n_sup	0,004407	0,999446	-0,145821	-0,041377	-0,04375	-0,15111	0,08491
orien	0,003268	1,001164	-0,00123	0,004125	-0,023669	0,002191	-0,042576
osc1	0,011224	1,000352	0,00015	0,306797	-0,209236	0,243877	0,025696
osc2	0,012503	0,999508	0,059245	0,270946	-0,244791	0,262106	0,056546
ph	0,001062	0,996481	0,019104	0,138085	-0,044355	-0,331127	-0,356158
pin	0,005058	0,994311	-0,195556	-0,275764	-0,149657	0,074024	0,061168
po	0,004858	0,993627	-0,201707	-0,262276	-0,145573	0,074303	0,077857
pp	0,007334	0,994421	-0,241933	-0,152359	-0,183569	0,120821	0,017101
ps	0,000073	0,99782	0,16824	-0,120997	-0,217061	0,00178	-0,145447
psb	-0,000026	0,999149	0,079129	0,135707	-0,075332	-0,166453	-0,310769
pte	0,001757	0,99932	-0,22127	0,019789	0,015754	-0,021046	-0,040721
ptt	0,006077	0,99384	-0,221159	-0,228233	-0,16685	0,098839	0,053993
pv	0,007622	0,993618	-0,19423	0,187982	-0,15036	0,200699	0,007286
sdef	-0,001786	0,998608	0,25005	0,070896	-0,004327	-0,04768	0,03329
ssup	0,002367	0,998112	-0,245226	-0,206881	-0,072742	0,026407	0,039029
ta	-0,001196	0,996409	0,230219	-0,243349	-0,047713	-0,050962	0,028527
tf	-0,006768	1,001557	0,152432	-0,042677	-0,00638	0,096223	-0,211573
tmaxc	0,011547	0,999095	0,202852	0,018971	-0,289181	0,199395	0,084564
tmc	0,005448	0,998682	0,242288	-0,091301	-0,186012	0,087504	0,044223
tmf	-0,00507	0,996786	0,17588	-0,313745	0,033622	-0,133115	0,011401
tminf	-0,004799	0,996829	0,131672	-0,345555	0,028483	-0,145469	0,011946

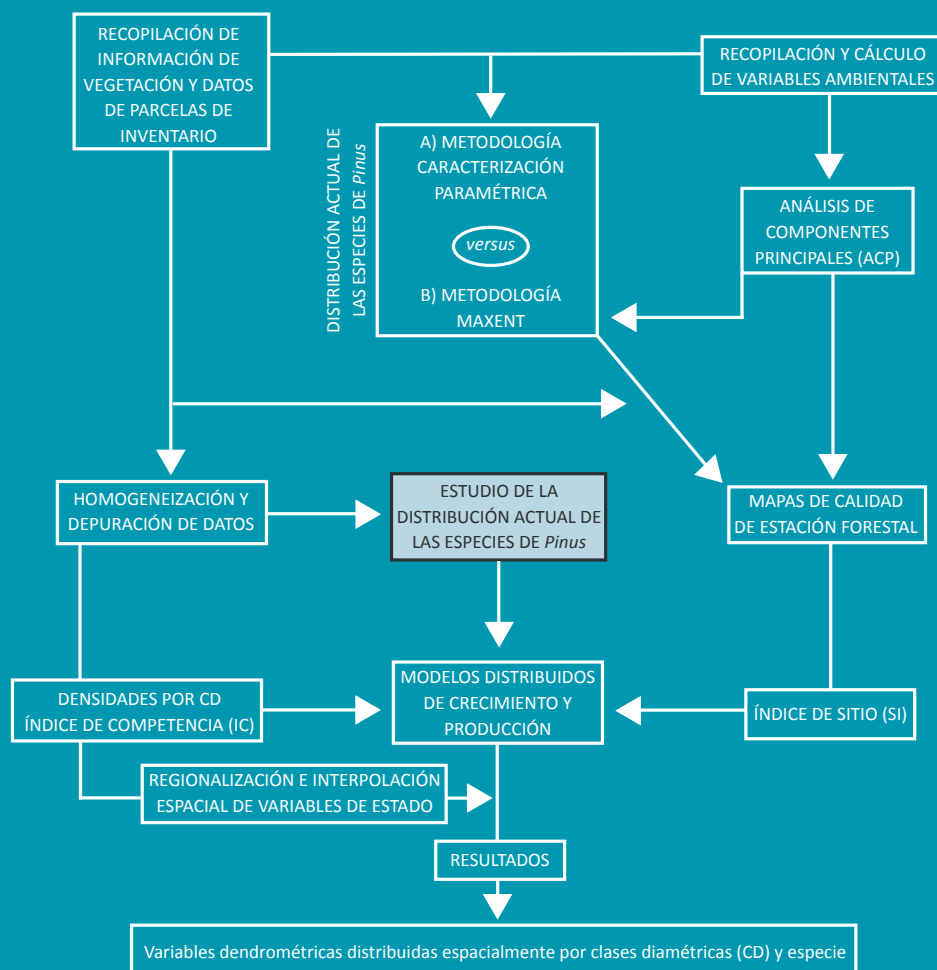
Mediante la comparación de ambas a tablas se puede observar que cuanto mayor es el coeficiente asignado a la variable en la **Tabla 6.19** (autovectores o valor propio) en valor absoluto, mayor es el peso o influencia de la variable ambiental en la CP.

Cabe destacar que aunque el ACP se llevó a cabo con una la doble finalidad: evitar la multicolinealidad y reducir la dimensionalidad; su principal aplicación fue evitar la presencia de variables altamente correlacionadas entre sí, para poder de este modo, llevar a cabo los modelos basados en análisis de regresión. No obstante también se redujo la dimensionalidad de 36 a 20 variables, sin pérdida significativa de información ambiental.



7

Distribución actual de las especies de pinos



7.1. Antecedentes y objetivos

En los últimos años se han producido grandes avances en la determinación territorial de la vegetación gracias al desarrollo de los sistemas de información geográficos y a la creciente disponibilidad de recursos de almacenamiento de memoria en los dispositivos informáticos. Esto ha permitido retomar un fecundo trabajo de delimitación de la superficie forestal de Andalucía, que partía de importantes antecedentes históricos como los Mapas de Vegetación de la Provincia de Málaga y Cádiz (CEBALLOS y MARTÍN BOLAÑOS, 1930; CEBALLOS y VICIOSO, 1933) de la década de 1930 o el Mapa Forestal de España de RUIZ DE LA TORRE (1986-2002).

El desarrollo en la Comunidad Autónoma de la Red de Información Ambiental y su publicación a través de un canal específico en la web de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente han permitido aumentar la información de detalle sobre la vegetación, complementando a la que periódicamente se elabora para el desarrollo del Inventario Forestal Nacional.

Si bien la realidad física analizada es la misma, las diferentes escalas de trabajo, de fuentes originales de información fotogramétrica o de campo y la utilización de distintas tipologías (adaptadas al enfoque de cada uno de los trabajos), dan lugar a que las fuentes de información existentes sobre vegetación forestal ofrezcan resultados gráficos similares, pero no exactamente coincidentes. Esta fue la razón que motivó que en este estudio se elaborase una cartografía de distribución actual de las especies de pinos presentes en Andalucía, utilizando y confrontando la información de base preexistente.



7.2. Materiales

7.2.1. Mapa de Usos y Coberturas del Suelo de Andalucía escala 1:25.000, año 2007. Escala de detalle. (MUCVA)

El Mapa de Usos y Coberturas Vegetales de Andalucía, desarrollado por la REDIAM, que se actualiza cuatrienalmente desde 1991, constituye una de las principales fuentes de información de referencia sobre la distribución de la vegetación en Andalucía. El MUCVA, consultable en la página web de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (Red de Información Ambiental) contiene información sobre la composición florística y la estructura de la vegetación arbórea, con dos niveles de desagregación.

Esta cartografía vectorial se ha generado a partir de la fotointerpretación de las diferentes clases de vegetación y usos del suelo sobre imágenes de vuelos fotogramétricos. Cada polígono (tesela) cuenta con información de la vegetación existente a partir de un modelo de clasificación de la vegetación integrada en una leyenda con una estructura muy definida. La asignación de la vegetación a cada tesela se apoyó en trabajo de campo para la validación y se integraron los resultados mediante metodología SIG. El resultado es un mapa de vegetación a escala de semidetalle (1/25.000) que proporciona información exhaustiva sobre las especies que conforman el arbolado y el matorral.

7.2.2. Información cartográfica del Mapa Forestal Español (IFN3)

El M.F.E. proporciona información vectorial detallada y homogénea para todo el territorio español sobre el uso principal de cada tesela y su tipo estructural, del grado de cobertura y de las principales especies arbóreas cartografiadas. La información vectorial que constituye la base cartográfica de los inventarios de las parcelas del Inventario Forestal Nacional (IFN3) fue suministrada a la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía por el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (actual Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). El soporte en el que se proporcionó la información cartográfica fue en formato .e00 (Cobertura Arc-INFO® comprimida).

Esta cartografía vectorial conforma la base cartográfica del Mapa Forestal Español y análogamente al IFN, tiene carácter continuo y una periodicidad de actualización decenal. Constituye una herramienta muy valiosa por aportar información de interés para la ordenación forestal, la planificación de los aprovechamientos, la prevención de incendios forestales, el cambio climático, la capacidad de actuar como sumideros de CO₂, etc.

La información que se incluye en las coberturas hace referencia a las formaciones arboladas definidas para el Mapa Forestal de España, conteniendo datos sobre composición florística y estructura de la vegetación arbórea con tres niveles de desagregación. De acuerdo con el M.F.E., una formación arbolada representa la comunidad vegetal arbórea de orden superior con fisiología y biología homogénea y se define según la especie o mezcla de especies dominante o por la especial singularidad de la estructura de su vegetación.

El modelo de datos de cartografía de vegetación del M.F.E. que se ha utilizado en este estudio puede ser consultado en el documento "Información Cartográfica" incluido en la publicación del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) 1997-2007: Andalucía, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. (MARM, 2008).

7.2.3. Cartografía de Vegetación 1:10.000 de la Masa Forestal de Andalucía, año 1996-2006. (VEGE10)

El proyecto de Cartografía de Vegetación de la Masa Forestal de Andalucía a escala de detalle (1:10.000), fue desarrollado por la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente, Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), con la colaboración de las Universidades de Sevilla, Málaga, Córdoba, Granada, Almería, Jaén y Huelva. Consistió en el reconocimiento por fotointerpretación de unidades de vegetación sobre ortofotografía digital y su posterior verificación y corrección apoyándose en trabajos de campo. Este estudio contiene información sobre composición florística y estructura de la vegetación arbórea con seis niveles de desagregación.

La información vectorial comenzó a levantarse en 1994 pero no fue hasta 2006 cuando se terminó la fase de validación de campo. Por esta razón, el proyecto no es una fotografía simultánea de la vegetación de Andalucía en un determinado momento, sino que cada zona de trabajo fue realizada en diferentes años utilizando como referencia las ortofotografías más recientes de las que disponía en la CMA en el momento de abordarlas.

Este mapa constituye la base de desarrollo en las áreas forestales del SIOSE (Sistema de Información sobre los Usos de Suelo de España), siendo igualmente consultable en la página web de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía a través de la Red de Información Ambiental.

7.2.4. Parcelas de Inventario de los Proyectos de Ordenación de Montes Públicos de Andalucía

Como se ha expuesto en el **capítulo 5** se ha recopilado la información procedente de las parcelas de inventario de los Proyectos de Ordenación de Montes Públicos. Si bien el número inicial de proyectos revisados para la recopilación de datos espaciales de parcelas de inventario fue de 210, quedaron descartados 36 por motivos ya indicados anteriormente, resultando un total de 90.142 parcelas de inventario. Esta fuente de información puntual se ha utilizado como contraste de la información derivada de las coberturas vectoriales anteriores (que aportan información comparable y uniforme para todo el territorio), dado que la metodología en la que se basan los proyectos de ordenación permite disponer de una malla de información muy exhaustiva sobre la vegetación forestal actual de Andalucía.



7.3. Metodología

Con la información de partida, MUCVA, IFN3 y VEGE10 y parcelas de inventario de Proyectos de Ordenación, se llevó a cabo la transformación de información vectorial a formato ráster mediante herramientas de conversión de ArcGis® 9.3.

Para algunas de las fuentes de información fue preciso realizar transformaciones previas:

- La información cartografía correspondiente al IFN3, proporcionada en formato .e00 (Cobertura Arc-INFO® comprimida), se transformó a una cobertura vectorial.
- Dada la existencia en la información procedente de VEGE10 de teselas de vegetación correspondientes a pinares en las que no se especifica la especie, se procedió a completar dicha información contrastándola con el resto de cartografía de vegetación de referencia (Parcelas de Proyectos de Ordenación, Cartografía IFN3 y MUCVA), asignando la especie correspondiente a aquellas teselas que intersectarán con la información de referencia o la especie presente en las parcelas de inventario que estuvieran incluida en las teselas en las que no se tipificara la especie.
- En cuanto a las parcelas de inventario de los Proyectos de Ordenación, una vez recopilada la información puntual de los inventarios se procedió a la clasificación de las mismas por presencia y ausencia de especies de *Pinus* para generar superficies continuas (ráster 100 x100 m).

Para obtener superficies continuas a partir de los puntos de presencia o ausencia se ha utilizado la técnica de estimación no paramétrica o de interpolación de la estimación de densidad de *Kernel* (extensión *Fixed Kernel Density Estimator*, para ArcGis® 9.3), que consiste en posicionar un núcleo (*kernel*) o probabilidad de densidad sobre cada punto de observación de la muestra y estimar la densidad en cada intersección de una malla superpuesta al conjunto de puntos (LEONE *et al.*, 2003 citando a SEAMAN y POWELL, 1996; LEVINE, 2002), utilizando para ello la información de la totalidad de la muestra. La densidad para cada pixel se estima como el promedio de las densidades de todos los kernel que se superponen en ese punto (**Ecuación 7.1**). Las observaciones que están cerca de un punto de evaluación contribuirán más a la estimación de la densidad que las que están lejos de él, por lo tanto, este método tendrá un mayor grado de fiabilidad en zonas con mucha presencia y baja con escasos datos de presencia (SEAMAN POWELL, 1996).

$$f(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left\{\frac{(x - X_i)}{h}\right\} \quad (7.1)$$

Siendo n el número de puntos, h el parámetro de suavizado, x el vector de coordenadas que define la localización donde se estima la función y X_i el vector de coordenadas que define cada observación i .

De entre las distintas opciones de funciones *kernel* se optó por la cuártica, que es la que mejor se ha ajustado a la distribución actual de especies comparándola con el resto de información de vegetación de referencia, ajustando el factor de escala y suavizado (h), hasta maximizar la concordancia con la información de referencia.

Una vez rásterizada y homogeneizada la información de presencia y ausencia de las especies de pinos procedentes de las cuatro fuentes de información (MUCVA, IFN3, VEGE10 y parcelas de inventario) se generó un mosaico ráster único.

Para ello, en primer lugar se superpusieron todos los ráster de presencia mediante la herramienta “*Mosaic to new raster*” de ArcGis® 9.3.

A continuación, el ráster resultante se confrontó con una cobertura ráster de ausencia de las especies de pinos generada a partir de las parcelas de inventario de los Proyectos de Ordenación; de este modo, se afinó la cobertura ráster final eliminando superficie sin presencia constatada de pinos en base a la información con mayor nivel de detalle disponible (las parcelas de inventario de los Proyectos de Ordenación).

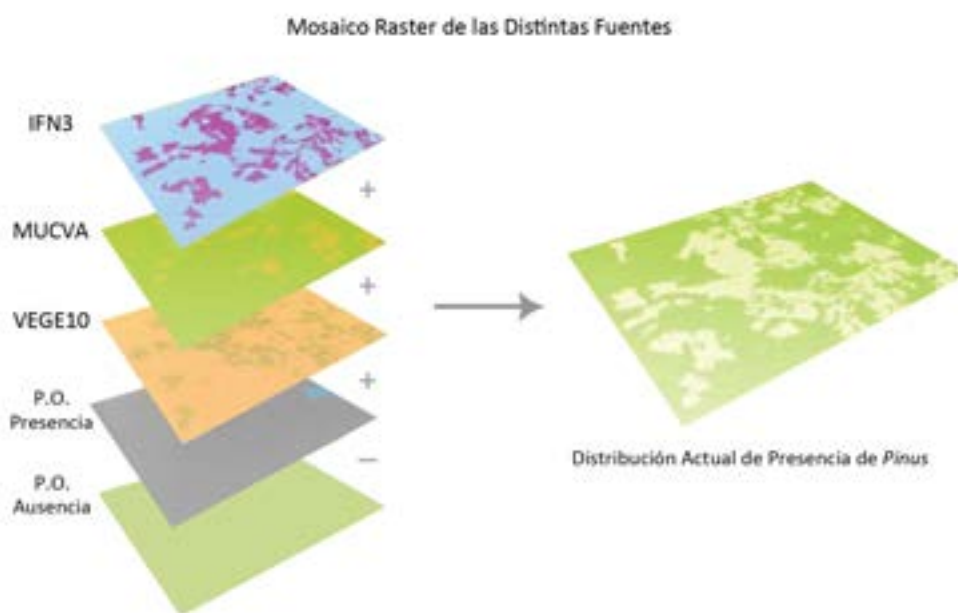


Figura 7.1. Fuentes y metodología de cálculo de la distribución actual de pinos.



7.4. Resultados

El resultado final del proceso metodológico descrito con anterioridad fue la obtención de una cobertura ráster de distribución actual de presencia de las especies de pinos para toda Andalucía que integra las fuentes de información de vegetación existente hasta el momento (**Figura 7.1**).

En la **Tabla 7.1** se muestran los resultados conjuntos de la superficie de presencia para cada una de las especies analizadas, para la totalidad de la región andaluza y su distribución por provincias.

Tabla 7.1. Superficie de distribución actual (ha) de las especies de pinos en Andalucía

PROVINCIA	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus pinea</i>	<i>Pinus nigra</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
Almería	136.406	48.475	3.130	55.896	34.924
Córdoba	4.010	37.755	100.397	81.690	
Granada	174.575	84.625	3.050		50.359
Huelva	2.393	40.373	202.530		
Jaén	160.360	128.264	88.830	92.140	38
Málaga	76.145	74.023	12.715	1.470	937
Sevilla	5.402	3.536	40.100	6	
Cádiz	5.619	5.273	25.035		
Total	564.910	422.324	475.787	231.202	86.258

En la **Tabla 7.2**, a título orientativo, se muestran los resultados por grandes áreas forestales de coníferas, definidas en base a la continuidad territorial de la presencia de las especies de pinos (véase **Figura 11.1**).

Tabla 7.2. Superficie de distribución actual de *Pinus* spp. en áreas forestales de coníferas de Andalucía

ÁREA	SUP. (ha) <i>Pinus halepensis</i>	SUP. (ha) <i>Pinus pinaster</i>	SUP. (ha) <i>Pinus pinea</i>	SUP. (ha) <i>Pinus nigra</i>	SUP. (ha) <i>Pinus sylvestris</i>
SIERRA MORENA	9.852	98.271	221.825	5	
SIERRAS DE CAZORLA SEGURA Y LAS VILLA	80.761	86.823	1.019	86.870	38
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	29.527	1.244	171	36.074	48
SIERRA DE MARÍA	31.736	2.094	231	1.076	238
PINARES INTERIORES ONUBENSES	229	11.370	47.986		
PINAR LITORAL ONUBENSE	508	2.239	112.688		
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	41.617	58.887	9.567	594	109
MONTES DE MÁLAGA	7.715	35	134		
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	39.827	34.251	1.074	1.923	1.592
SIERRA NEVADA	25.790	38.307	280	34.757	49.603
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	33.281	31.324	466	44.077	30.731
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	32.978	7.261	575	9.718	180
SIERRA DE HUÉTOR	15.794	12.511		2.368	1.525
CORREDOR SUBBETICA-MÁGINA-CAZORLA	69.405	3.836	146	4.308	
SIERRA DE GÁDOR	20.347	7.452		7.584	1.694
TOTAL	439.367	395.905	396.162	229.354	85.758

Cabe detallar que los datos totales aquí presentados no coinciden con los ofrecidos anteriormente para toda la región andaluza ya que no se han considerado la superficie de presencia de pinar fuera de las grandes áreas forestales de coníferas propuestas en este trabajo.

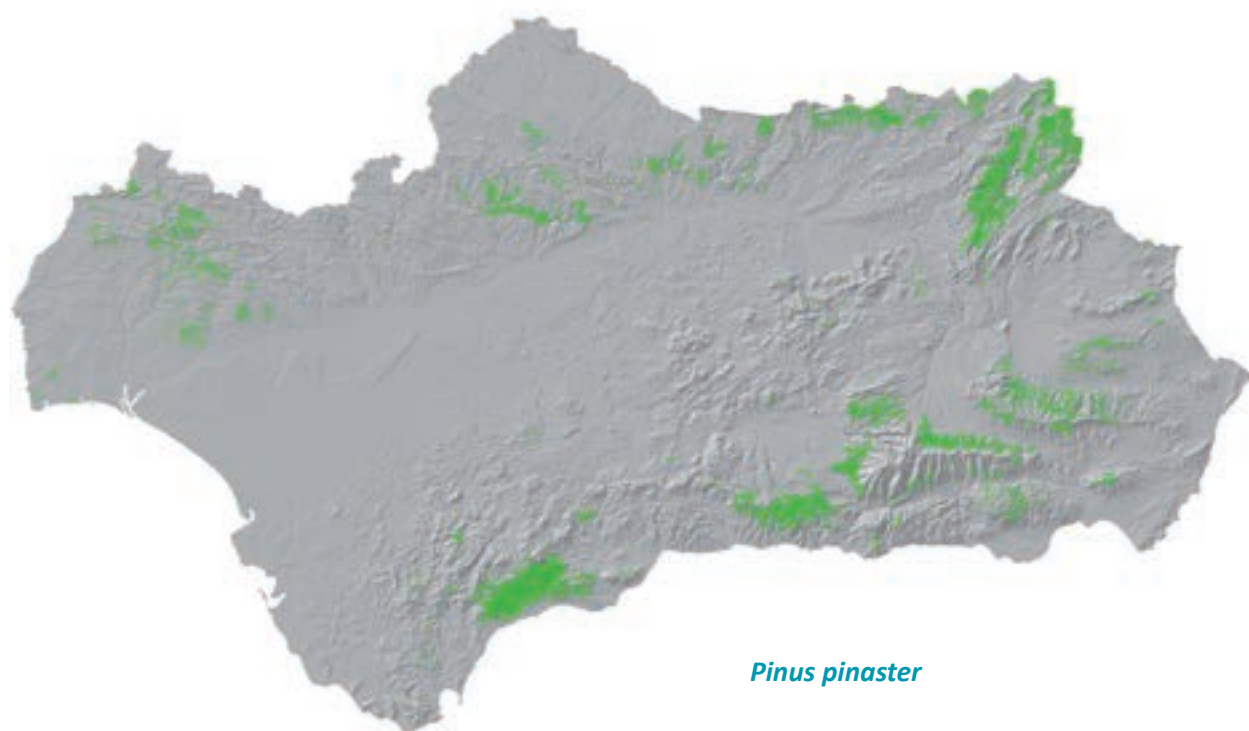
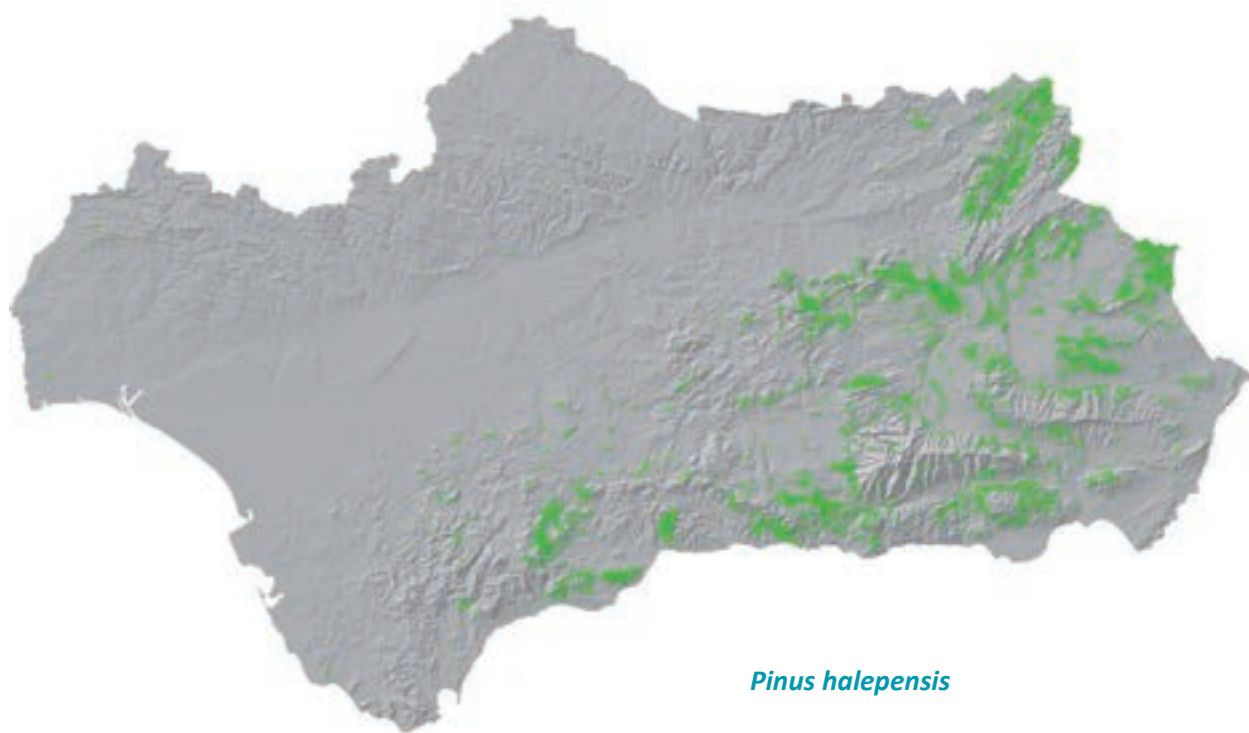


Figura 7.2. Distribución actual de las especies de pinos en Andalucía

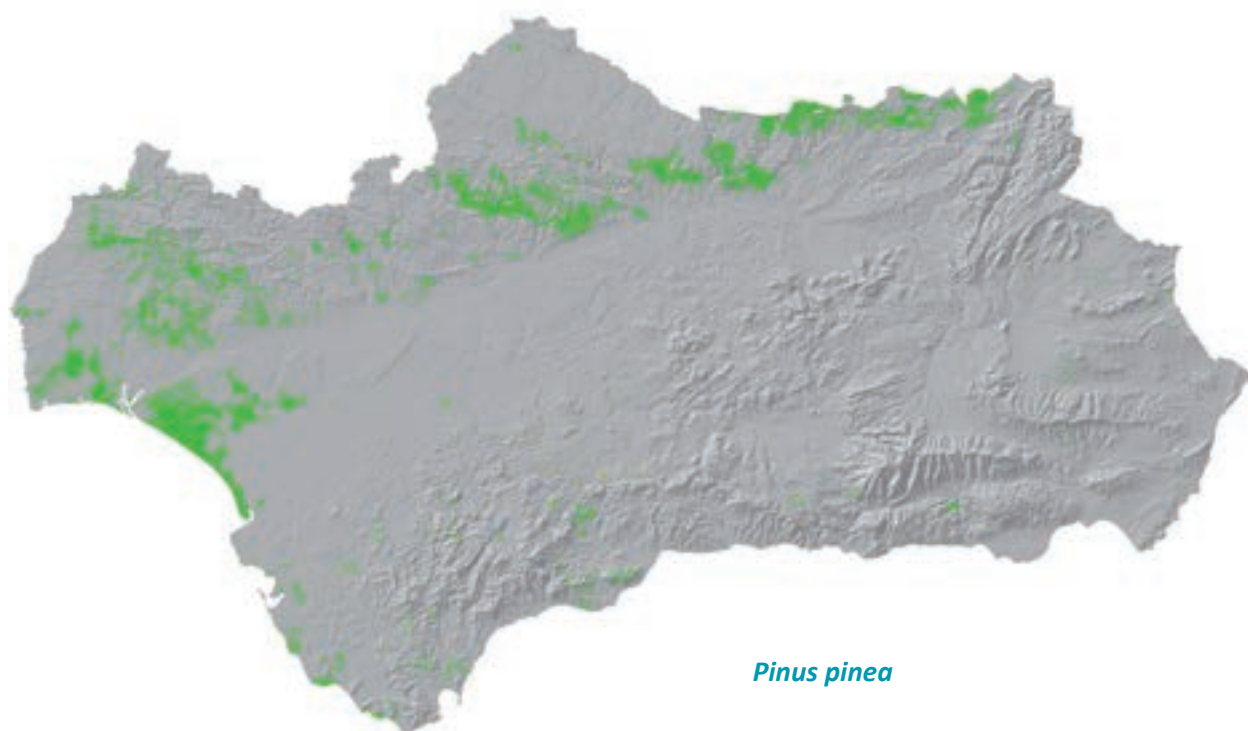
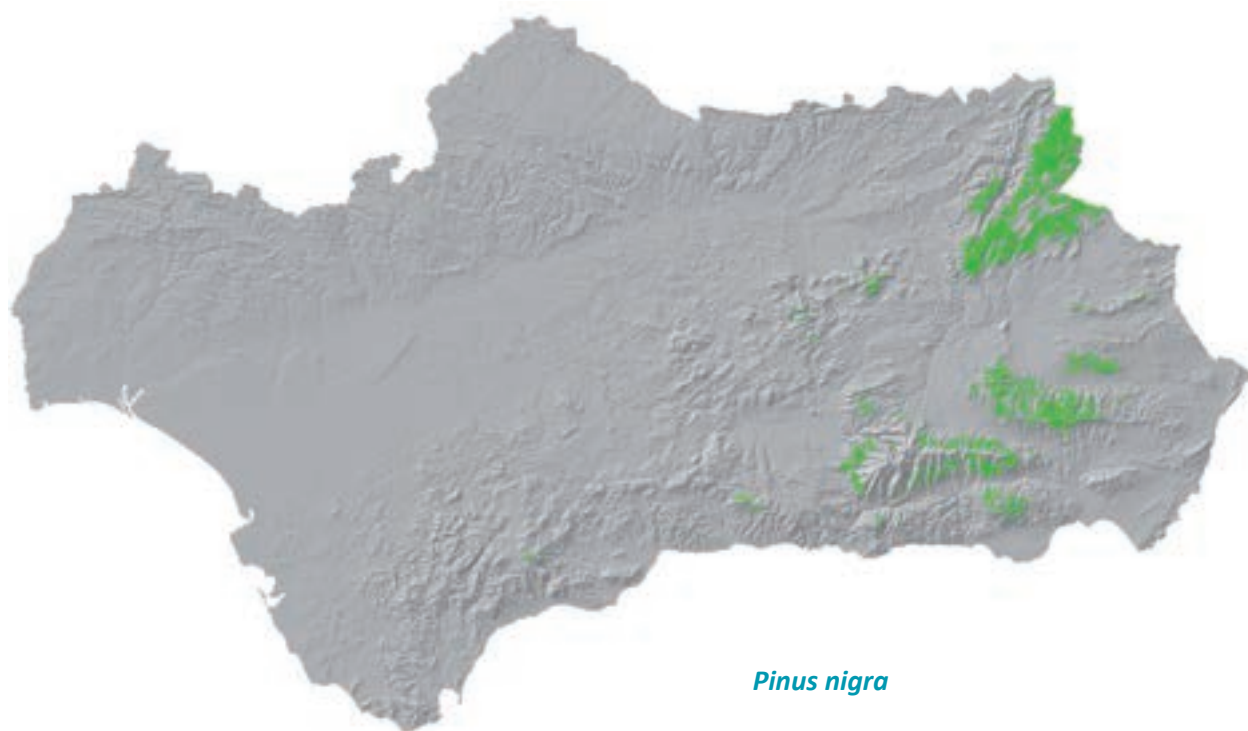


Figura 7.2. Distribución actual de las especies de pinos en Andalucía. *Continuación*

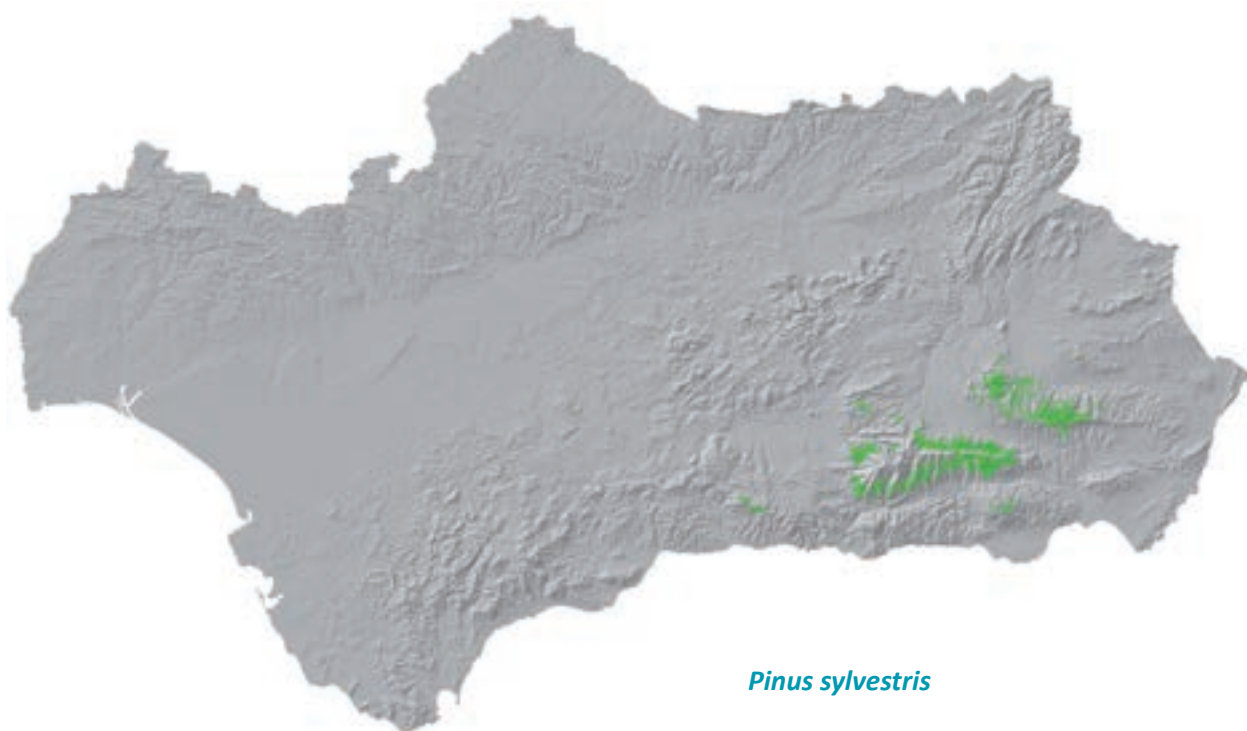


Figura 7.2. Distribución actual de las especies de pinos en Andalucía. *Continuación*

Como se ha expuesto, la cobertura de distribución actual de especies de pinos en la Comunidad Autónoma de Andalucía integra la información oficial disponible sobre vegetación. Cada una de las coberturas originales (MUCVA, IFN3, VEGE10, parcelas de inventario) ha sido el fruto de exhaustivos trabajos con controles de calidad asociados que han permitido la correcta asignación de una especie a una tesela o parcela de inventario, ya fuera como especie principal o secundaria.

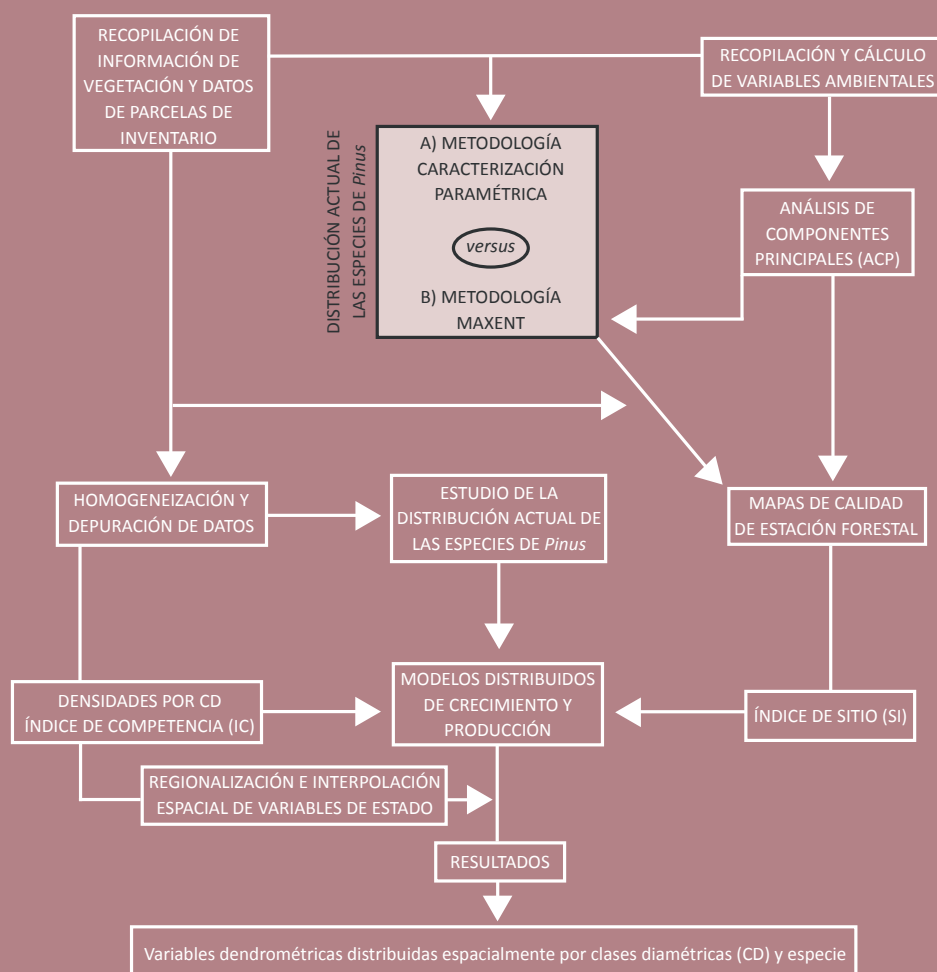
Debido a los procesos metodológicos utilizados en cada una de las fuentes de información originales (factores como la distinta escala de trabajo y resolución espacial, la extrapolación de resultados a partir de puntos de muestreo (inventarios) o la asignación por fotointerpretación de tipologías de vegetación, incorporan cierto nivel de incertidumbre que ha podido ser reducido al poder confrontar entre sí las cuatro fuentes de información de modo complementario. Este es un factor a tener en cuenta al comparar con las cifras obtenidas en este estudio con las obtenidas a partir de las fuentes de referencia.

Por otro lado, es importante destacar que la superficie correspondiente a las diferentes especies de pinos no es aditiva dado que en cada celdilla del ráster de distribución actual de pinos en Andalucía pueden coincidir varias especies; la sola presencia de la especie, aunque fuese de forma acompañante en alguna de las fuentes empleadas, da lugar a su inclusión, dando por ello una apariencia de sobreestimación de la superficie si se consideran todas las especies analizadas.





Autoecología de las especies de pinos



8.1. Antecedentes y objetivos

La autoecología es la ecología de las especies o los individuos considerados aisladamente y se ocupa específicamente de cómo responden los organismos a las características del medio externo (MARGALEF, 1974).

Los estudios autoecológicos de las especies forestales en España cuentan ya con una dilatada trayectoria. De hecho, desarrollaron inicialmente con el estudio autoecológico de las principales especies de pinos peninsulares abarcando un gran número de artículos y monografías basados en la metodología de la autoecología paramétrica (NICOLÁS y GANDULLO, 1967, 1969; GANDULLO, 1972; GANDULLO, 1974; ELENA *et al.*, 1985; SÁNCHEZ PALOMARES *et al.*, 1990; ELENA y SÁNCHEZ PALOMARES, 1991; GANDULLO y SÁNCHEZ PALOMARES, 1994; GANDULLO *et al.*, 2000).

SÁNCHEZ PALOMARES *et al.* (2007) sintetizan en cuatro las razones que pueden determinar que una especie no esté presente en una localidad: porque no ha podido llegar; porque llegó pero no pudo establecerse con éxito debido a que alguna de las condiciones del medio lo impidieron; porque llegó y se estableció, pero fue expulsada como consecuencia de la interacción con otros organismos vivos de la comunidad existente; porque llegó y se estableció, pero fue eliminada debido a la actuación humana. En el caso del estudio de la autoecología de los pinares en Andalucía, se parte de una presencia actual real que responde a condiciones ambientales pero que está muy influida por las actuaciones antrópicas históricas que han actuado tanto favoreciendo la presencia actual de las especies (especialmente a raíz de las repoblaciones realizadas en el siglo XX y, ya más recientemente, del abandono de parte del territorio) como reduciendo su área de distribución potencialmente favorable (pueden ser ejemplos especialmente ilustrativos el área actualmente restringida de los pinares silvestres autóctonos).

El hábitat actual potencialmente idóneo de una especie estará determinado por la existencia de condiciones del medio que no impidan su establecimiento con éxito y favorezcan su perpetuación, incluyendo tanto los factores abióticos como los bióticos. Estas variables delimitarán el área actual de hábitat, concepto de base ecológica de gran utilidad práctica para la silvicultura aplicada. Si la determinación del área potencial de distribución la circunscribimos en un entorno evolutivo, teniendo en cuenta el marco cambiante de las condiciones ambientales (especialmente las climáticas, lo que en la actualidad cobra especial relevancia), obtendremos, además, una importante herramienta para la planificación territorial.

El punto de partida para la aprehensión de las relaciones entre las condiciones ambientales y la observación sobre la presencia o ausencia de las especies es la asociación intuitiva de relaciones entre unas y la otra: la repetición de la presencia de una especie conduce a asociar con esta manifestación los valores umbrales u otros (medias, medianas) que caractericen a los factores ambientales. Desde que el uso de los ordenadores permite realizar potentes procesos de cálculos, esta capacidad de asociación ha sido multiplicada, desarrollándose en paralelo diversos métodos para poner en relación el fenómeno que se desea explicar (la presencia o, en su caso, abundancia de una especie) con el valor que adoptan las variables definidoras del biotopo (ALONSO PONCE, 2008).

Para la caracterización del hábitat es preciso contar con información de partida lo más representativa posible. También es un requisito importante que la información se haya obtenido a partir de metodologías que permitan realizar contrastes estadísticamente robustos entre la distribución de las especies y las variables ambientales que definen el hábitat.

En el momento actual, uno de los principales problemas que debe resolver la obtención de relaciones entre los factores ambientales y la presencia de una especie es la distinta escala de resolución de los datos originales y el carácter más o menos continuo de esta información. La escala de aproximación de algunos de los factores ambientales (especialmente los relacionados con la fisiografía) tiene un gran nivel de detalle porque su obtención se basa en la aplicación de algoritmos informáticos de gran nivel de precisión sobre datos originales de grado muy fino, prácticamente continuos. En otros casos, la resolución de la información de partida es más grosera (ejemplo: el espaciamiento de las estaciones meteorológicas o las calicatas de suelos) lo que obliga a llevar a cabo procesos intermedios de interpolación para lograr representaciones territoriales continuas.

Para delimitar el hábitat actual se parte de una serie de puntos de muestreo que registren la presencia de la especie analizada y los valores que adopten las condiciones ambientales (variables de biotopo) que permitan la definición del hábitat. Estas variables ambientales pueden ser de tres tipos: fisiográficas, climáticas y edáficas. Con la madurez de los sistemas de información territorial y el mayor esfuerzo en la obtención de datos ambientales, en los últimos años se han producido avances muy significativos en la resolución espacial de las variables climáticas y fisiográficas; las variables edáficas, por el contrario, están sujetas a la realización de calicatas cuya intensidad de muestreo nunca parece ser suficiente bajo las condiciones mediterráneas. En este sentido, para este estudio se ha contado con la mejor información disponible, derivada del trabajo previo de la Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente (RODRÍGUEZ, 2008).

Como se ha expuesto anteriormente, los trabajos preliminares de este estudio pusieron a disposición la información derivada de 92.142 parcelas de inventario de Proyectos de Ordenación de Andalucía. Sin embargo la presencia de divergencias de detalle en los modelos de datos empleados para la realización de estos inventarios desaconsejaron emplear esta fuente como la información base para determinar los modelos de autoecología de las especies de pinos de Andalucía.

Por el contrario, las parcelas de muestreo del Inventario Forestal Nacional III, si bien cuentan con un número de parcelas menor (**Tabla 8.1**), se basan en una metodología homogénea de toma y asignación de datos y en una malla de muestro regular y uniforme, lo que convierte a esta fuente de información en una opción más recomendable para realizar análisis autoecológicos a escala de toda la región.

En relación con la información de partida de vegetación es importante remarcar que no se ha discriminado el origen de los pinos presentes en el territorio, es decir, no se ha distinguido entre categorías tales como pinares procedentes de repoblación, pinares naturales o naturalizados debido a que no se contaba con una fuente cartográfica de detalle que abarcara todo el territorio de estudio y las cinco especies.

Lo anterior introduce una fuente de error en los modelos generados (que hay que tener en cuenta en la interpretación de los resultados), al igualar la relevancia de la presencia de las especies cuando realmente se pueden dar lugar a condiciones de vegetación óptimas, subóptimas o, incluso, claramente deficientes, como es el caso de algunas estaciones del pino silvestre en la Sierra de los Filabres cuyas repoblaciones manifiestan los efectos de una clara falta de idoneidad, tal y como han puesto de manifiesto recientes trabajos de investigación (FERNÁNDEZ CANCIO *et al.*, 2011; SÁNCHEZ SALGUERO *et al.*, 2012).

En este estudio se ha caracterizado el hábitat actual de las especies de pinos presentes en Andalucía estableciendo los valores que definen este hábitat. Para ello, se ha partido de la información recopilada en los apartados anteriores, abordándose este estudio autoecológico a partir de dos metodologías distintas:

- ❑ Distribución potencial de una especie a partir de la caracterización paramétrica de variables del medio físico o factores de biotopo. (*Metodología caracterización paramétrica*).
- ❑ Distribución de probabilidades de máxima entropía de presencia de una especie (*Metodología MaxEnt*).



8.2. Metodología caracterización paramétrica

8.2.1. Materiales

8.2.1.1. Datos de inventario de las distintas especies del género *Pinus*. Parcelas del IFN3

Bajo el concepto de nicho ecológico se incluye la respuesta (presencia versus ausencia y abundancia) de la especie a la incidencia de los factores ambientales. La autoecología paramétrica engloba una serie de técnicas de análisis (que en su base se derivan de análisis multivariante de regresión), que han ido evolucionando con el paso del tiempo, las cuales comparten el enfoque del método de las envolventes ambientales cuya finalidad es calcular el nicho ecológico de una especie (descrito por su presencia/ausencia y abundancia en una red de puntos de muestreo) como la mínima envolvente del espacio multidimensional conformado por los factores ambientales considerados (definidos por los valores que adopten las variables ambientales en los puntos de muestreo). Los estudios de autoecología paramétrica responden a un planteamiento empírico o de caja negra: al contrario que los modelos de tipo mecanicista, no pretenden explicar las relaciones de causa-efecto que relacionan la presencia de una especie con la magnitud de los factores ambientales.

Como se ha expuesto, para realizar los modelos de autoecología paramétrica de las distintas especies del género *Pinus* en Andalucía se precisan de datos de muestreo con el mayor grado de representación posible. Por este motivo se optó por utilizar los datos de presencia proporcionados en el IFN3 (**Tabla 8.1**).

Tabla 8.1. Número de parcelas con presencia de pinos. IFN3

ESPECIE	NÚMERO DE DATOS DE PRESENCIA. PARCELAS IFN3
<i>Pinus halepensis</i>	2.076
<i>Pinus pinaster</i>	1.518
<i>Pinus pinea</i>	1.573
<i>Pinus nigra</i>	1.043
<i>Pinus sylvestris</i>	302

8.2.1.2. Variables ambientales

La autoecología paramétrica requiere disponer de variables ambientales continuas seleccionadas como variables que expliquen la presencia de la vegetación en el territorio.

Como punto de partida se contaba con las 36 variables ambientales definidoras del biotopo recopiladas para este estudio (véase **Capítulo 6**). De entre todas ellas se descartaron la profundidad de suelos y la duración de la sequía por ser variables categóricas.

8.2.2. Metodología

El hábitat actual de una especie vegetal depende, como se ha expresado, de factores ambientales que son descritos por variables, cuya medición en ocasiones es difícil de llevar a cabo. Relacionado con el concepto del hábitat actual, el área potencial de una especie delimita espacialmente el territorio donde puede desarrollarse correctamente teniendo en cuenta sólo las variables del medio físico (orografía, suelo y clima) y, en sentido estricto, también las variables bióticas de naturaleza no antrópica. Además del área potencial de presencia, los métodos que permiten definir el hábitat actual y la distribución potencial pueden determinar la aptitud del medio para el desarrollo óptimo de la especie, representada por la calidad de la estación forestal o índice de sitio.

En este estudio se ha seguido la metodología de caracterización paramétrica de los biotopos ocupados por parcelas con presencia de la especie estudiada, realizando posteriormente una extrapolación de lo observado al resto del territorio (GANDULLO y SÁNCHEZ PALOMARES, 1994; GÓMEZ, *et al.*, 2002; GANDULLO, *et al.*, 2004a, 2004b; SÁNCHEZ PALOMARES, *et al.*, 2007, 2008; ALONSO PONCE, *et al.*, 2010). En estas publicaciones se reúnen las variables ecológicas cuya caracterización permite delimitar correctamente la estación de la especie y se propone un procedimiento para acotar los intervalos óptimos y marginales de las variables.

El fundamento de esta metodología consiste en establecer los valores de los parámetros ambientales que caracterizan la estación ecológica en una red representativa de parcelas con presencia de la especie en estudio, para posteriormente extrapolar espacialmente esta caracterización a la totalidad del territorio.

Dada una distribución de los valores de una variable cualquiera y siendo Lli el valor mínimo y LSi el valor máximo de la serie de datos, el método define como intervalos marginales máximo y mínimo ($Lli-Uli$, $LSi-USi$) a los definidos por los cuantiles que recogen el 10% de las parcelas a uno y otro lado de la distribución; intervalos extramarginales a los que se encuentran fuera del rango (*menor que Lli* , *mayor que LSi*), y el intervalo óptimo al definido por el cuantil central de la distribución u 80% del área central ($Uli-USi$). La distribución óptima de la especie quedaría definida por el área en donde todas las variables ecológicas consideradas son óptimas, mientras que la potencial sería la definida por el área con un número determinado de variables ecológicas óptimas.

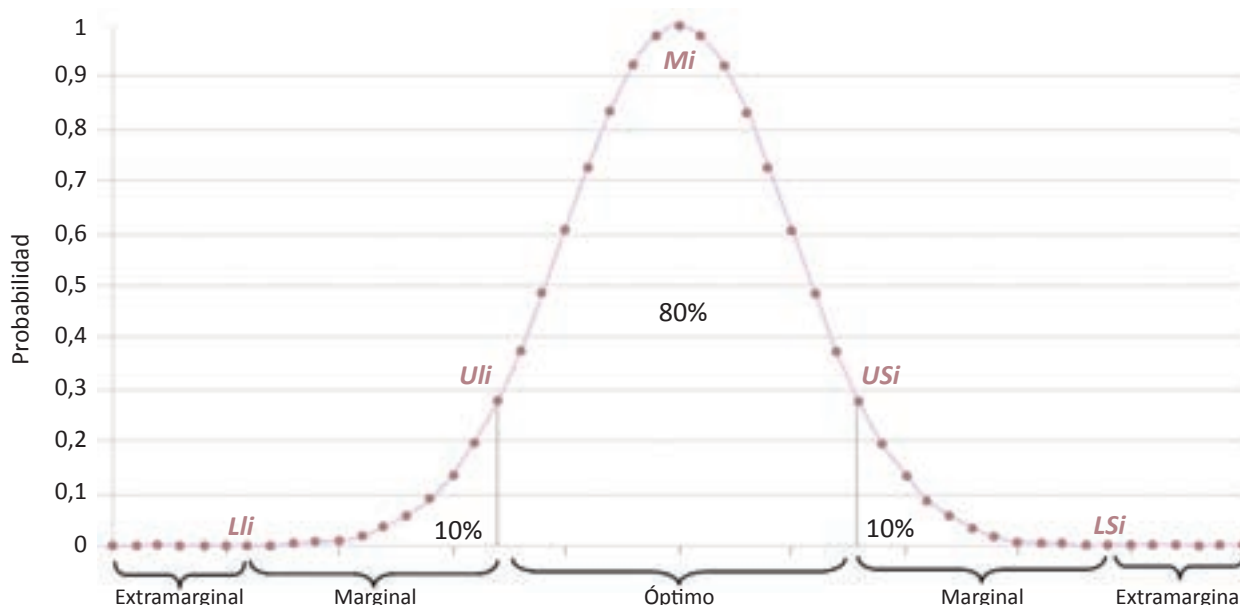


Figura 8.1. Clasificación de los intervalos de una variable ecológica

Dado un histograma o distribución de frecuencia de una variable “i” a partir de la red representativa de parcelas, se definen los siguientes parámetros:

PARÁMETRO	NOMBRE	VALOR DE LA VARIABLE EN LA SERIE
Lli	Límite Inferior	valor mínimo
Uli	Umbral Inferior	valor percentil 10
Mi	Mediana	valor de la mediana o percentil 50
USi	Umbral Superior	valor percentil 90
LSi	Límite Superior	valor máximo

La metodología de aplicación de la autoecología paramétrica ha incluido el cálculo del **Índice de Potencialidad**, publicado por primera vez por SÁNCHEZ PALOMARES *et al.* (2004) y desarrollado en trabajos posteriores. Este índice permite evaluar la aptitud de una estación en relación con la mayor o menor posibilidad de éxito a la hora de realizar una introducción o restauración de una especie forestal, mediante un indicador numérico que es función del valor que adopta un parámetro ambiental dado evaluando si este valor se sitúa dentro de los tramos centrales o marginales definidos.

El procedimiento de cálculo del índice de potencialidad es el siguiente:

Dada una estación determinada, para cada parámetro ambiental *i*, se calculan los valores que definen el hábitat de la especie en estudio: *Lli*, *Uli*, *Mi* (valor medio), *USi* y *LSi*.

Para un valor cualquiera del parámetro *xi*, el índice de aptitud *pi* toma los siguientes valores:

- $pi = 1$ si $xi = Mi$.
- pi será proporcional a la distancia $(xi - Mi)$ e inferior a 1 si pi está dentro del intervalo (Uli, USi) .
- en otro caso pi disminuirá linealmente desde el valor que toma en *Uli* hasta alcanzar el valor cero en *Lli* y, análogamente, entre *USi* y *LSi*.

Es decir:

- Para el intervalo (Uli, USi) : $pi = 1 - (|Mi - xi| / (USi - Uli))$
- Para el intervalo (Lli, Uli) : $pi = (USi - Mi)(xi - Lli) / ((USi - Uli)(Uli - Lli))$
- Para el intervalo (USi, LSi) : $pi = (Mi - Uli)(LSi - xi) / ((USi - Uli)(LSi - USi))$
- Para cualquier valor fuera de (Lli, LSi) : $pi = 0$

Para el conjunto de todos los parámetros ambientales, el indicador final conjunto (*indicador de potencialidad* = *IPot*) queda definido como el producto de todos los índices de aptitud obtenidos de manera individual para cada parámetro, de forma análoga a como se definen otros índices factoriales.

Con objeto de permitir una mejor visualización comparativa de los resultados, se ha realizado una transformación del indicador de potencialidad (**Ecuación 8.1**), haciéndolo igual al logaritmo decimal del producto de los índices de aptitud (multiplicados éstos por 10^4) y dividiendo el resultado final por el número de parámetros considerados ($NP=34$). Esta transformación se ha realizado en el caso de que todos los índices de aptitud de los parámetros para la especie considerada sean mayores que cero. Si alguno de ellos tomase ese valor, se situaría fuera del intervalo definido entre los límites inferior y superior y, por consiguiente, de acuerdo con lo establecido anteriormente, estaríamos en el hábitat extramarginal, no procediendo valoración de aptitud alguna.

$$\text{Es decir, } I_{pot} = \frac{1}{NP} \log(p_1 10^4 \cdot p_2 10^4 \cdots p_{NP} 10^4) \quad (8.1)$$

$$\text{o, lo que es lo mismo, } I_{pot} = 4 + \frac{1}{NP} \log(p_1 \cdot p_2 \cdots p_{NP})$$

De esta forma, el valor de *IPot* varía teóricamente desde prácticamente cero hasta cuatro, independiente del número de parámetros utilizados, aunque en este estudio el rango de valores se ha situado entre 3,11 y 3,96.

Mediante este procedimiento, el modelo definitivo obtenido permite calificar el territorio andaluz en función del índice de potencialidad para cada una de las especies de pino analizadas, pudiendo generar la cartografía correspondiente.

Para mejorar la claridad de la representación de dicha cartografía y para que su utilización pueda tener carácter práctico para el gestor y planificador forestal, se han establecido unas clases de potencialidad (**Tabla 8.2**) en función de los valores que alcanza el índice de potencialidad. Los valores asignados para definir los intervalos de clases corresponden a los definidos por SÁNCHEZ PALOMARES *et al.* (2007) que han mostrado un buen ajuste para las especies analizadas en este estudio.

Tabla 8.2. Establecimiento de Clases de Potencialidad

VALOR DEL INDICADOR	CLASE	DENOMINACIÓN
$IPot \geq 3,85$	1	Potencialidad Óptima
$3,85 > IPot \geq 3,75$	2	Potencialidad Alta
$3,75 > IPot \geq 3,65$	3	Potencialidad Media
$IPot < 3,65$	4	Potencialidad Baja

Para aplicar esta metodología se diseñó una aplicación *SIG* específica basada en análisis de coberturas ráster y fundada en el planteamiento metodológico de GANDULLO y SANCHEZ PALOMARES, descrito anteriormente, con la cual y una vez determinada la red representativa de parcelas con presencia de la especie, se fijaban los valores de los parámetros ambientales característicos de la estación ecológica y hacía posible la extrapolación espacial de dicha caracterización, así como el cálculo del índice y clase de potencialidad en cada pixel del territorio.



8.2.3. Resultados y discusión

En las **Tablas 8.3 a 8.7** se ofrecen los resultados de la caracterización paramétrica de cada especie de pino para las 34 variables ambientales estudiadas. Estos valores se han seleccionado para definir la estación ecológica de estas especies.

Tabla 8.3. Caracterización paramétrica para *Pinus halepensis*

VARIABLE	LI	UI	MEDIANA	US	LS
mde	24,4	377,8	972,8	1.283,7	1.679,6
pte	0,3	4,2	11,3	21,7	37,1
ins	0,1	0,7	1,0	1,2	1,4
cur_md	-0,3	-0,1	0,0	0,1	0,4
orien	0,1	34,5	177,5	324,1	359,9
pin	31,8	113,7	242,7	378,6	677,7
pp	51,5	121,3	180,8	277,8	458,2
pvc	11,2	27,9	44,1	78,9	78,9
po	50,3	108,1	163,1	233,5	369,6
ptt	147,9	390,6	628,5	932,5	1.463,7
ta	10,6	12,5	14,0	16,2	18,6
tmaxc	26,5	29,7	31,7	33,6	36,9
tminf	-1,6	-0,3	1,1	4,0	8,4
tmc	20,6	22,8	24,0	25,3	27,7
tmf	3,0	4,7	6,1	9,0	12,0
osc1	12,4	15,6	17,9	19,0	20,8
osc2	21,2	26,8	30,9	32,7	35,8
iha	-51,0	-36,0	-13,0	23,0	114,0
etott	954,2	1.116,3	1.252,1	1.365,3	1.558,9
sdef	231,0	328,0	432,0	617,0	898,0
ssup	0,0	0,0	130,0	404,0	1.001,0
tf	7,9	29,8	42,3	57,6	99,3
arc	4,9	12,9	23,0	37,9	54,0
are	8,3	27,8	41,8	57,6	87,6
lim	5,0	20,6	33,9	44,1	59,6
crad	44,3	106,5	134,1	164,0	227,9
ph	5,9	7,5	8,1	8,4	8,8
mo	0,6	1,3	1,8	3,2	10,8
mo_sup	0,7	1,7	2,7	4,5	11,1
cod_hid	11,5	17,8	28,4	51,9	378,7
n_sup	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4
cic	1,5	8,3	14,5	21,8	32,2
psb	10,5	99,9	100,0	100,0	100,0
ca	0,1	0,3	0,8	8,0	24,0

Tabla 8.4. Caracterización paramétrica para *Pinus pinaster*

VARIABLE	LI	UI	MEDIANA	US	LS
mde	3,2	319,9	1.041,0	1.507,4	1.966,3
pte	0,4	4,4	12,1	22,4	37,1
ins	0,2	0,6	1,0	1,2	1,4
cur_md	-0,3	-0,1	0,0	0,1	0,3
orien	0,6	37,7	183,9	323,6	359,6
pin	78,2	186,5	327,6	492,8	677,7
pp	96,8	164,9	233,9	317,7	491,9
pv	15,6	31,8	45,1	83,3	83,3
po	81,3	137,5	206,1	285,8	349,3
ptt	303,8	542,5	822,5	1.136,3	1.561,6
ta	9,8	11,7	13,4	16,4	18,4
tmaxc	25,9	28,5	31,3	35,3	37,2
tminf	-2,5	-0,9	1,1	5,1	8,2
tmc	19,8	21,7	23,7	26,2	27,8
tmf	2,7	4,1	5,9	9,5	12,1
osc1	11,6	14,4	17,9	19,8	20,8
osc2	18,7	24,8	30,8	33,3	34,8
iha	-39,0	-21,0	7,0	50,0	112,0
etott	845,1	1.054,6	1.202,0	1.417,5	1.619,0
sdef	238,0	303,0	374,0	515,0	719,0
ssup	0,0	67,0	295,0	637,0	1.026,0
tf	7,1	28,5	37,3	49,0	99,5
arc	4,9	12,5	22,5	36,8	54,0
are	8,3	39,2	51,7	61,2	85,6
lim	5,6	18,0	24,8	33,9	51,5
crad	30,1	106,6	128,2	147,0	184,0
ph	5,0	6,1	7,1	8,1	8,7
mo	0,8	1,1	1,7	2,9	7,3
mo_sup	0,9	1,8	2,7	4,8	9,2
cod_hid	14,8	24,2	37,5	60,2	314,9
n_sup	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4
cic	1,6	7,1	13,2	21,4	36,5
psb	10,5	85,6	99,8	100,0	100,0
ca	0,1	0,2	3,0	8,2	26,6



Tabla 8.5. Caracterización paramétrica para *Pinus pinea*

VARIABLE	LI	UI	MEDIANA	US	LS
mde	0,4	14,3	319,9	717,1	1.435,3
pte	0,0	0,4	4,0	13,2	28,3
ins	0,4	0,8	1,0	1,2	1,4
cur_md	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,3
orien	-1,0	44,3	180,8	301,9	359,9
pin	69,5	254,7	284,8	367,6	665,0
pp	105,1	148,9	193,0	235,6	340,4
pv	15,6	20,0	34,4	64,4	64,4
po	71,8	151,2	178,3	222,4	341,2
ptt	283,9	588,0	696,1	862,1	1.327,2
ta	12,4	15,1	16,9	18,1	18,5
tmaxc	26,4	32,6	34,5	36,1	37,3
tminf	0,2	1,6	4,4	6,1	9,4
tmc	21,8	24,9	26,2	27,0	28,4
tmf	5,0	6,5	9,4	10,9	12,8
osc1	10,9	14,8	16,3	20,1	20,8
osc2	17,8	28,1	29,6	34,0	34,8
iha	-41,0	-24,0	-13,0	6,0	109,0
etott	796,8	1.277,2	1.417,5	1.505,6	1.619,6
sdef	242,0	399,0	500,0	614,0	744,0
ssup	0,0	84,0	160,0	308,0	894,0
tf	14,4	31,5	48,4	99,8	100,0
arc	4,0	9,1	21,6	28,5	44,2
are	26,1	45,7	58,9	86,3	92,6
lim	1,7	4,8	19,7	28,6	46,4
crad	43,5	64,4	124,3	144,2	192,8
ph	5,0	5,5	6,2	7,3	8,3
mo	0,4	0,6	1,0	1,6	3,8
mo_sup	0,2	1,1	1,7	2,4	4,1
cod_hid	14,5	24,2	51,1	374,4	593,3
n_sup	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3
cic	0,0	1,7	9,6	16,6	36,5
psb	19,2	78,7	94,9	99,9	100,0
ca	0,1	1,1	1,9	8,0	18,9



Tabla 8.6. Caracterización paramétrica para *Pinus nigra*

VARIABLE	LI	UI	MEDIANA	US	LS
mde	661,5	1.140,9	1.524,3	1.814,4	2.332,3
pte	0,7	5,2	12,9	22,8	37,1
ins	0,2	0,6	0,9	1,2	1,4
cur_md	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,4
orien	0,2	29,8	177,6	331,4	359,9
pin	74,3	165,7	293,1	506,1	659,1
pp	97,6	158,6	233,1	378,8	491,9
pv	29,7	43,8	68,4	87,4	87,4
po	86,4	128,8	189,5	266,7	347,1
ptt	303,8	499,4	783,5	1.225,2	1.554,6
ta	8,0	10,1	11,3	12,5	15,3
tmaxc	25,2	27,3	30,1	31,7	34,6
tminf	-2,9	-1,9	-1,0	0,2	5,6
tmc	18,6	20,8	22,0	23,2	25,1
tmf	1,5	2,7	3,7	4,9	9,4
osc1	14,6	16,7	18,5	19,3	20,6
osc2	24,9	27,9	31,2	32,3	35,2
iha	-39,0	-20,0	9,0	58,0	117,0
etott	895,9	1.019,9	1.146,6	1.255,2	1.394,7
sdef	232,0	291,0	337,0	408,0	646,0
ssup	0,0	50,0	273,0	687,0	1.015,0
tf	15,5	30,8	39,7	50,6	72,7
arc	4,9	11,9	19,0	35,1	51,9
are	15,6	34,1	51,0	62,1	73,1
lim	12,2	18,7	27,4	39,8	57,8
crad	52,0	94,1	125,4	146,9	233,7
ph	5,7	6,5	7,8	8,1	8,5
mo	0,7	1,8	2,7	4,7	9,8
mo_sup	1,0	2,4	4,4	7,1	11,4
cod_hid	14,0	25,3	41,0	69,9	155,1
n_sup	0,0	0,1	0,2	0,2	0,4
cic	4,2	7,3	14,3	22,8	29,5
psb	38,5	95,7	100,0	100,0	100,0
ca	0,0	0,2	1,1	7,1	31,4



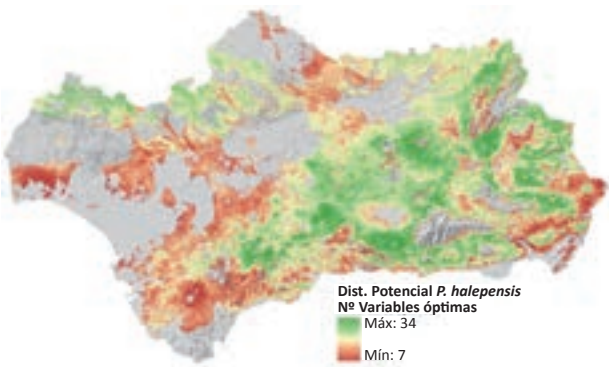
Tabla 8.7. Caracterización paramétrica para *Pinus sylvestris*

VARIABLE	LI	UI	MEDIANA	US	LS
mde	1.133,8	1.515,4	1.859,7	2.110,8	2.415,2
pte	1,2	6,5	13,5	21,1	35,9
ins	0,3	0,7	1,0	1,2	1,4
cur_md	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,4
orien	1,8	28,4	168,6	333,0	359,4
pin	74,3	135,9	263,2	359,0	564,8
pp	114,1	146,3	207,2	254,2	365,8
p _v	33,7	43,5	48,9	77,2	77,2
p _o	86,4	117,8	174,2	225,4	315,0
ptt	320,3	451,9	691,3	876,7	1.292,8
ta	7,6	9,1	10,3	11,5	13,1
tmaxc	24,3	25,8	27,4	28,9	32,2
tminf	-3,3	-2,3	-1,5	-0,5	0,9
tmc	18,2	19,3	20,6	21,6	22,8
tmf	1,1	2,3	3,3	4,2	6,4
osc1	15,8	16,4	17,3	18,1	18,9
osc2	26,1	27,0	28,4	31,0	33,0
iha	-34,0	-23,0	6,0	46,0	89,0
etott	909,3	961,5	1.026,2	1.110,8	1.328,2
sdef	223,0	256,0	304,0	385,0	491,0
ssup	0,0	24,0	228,0	463,0	835,0
tf	17,5	33,4	39,5	46,6	59,7
arc	7,7	10,1	12,7	16,6	40,7
are	19,6	49,9	57,4	63,5	70,3
lim	19,7	25,5	29,7	34,1	53,7
crad	50,3	87,4	121,8	145,0	163,7
ph	5,5	5,9	6,5	7,6	8,2
mo	1,3	1,7	2,3	3,5	7,8
mo _{sup}	1,8	2,2	3,0	3,9	8,9
cod_hid	22,2	34,5	52,5	69,6	98,4
n _{sup}	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4
cic	3,2	6,6	8,5	11,6	20,0
psb	27,1	67,6	96,4	100,0	100,0
ca	0,0	0,1	0,2	0,4	31,4

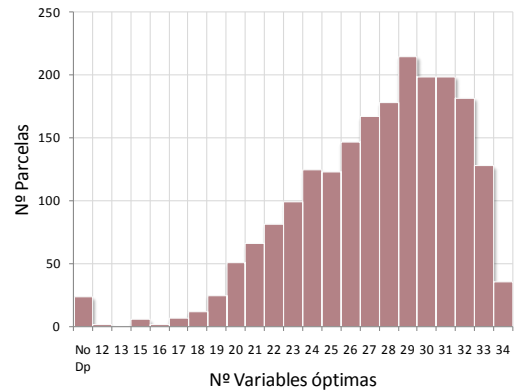
Estos datos suponen una actualización de los obtenidos en estudios anteriores (NICOLÁS y GANDULLO, 1967, 1969; GANDULLO, 1972; GANDULLO y SÁNCHEZ PALOMARES, 1994; SÁNCHEZ PALOMARES *et al.*, 1990; ELENA ROSELLÓ *et al.*, 1985, 1991; SERRADA, 2008) y son concordantes con ellos.

Como indicador del grado de ajuste del modelo, para cada una de las parcelas del IFN3 se ha determinado el número de variables ambientales cuyo valor en esa parcela está dentro del intervalo óptimo de distribución de esa especie para esa variable (80% del área central o área entre los valores *U_{li}* y *U_{Si}*). Estos valores se han representado gráficamente junto con el valor que alcanza (**Figuras 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 y 8.6**).

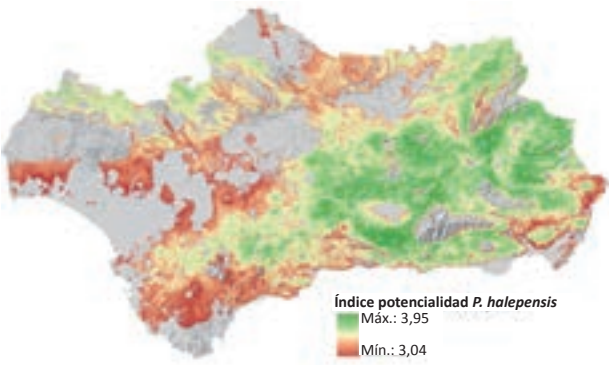
Pinus halepensis



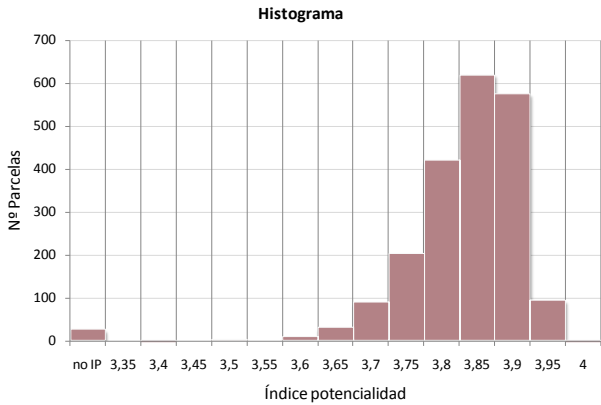
Distribución potencial *P. halepensis*



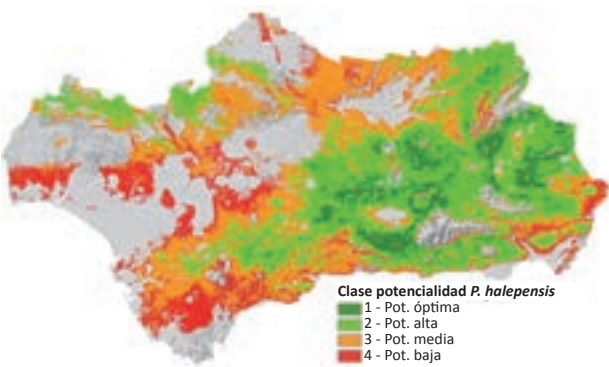
Distribución Nº Variables Óptimas en parcelas IFN3



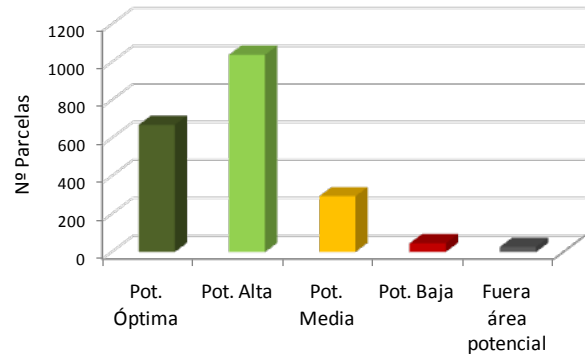
Índice de Potencialidad *P. halepensis*



Índice de potencialidad en parcelas IFN3



Clases de potencialidad *P. halepensis*

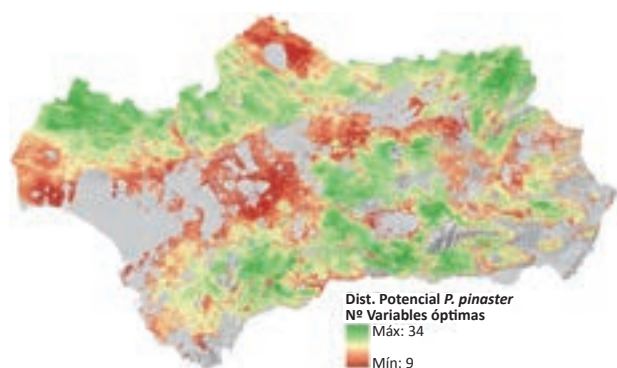


CL. POTENCIALIDAD	Nº PARC.	PORCENTAJE
Pot. Óptima	670	32,27%
Pot. Alta	1039	50,05%
Pot. Media	294	14,16%
Pot. Baja	46	2,22%
Fuera área pot.	27	1,30%
Total parcelas	2.076	100,00%

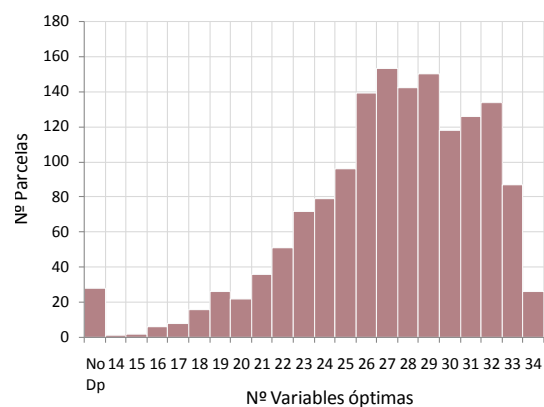
Clases potencialidad en parcelas IFN3

Figura 8.2. Distribución, Índice y Clase de Potencialidad de *Pinus halepensis*

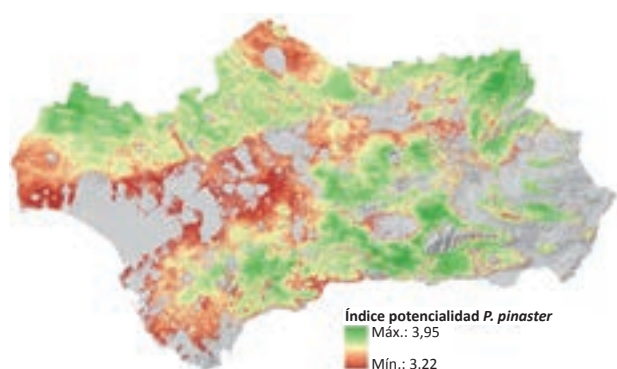
Pinus pinaster



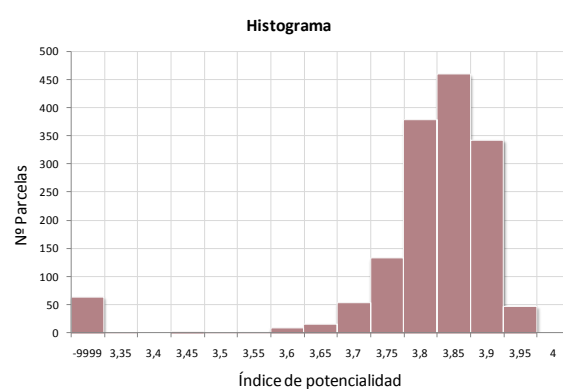
Distribución potencial *P. pinaster*



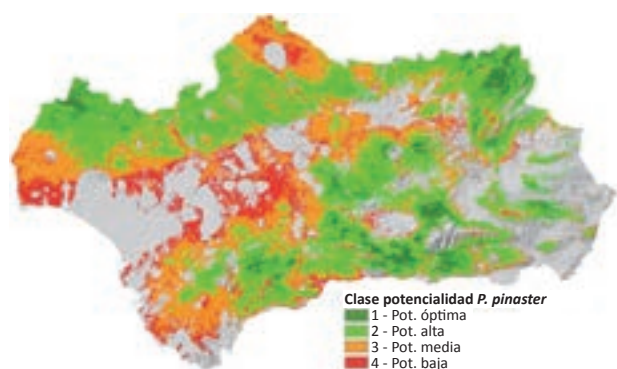
Distribución Nº Variables Óptimas en parcelas IFN3



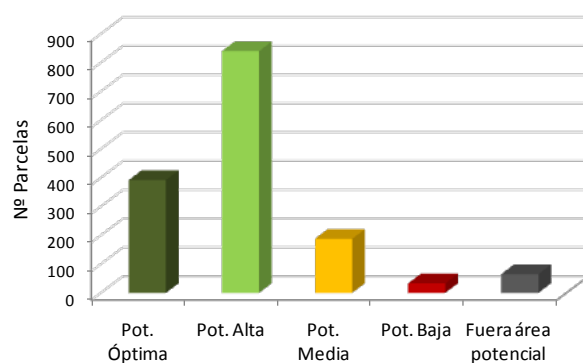
Índice de Potencialidad *P. pinaster*



Histograma Índice potencialidad en parcelas IFN3



Clases de potencialidad *P. pinaster*

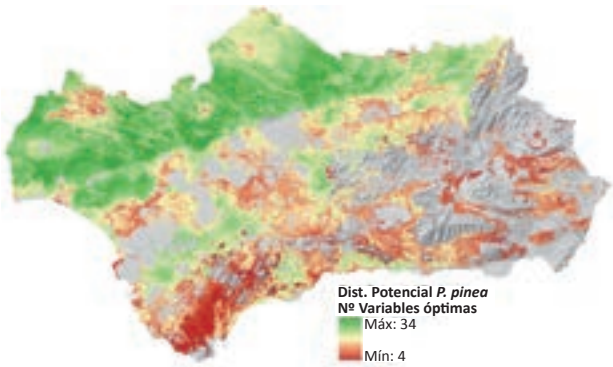


CL. POTENCIALIDAD	Nº PARC.	PORCENTAJE
Pot. Óptima	392	25,82%
Pot. Alta	840	55,34%
Pot. Media	188	12,38%
Pot. Baja	33	2,17%
Fuera área pot.	65	4,28%
Total parcelas	1.518	100,00%

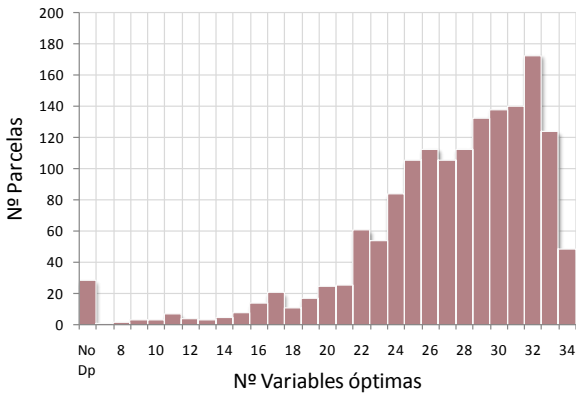
Distribución clases potencialidad en parcelas IFN3

Figura 8.3. Distribución, Índice y Clase de Potencialidad de *Pinus pinaster*

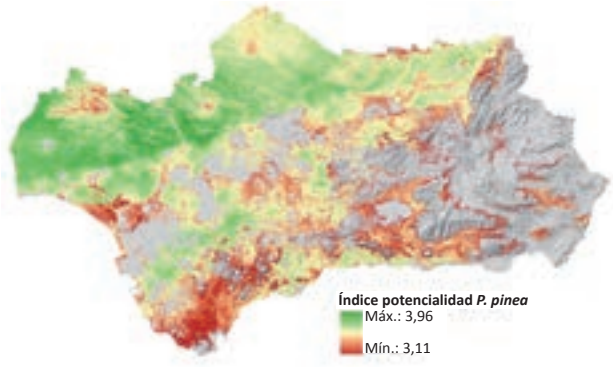
Pinus pinea



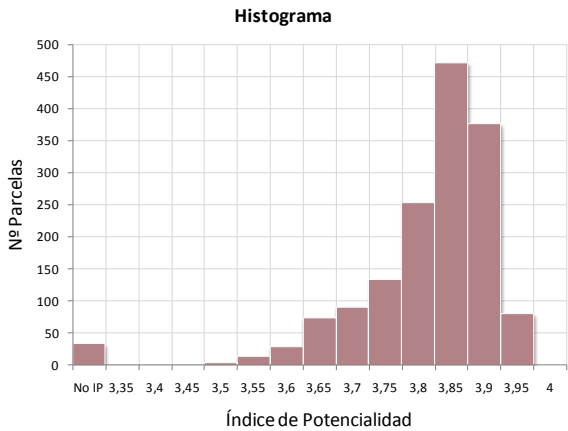
Distribución potencial *P. pinea*



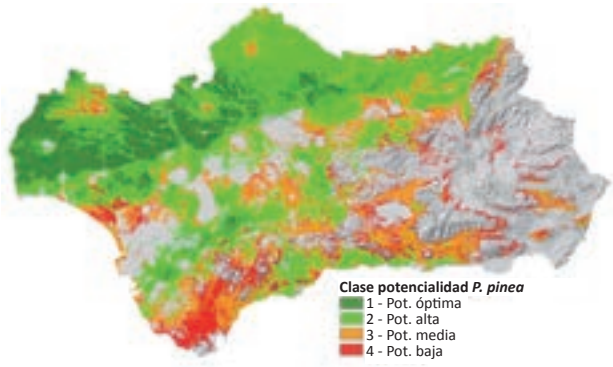
Distribución Nº Variables Óptimas en parcelas IFN3



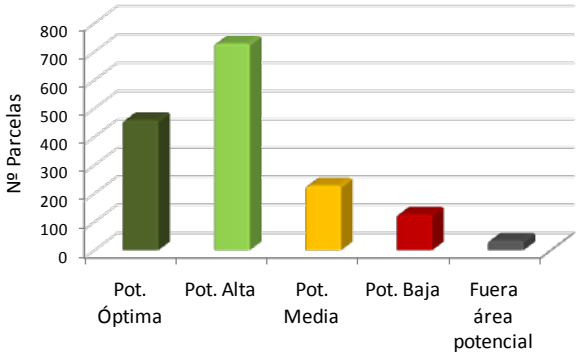
Índice de Potencialidad *P. pinea*



Histograma Índice potencialidad en parcelas IFN3



Clases de potencialidad *P. pinea*

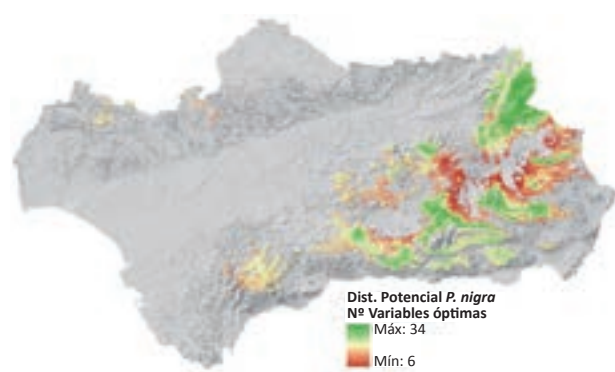


CL. POTENCIALIDAD	Nº PARC.	PORCENTAJE
Pot. Óptima	458	29,12%
Pot. Alta	728	46,28%
Pot. Media	227	14,43%
Pot. Baja	126	8,01%
Fuera área pot.	34	2,16%
Total parcelas	1.573	100,00%

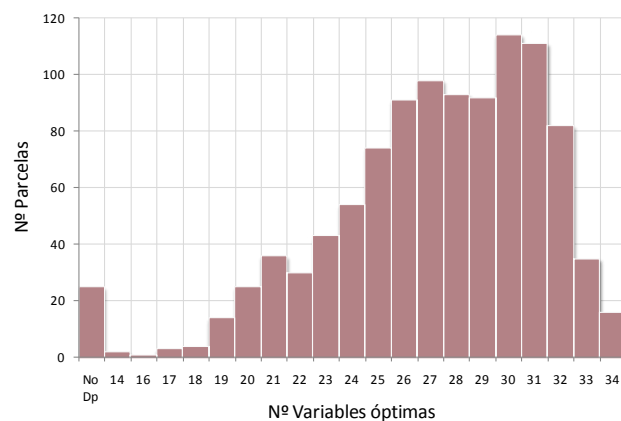
Distribución clases potencialidad en parcelas IFN3

Figura 8.4. Distribución, Índice y Clase de Potencialidad de *Pinus pinea*

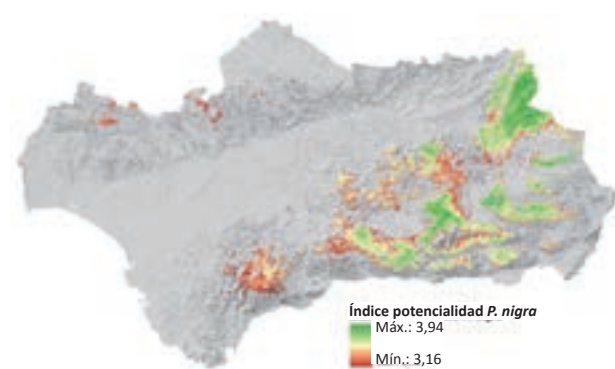
Pinus nigra



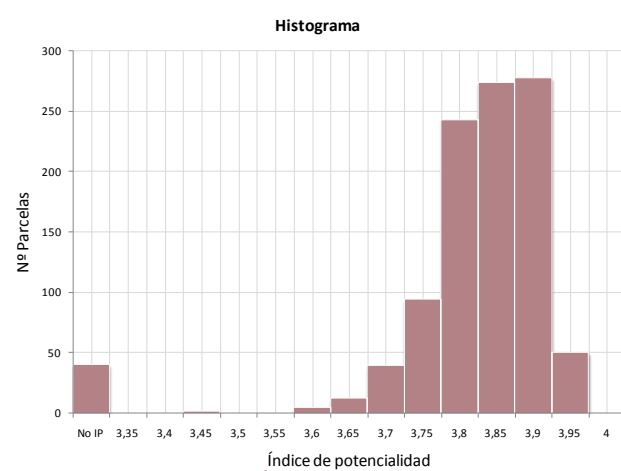
Distribución potencial *P. nigra*



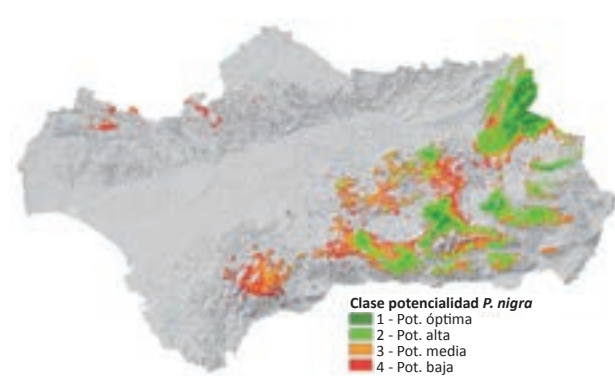
Distribución Nº Variables Óptimas en parcelas IFN3



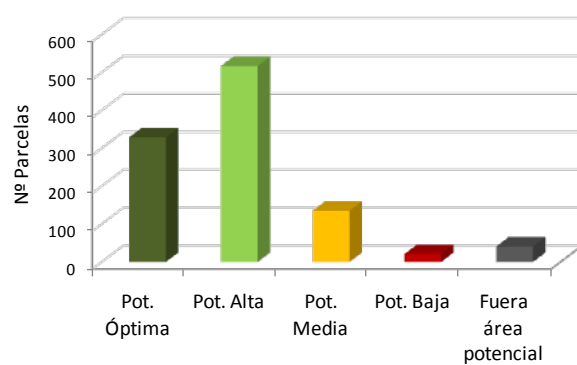
Índice de Potencialidad *P. nigra*



Histograma Índice potencialidad parcelas IFN3



Clases de potencialidad *P. nigra*

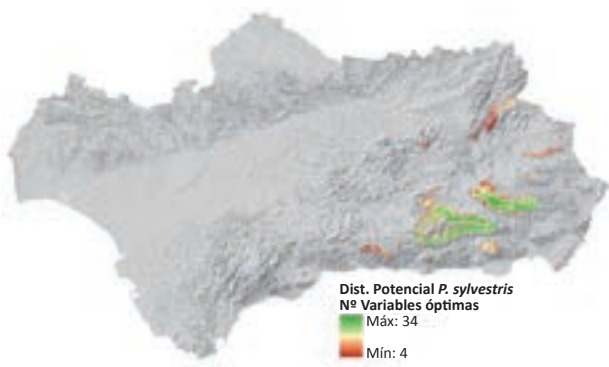


CL. POTENCIALIDAD	Nº PARC.	PORCENTAJE
Pot. Óptima	329	31,54%
Pot. Alta	517	49,57%
Pot. Media	135	12,94%
Pot. Baja	21	2,01%
Fuera área pot.	41	3,93%
Total parcelas	1.043	100,00%

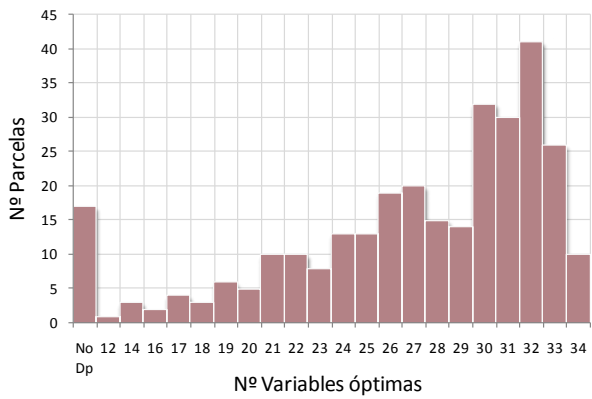
Distribución clases potencialidad en parcelas IFN3

Figura 8.5. Distribución, Índice y Clase de Potencialidad de *Pinus nigra*

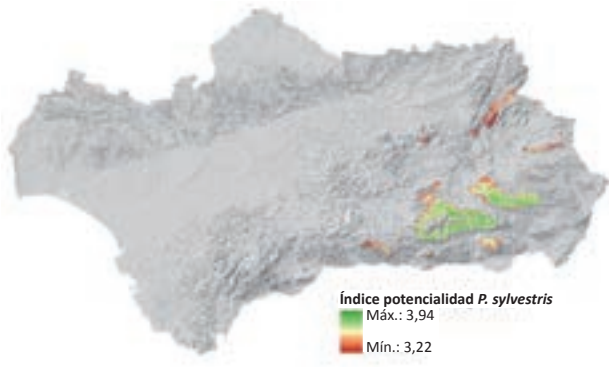
Pinus sylvestris



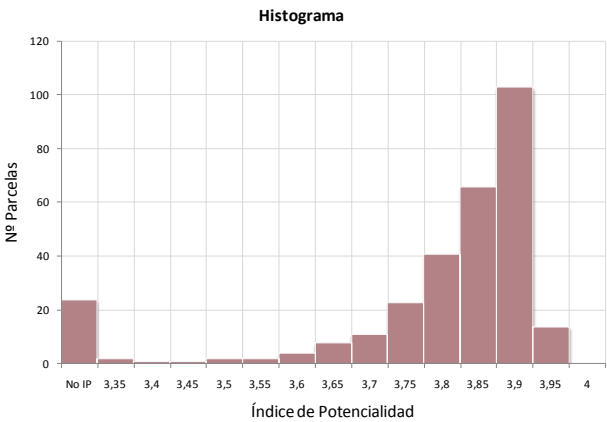
Distribución potencial *P. sylvestris*



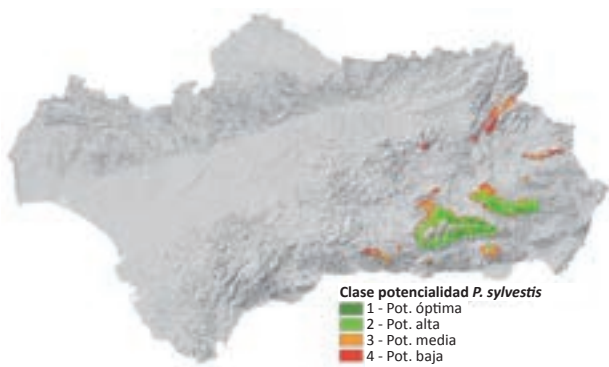
Distribución Nº Variables Óptimas en parcelas IFN3



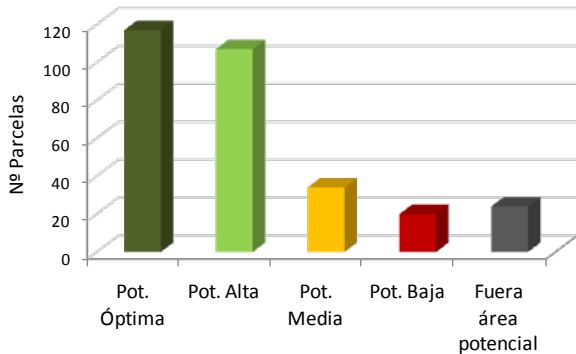
Índice de Potencialidad *P. sylvestris*



Histograma Índice potencialidad en parcelas IFN3



Clases de potencialidad *P. sylvestris*



CL. POTENCIALIDAD	Nº PARC.	PORCENTAJE
Pot. Óptima	117	38,74%
Pot. Alta	107	35,43%
Pot. Media	34	11,26%
Pot. Baja	20	6,62%
Fuera área pot.	24	7,95%
Total parcelas	302	100,00%

Distribución clases potencialidad en parcelas IFN3

Figura 8.6. Distribución, Índice y Clase de Potencialidad de *Pinus sylvestris*

La **Tabla 8.8** muestra la distribución de superficie por clase de potencialidad para cada una de las especies de pino analizadas, así como la superficie actual descrita en el Capítulo 7.

Tabla 8.8. Distribución de superficie (ha) por especie y clase de potencialidad

ÁREA DE POTENCIALIDAD	<i>P. halepensis</i>	<i>P. pinaster</i>	<i>P. pinea</i>	<i>P. nigra</i>	<i>P. sylvestris</i>
Óptima	581.898	444.567	1.032.707	127.728	38.299
Alta	2.132.262	2.619.565	2.550.619	422.488	87.346
Media	2.107.713	1.943.255	1.437.126	423.699	67.685
Baja	886.104	687.273	544.495	225.510	40.350
Total	5.707.977	5.694.660	5.564.947	1.199.425	233.680
Sup. Distribución Actual	564.910	422.324	475.787	231.202	86.258

La distribución del área potencial del pino carrasco (*Pinus halepensis*) es muy amplia, ocupando todo el sector oriental y una pequeña parte de Sierra Morena en las provincias de Córdoba, Huelva y Sevilla. Comparando esta área con la distribución actual de esta especie (**Tabla 7.1**), se observa que es más extensa que la actual; por ejemplo, es muy destacable que esta especie sólo está presente prácticamente en la mitad oriental de Andalucía. Comparando los resultados con los datos de partida de las parcelas del inventario utilizadas (IFN3) se constata que el 82% de las mismas están localizadas en zonas de potencialidad óptima (32%) y alta (50%). El 14% se sitúa en áreas con potencialidad media y el 2% en áreas con potencialidad baja, quedando fuera del área potencial tan sólo el 1%. Por tanto, para *P. halepensis* se puede concluir que su área potencial es bastante más extensa que el área actualmente ocupada por la especie, y que la distribución actual coincide con zonas de gran potencialidad para el desarrollo de la especie.

La distribución potencial del pino negral (*Pinus pinaster*) abarca un área muy extensa, incluyendo Sierra Morena, salvo el Valle de los Pedroches, así como la mitad oriental y Serranía de Ronda. Esta distribución potencial, recordemos, señala el territorio donde sería posible la presencia de la especie en base a las condiciones ambientales, sin tener en cuenta factores antrópicos ni las interacciones bióticas (especialmente con otras especies vegetales) que determinan la presencia actual. Las zonas con potencialidad óptima coinciden prácticamente con áreas donde ya existe la especie; sin embargo, las zonas de potencialidad alta son mucho mayores en extensión. Por otro lado, comparando estos datos con la distribución de las parcelas del inventario se observa la misma tendencia que en la especie anterior: el 26% de las parcelas tienen potencialidad óptima y el 55% potencialidad alta, el 12% tiene potencialidad media y tan sólo el 2% potencialidad baja. El 4% se encuentra fuera del área potencial delimitada en este estudio. Para esta especie se concluye que la distribución de su área potencial es mayor que la superficie de presencia y que su distribución actual se localiza en zonas de alta potencialidad.

Para pino piñonero (*Pinus pinea*) se observa que la distribución de su área potencial, principalmente en las zonas de potencialidad óptima y alta, se centra en la mitad occidental de la región. En la mitad oriental su distribución está restringida a Sierra Morena oriental, con clase de potencialidad alta. Las zonas potencialmente óptimas para la especie ocupan una superficie significativamente superior a la distribución actual de la especie. Con respecto a las parcelas de inventario, se reduce el porcentaje de puntos con presencia actual con potencialidad óptima (29%) y alta (46%). El porcentaje de parcelas con potencialidad media y baja alcanza valores de 14% y el 8%, respectivamente. Tan sólo el 2% se encuentra fuera de su área potencial. Por tanto, esta especie presenta un área potencial mayor que su distribución actual, y solo una pequeña parte de su área de distribución actual se localiza en zonas de baja potencialidad.

La distribución del área potencial de pino salgareño (*Pinus nigra*) se centra principalmente en el sector oriental de la región, apareciendo pequeñas zonas en Sierra Morena occidental con potencialidad baja. La distribución actual de la especie no excede demasiado de sus límites potenciales teóricos. Esta distribución potencial se amplía algo más en las Sierras de Tejeda y Almijara en relación con su área de ocupación actual, en donde hay zonas bastante extensas de potencialidad alta. La mayor parte de las parcelas de presencia del IFN3 (81%) se encuentran en zonas de potencialidad óptima (32%) o alta (50%), con potencialidad media se sitúan el 13% y con potencialidad baja el 2%, y se encuentran fuera del área potencial el 4% de las parcelas. Para *P. nigra* se concluye, por consiguiente, que su área potencial no es mucho más extensa que su distribución actual, estando ésta localizada en zonas de gran potencialidad para su desarrollo.

Por último, la distribución potencial de pino silvestre (*Pinus sylvestris*), es mucho más restringida, localizándose áreas óptimas y de alta potencialidad en Sierra Nevada y las Sierras de Baza y Filabres. En comparación con la distribución actual de la especie, cabe destacar que coinciden en gran medida ambas. Por otro lado, en las parcelas de inventario se observa un porcentaje destacado de parcelas con potencialidad óptima (39%) superior a las parcelas con potencialidad alta (35%). La potencialidad media representa el 11% de las parcelas y la baja el 7% de las mismas. Por último, se localizan fuera del área potencial algo menos del 8%. Por tanto, esta especie presenta una distribución potencial muy ajustada a su distribución actual, destacando la potencialidad óptima de la mayor parte de sus parcelas.



8.3. Metodología MaxEnt

8.3.1. Materiales

8.3.1.1. Datos de presencia de las distintas especies del género *Pinus*

Los datos de presencia son los mismos que los empleados para la metodología anterior (parcelas del IFN3).

8.3.1.2. Variables ambientales

En este caso se emplearon las 36 variables ambientales dado que no existen restricciones en cuanto al uso de variables categóricas. También se incluyeron en el modelo las componentes principales derivadas del Análisis de Componentes Principales.

8.3.2. Metodología

En los últimos años se han desarrollado métodos alternativos para modelizar la distribución territorial de las especies forestales. Mediante diferentes aproximaciones se resuelve el problema general de relacionar la presencia actual de una especie con un conjunto de factores ambientales, deduciendo su nicho ecológico. La modelización incluye la interpolación espacial de los resultados, de modo que se obtienen mapas territoriales (coberturas gráficas) a distintas escalas de representación espacial.

El punto de partida de estos modelos es relacionar los datos de presencia (o abundancia) de una especie con variables ambientales predictoras. Entre los métodos con enfoque predictivo o probabilístico que permiten obtener modelos de distribución potencial de especies se encuentra MaxEnt. MaxEnt, es un modelo de distribución de especies del tipo “modelado con datos de presencia solamente” que permite estimar la relación entre los registros de las especies y un conjunto de variables ambientales (ELITH *et al.*, 2011). En los últimos años se está extendiendo su aplicación en investigaciones ecológicas relacionadas con la distribución de la vegetación y la predicción de cambios ante variaciones medioambientales (LIU *et al.*, 2005; PHILLIPS *et al.*, 2006; WARREN y SEIFERT, 2011; NAVARRO *et al.*, 2011).

MaxEnt (**Máxima Entropía**) (PHILLIPS *et al.*, 2006; PHILLIPS y DUDÍK, 2008) es un método multi – objetivo para realizar predicciones o inferencias a partir de información incompleta. Se basa en principios de inteligencia artificial y, en concreto, en el principio estadístico de máxima entropía. La esencia de MaxEnt consiste en estimar una distribución de probabilidades, denominadas de máxima entropía, sujeta a una serie de restricciones que reflejan la información incompleta que poseemos sobre la distribución real de la especie (PHILLIPS *et al.*, 2006). Usualmente, la información que disponemos de la distribución de una especie se limita a los datos de presencia obtenidos en los inventarios, así como a un conjunto de variables ambientales, denominadas “características” (*features*), que tienen relación con la presencia actual de la especie. En MaxEnt cada variable ambiental (“característica”) satisface la restricción de que su valor medio esperado al aplicar el modelo se debe aproximar al valor medio obtenido a partir de los puntos de muestreo disponibles.

MaxEnt permite modelizar la distribución de especies con datos de presencia solamente, de manera que los píxeles del conjunto de la zona de estudio conforman el espacio en el que se define la distribución de probabilidades, los píxeles con ocurrencia conocida de la especie constituyen los puntos de muestreo y las “características” son las variables ambientales (variables climáticas, fisiográficas, edáficas, etc.) o sus transformaciones y combinaciones. MaxEnt calcula la probabilidad de distribución de máxima entropía, $P(x)$. Esta distribución es igual a una distribución de Gibbs (**Ecuación 8.2**) que maximice el producto de las probabilidades de los puntos de muestreo.

$$P(x) = e^{[C_1 \cdot F_1(x) + C_2 \cdot F_2(x) + C_3 \cdot F_3(x) + \dots]} / Z$$

(8.2)

siendo C1, C2... los pesos asignados a cada variable ambiental; F1, F2... las “características” obtenidas de las variables ambientales, y Z una constante que asegura que la suma de todos los valores de P para todas las celdas sea 1. Las “características” son transformaciones o combinaciones de las variables ambientales. MaxEnt permite utilizar “características” del tipo lineal, cuadrática, multiplicativa, umbral, lineal con umbral y discreta.

La aplicación de MaxEnt ofrece ventajas como requerir solamente datos de presencia; puede incorporar variables continuas y categóricas; y, especialmente, que la distribución de probabilidad tiene una formulación sencilla que permite su análisis y, en definitiva, extraer conclusiones sobre la relación entre las variables ambientales y la presencia de la especie estudiada.

El resultado de la aplicación de MaxEnt es la modelización de la distribución potencial de la especie dentro del territorio de estudio. MaxEnt tiene tres formatos de salida: “raw”, “cumulative” y “logistic”. El tercero es el empleado en este trabajo, y representa la probabilidad de presencia de una especie en base a las variables ambientales incluidas en el modelo.

Si bien MaxEnt es capaz de predecir la probabilidad de presencia de una especie en un sitio determinado, no establece la calidad del sitio (la calidad de estación) para el desarrollo de la especie, aunque de manera indirecta sí puede ser posible obtener una referencia de la idoneidad espacial dado que las celdas que presentan las mejores condiciones para la presencia de la especie tendrán un valor logístico cercano a 1.

MaxEnt es sensible a la existencia de correlación entre las variables ambientales que definen el biotopo, lo que puede originar problemas de multicolinealidad. Aunque MaxEnt es más estable en el manejo de la multicolinealidad que los modelos de distribución potencial basados en análisis de regresión y, por tanto, hay menos necesidad de eliminar las variables correlacionadas (ELITH *et al.*, 2011), siempre es aconsejable excluir las variables que, a priori, son ecológicamente menos relevantes.

Los problemas ligados a la colinealidad pueden evitarse si las “características” se deducen a partir de las componentes principales anteriormente calculadas, que son transformaciones lineales de las variables ambientales originales. Sin embargo, al utilizar las CP no es posible interpretar el impacto de cada variable ambiental sobre la idoneidad del área de estudio para cada especie analizada, por lo cual se optó por utilizar un procedimiento mixto. En primer lugar, se aplicó MaxEnt eliminando las variables ambientales altamente correlacionadas y menos relevantes desde el punto de vista ecológico. De esta forma se obtuvieron las curvas de respuesta que relacionan la probabilidad de presencia de las especies con cada una de las variables ambientales restantes (ver **Anejo 5**) y, asimismo, fue posible analizar el impacto de cada factor ambiental sobre la presencia de las especies en el territorio. Posteriormente se ejecutó de nuevo la aplicación empleando las 20 CP, obteniendo de este modo los mapas de probabilidades de presencia de cada especie a partir de las mismas. Así se garantizó que estos mapas, que representan la distribución potencial de las especies, no presentan problemas de multicolinealidad.

El análisis de correlación (**Tabla 8.9** y **Tabla 8.10**) permitió identificar las variables altamente correlacionadas, que fueron eliminadas en la aplicación de MaxEnt, que se ejecutó finalmente con 25 variables ambientales.



Tabla 8.9. Matriz de correlación de las variables ambientales utilizadas en el estudio

	arc	are	ca	cic	cod_hid	crad	cur_md	dseq	etott	lha	lms	mde	mo_sup	n_sup	orien	osc1	osc2	ph	pin	po	pp	ps	psb	pte	ptt	pvt	sdef	ssup	ta	tf	tmoxc	tmc	tmf	tmnf	
arc	1,00																																		
are	-0,77	1,00																																	
ca	0,34	-0,10	1,00																																
cic	0,54	-0,48	0,22	1,00																															
cod_hid	-0,43	0,65	-0,08	-0,35	1,00																														
crad	0,17	-0,48	-0,04	0,14	-0,61	1,00																													
cur_md	-0,03	0,04	0,04	-0,01	0,02	-0,04	1,00																												
dseq	-0,11	0,12	-0,11	-0,14	0,09	0,06	-0,02	1,00																											
etott	0,26	0,01	0,36	0,01	0,04	0,15	-0,03	0,15	1,00																										
lha	0,06	-0,05	-0,12	0,17	-0,03	-0,21	0,05	-0,46	-0,61	1,00																									
lms	-0,03	0,08	0,00	-0,05	0,05	-0,04	-0,20	0,07	0,23	-0,12	1,00																								
lms	0,03	-0,66	-0,24	0,13	-0,52	0,56	-0,03	-0,06	-0,32	0,01	-0,09	1,00																							
mde	-0,26	-0,06	-0,18	-0,08	-0,11	0,04	0,06	-0,39	-0,58	0,35	-0,11	0,41	1,00																						
mo_sup	0,01	-0,20	-0,08	0,16	-0,15	-0,04	0,02	-0,33	-0,54	0,55	-0,11	0,30	0,57	1,00																					
n_sup	0,06	-0,24	-0,05	0,26	-0,18	0,06	-0,02	-0,19	-0,36	0,39	-0,06	0,31	0,19	0,41	1,00																				
orien	0,01	0,00	0,03	0,02	-0,02	0,00	-0,01	-0,03	0,01	0,00	-0,02	0,01	-0,02	0,01	1,00																				
osc1	-0,01	-0,03	0,35	-0,07	-0,10	0,17	0,00	-0,27	0,32	-0,22	-0,03	0,05	0,42	0,05	-0,13	0,03	1,00																		
osc2	0,06	-0,03	0,34	-0,07	-0,05	0,18	0,00	-0,21	0,57	-0,34	0,00	-0,02	0,20	-0,11	-0,23	0,02	0,93	1,00																	
ph	0,32	-0,48	0,03	0,25	-0,30	0,25	-0,02	0,16	-0,14	-0,20	-0,03	0,39	0,11	0,17	0,04	0,03	-0,01	-0,30	-0,32	-0,33	1,00														
pin	0,19	-0,05	-0,04	0,20	0,00	-0,22	0,02	-0,46	-0,30	0,90	-0,05	-0,15	0,03	0,36	0,33	-0,01	-0,30	-0,32	-0,33	0,96	1,00														
po	0,16	-0,04	-0,06	0,22	-0,02	-0,20	0,03	-0,48	-0,31	0,88	-0,07	-0,12	0,06	0,37	0,32	0,00	-0,30	-0,31	-0,35	0,91	0,90	1,00													
pp	0,14	-0,07	0,02	0,18	-0,06	-0,17	0,03	-0,59	-0,36	0,91	-0,10	-0,05	0,31	0,52	0,33	0,02	0,00	-0,09	-0,25	0,91	0,90	1,00													
ps	0,42	-0,07	0,25	0,21	-0,03	0,14	-0,01	0,12	0,58	-0,26	0,04	-0,38	-0,58	-0,40	-0,24	0,01	-0,11	0,09	0,07	-0,04	-0,05	-0,18	1,00												
psb	0,15	-0,21	0,09	0,08	-0,24	0,17	0,01	0,11	0,17	-0,37	0,02	0,15	-0,06	0,00	-0,13	0,02	0,11	0,14	0,46	-0,37	-0,34	-0,29	0,15	1,00											
pte	-0,13	-0,08	-0,13	0,06	-0,11	-0,09	0,04	-0,30	-0,56	0,57	-0,21	0,28	0,51	0,57	0,29	-0,01	0,05	-0,11	0,04	0,40	0,43	0,55	-0,46	-0,10	1,00										
ptt	0,16	-0,05	-0,02	0,20	-0,03	-0,20	0,03	-0,54	-0,33	0,92	-0,07	-0,10	0,15	0,43	0,34	0,00	-0,18	-0,23	-0,32	0,98	0,97	0,97	-0,10	-0,35	0,47	1,00									
pvt	-0,08	-0,04	0,11	0,04	-0,09	0,03	0,03	-0,59	-0,19	0,39	-0,10	0,15	0,71	0,51	0,19	0,01	0,62	0,48	-0,14	0,24	0,27	0,54	-0,36	-0,09	0,39	1,00									
sdef	0,08	0,02	0,14	-0,05	0,01	0,23	-0,04	0,56	0,72	-0,79	0,12	-0,12	-0,49	-0,53	-0,32	0,00	0,06	0,22	0,14	-0,62	-0,64	-0,71	0,40	0,22	-0,55	-0,68	-0,45	1,00							
ssup	0,08	-0,05	-0,14	0,18	-0,04	-0,18	0,04	-0,38	-0,55	0,98	-0,11	-0,01	0,28	0,51	0,39	0,00	-0,26	-0,37	-0,20	0,92	0,90	0,91	-0,24	-0,37	0,55	0,93	0,35	-0,70	1,00						
ta	0,22	0,09	0,18	0,04	0,11	-0,04	-0,06	0,45	0,54	-0,39	0,09	-0,39	-0,98	-0,59	-0,21	0,00	-0,41	-0,23	-0,09	-0,08	-0,12	-0,36	0,53	0,08	-0,50	-0,21	-0,75	0,50	-0,31	1,00					
tf	0,04	0,18	0,15	-0,14	0,30	0,07	0,00	0,21	0,45	-0,32	0,08	-0,33	-0,36	-0,31	-0,33	-0,01	-0,06	0,11	0,01	-0,19	-0,23	-0,30	0,51	0,08	-0,41	-0,24	-0,27	0,38	-0,31	0,35	1,00				
tmoxc	0,28	0,00	0,44	0,02	0,02	0,13	-0,04	0,07	0,89	-0,49	0,06	-0,33	-0,56	-0,51	-0,33	0,03	0,48	0,67	-0,18	-0,21	-0,24	-0,24	0,50	0,13	-0,45	-0,23	-0,10	0,50	-0,44	0,54	0,36	1,00			
tmc	0,25	0,07	0,42	0,02	0,05	0,06	-0,06	0,31	0,76	-0,52	0,08	-0,39	-0,81	-0,60	-0,30	0,02	0,15	0,29	-0,10	-0,24	-0,28	-0,36	0,51	0,14	-0,51	-0,31	-0,43	0,55	-0,46	0,84	0,34	0,87	1,00		
tmf	0,19	0,07	0,02	0,07	0,12	-0,09	-0,04	0,44	0,29	-0,20	0,08	-0,33	-0,92	-0,47	-0,11	-0,01	-0,70	-0,54	-0,07	0,07	0,04	-0,26	0,45	0,01	-0,40	-0,07	-0,81	0,35	-0,12	0,93	0,29	0,24	0,61	1,00	
tmnf	0,21	0,04	0,00	0,12	0,09	-0,11	-0,03	0,36	0,16	-0,04	0,07	-0,31	-0,85	-0,38	-0,03	-0,01	-0,75	-0,64	-0,09	0,21	0,17	-0,12	0,40	-0,05	-0,33	0,07	-0,75	0,23	0,03	0,87	0,23	0,13	0,51	0,97	1,00

Tabla 8.10. Variables ambientales eliminadas debido a la alta correlación

VARIABLES AMBIENTALES ELIMINADAS		VARIABLES AMBIENTALES QUE PERMANECEN	
<i>iha</i>	Índice hídrico anual	<i>ptt</i>	Precipitación anual
<i>mde</i>	Elevación del terreno	<i>ta</i>	Temperatura media anual
<i>osc2</i>	Oscilación térmica total	<i>ptt</i>	Precipitación anual
<i>pin</i>	Precipitación de invierno	<i>ptt</i>	Precipitación anual
<i>po</i>	Precipitación de otoño	<i>ptt</i>	Precipitación anual
<i>pp</i>	Precipitación de primavera	<i>ptt</i>	Precipitación anual
<i>ssup</i>	Suma de Superavits	<i>ptt</i>	Precipitación anual
<i>tmaxc</i>	Media de las Temperaturas máximas del mes más cálido	<i>etott</i>	Evapotranspiración de Referencia
<i>tmf</i>	Temperatura media del mes más frío	<i>ta</i>	Temperatura media anual
<i>tminf</i>	Media de las Temperaturas mínimas del mes más frío	<i>ta</i>	Temperatura media anual
<i>mo*</i>	Materia orgánica media en el perfil	<i>mo_sup</i>	Materia orgánica superficial

(*) La materia orgánica no se eliminó por su alta correlación con la materia orgánica superficial, sino por ser esta última mucho más relevante desde el punto de vista ecológico.

8.3.2.1. Configuración de MaxEnt

Para cada una de las especies, se utilizaron el 80% de las muestras de presencia para el entrenamiento de MaxEnt, mientras que el 20% restante se utilizó para el testado de los resultados del modelo.

Se emplearon 50.000 puntos de respaldo elegidos aleatoriamente para asegurar una buena representación de las condiciones ambientales presentes en la región.

La estimación de la importancia de las variables ambientales en el desarrollo de cada especie se ejecutó mediante el procedimiento conocido como *Jackknife*, que consiste en excluir una variable y ejecutar el modelo con el resto de las variables ambientales. De esta forma, es posible cuantificar el impacto de la variable excluida sobre los resultados finales del modelo, repitiéndose este proceso para todas y cada una de las variables disponibles. Se obtienen conclusiones más fiables analizando los resultados de la aplicación del método *Jackknife* sobre las muestras reservadas para el testado, que no han intervenido en el entrenamiento que dio lugar a la definición del modelo. La importancia de cada variable se expresó a través de un índice de ganancia, de manera que las variables más influyentes alcanzaron índices de ganancias más elevados.

Se obtuvieron igualmente las curvas de respuestas de las variables ambientales originales, que muestran la variación que experimenta la probabilidad de presencia de la especie al modificar cada una de las variables ambientales.

La **ecuación 8.3** permite interpretar el significado de las curvas de respuesta y su relación con la probabilidad de presencia.

$$PP(x,y) = Pp(Var1(x,y)) * FP1 + Pp(Var2(x,y)) * FP2 + ... + Pp(Varn(x,y)) * FPN \quad (8.3)$$

Donde:

- *PP(x,y)* es la probabilidad de presencia de la especie en el punto *x, y*.
- *Pp(Var1(x,y))* es la probabilidad que se obtiene de la curva de respuesta de la variable *Var1*, correspondiente al valor que adquiere *Var1* en el punto *x, y*.
- *FP1* es el factor de peso que le corresponde a la variable *Var1*, es decir, es la importancia de la variable *Var1* en la distribución de la especie.

Conviene poner de manifiesto la probabilidad que se obtiene de cada curva de respuesta representa solo una fracción de la probabilidad de presencia final de la especie, dependiendo de la importancia que tenga la variable ambiental sobre la distribución de la especie.

Por último, se promediaron 30 realizaciones para obtener cada uno de los mapas finales de probabilidad de presencia de las especies. Las realizaciones se generaron mediante partición aleatoria de las muestras dedicadas al entrenamiento y al testado del modelo.

8.3.3. Resultados

Aunque MaxEnt puede obtener la función continua de probabilidad de presencia de una especie, en la mayor parte de sus aplicaciones se realiza una predicción binaria utilizando un valor umbral (acumulado o logístico), de manera que las condiciones positivas para el desarrollo de la especie son las que poseen una probabilidad de presencia superior al umbral logístico elegido y las condiciones negativas, una probabilidad inferior.

Un buen indicador de la bondad de los modelos derivados de la aplicación de MaxEnt son los gráficos que relacionan el umbral acumulado y la tasa de omisión, que es la fracción de puntos de muestreo clasificados como no adecuados para el desarrollo de la especie. La relación ideal entre el umbral acumulado y la tasa de omisión es una recta de pendiente 1:1. En la medida en que las tasas de omisión correspondientes a los datos de entrenamiento y testado se acercan a la omisión ideal, la clasificación obtenida por la aplicación MaxEnt será mejor. Un síntoma de sobre-entrenamiento del algoritmo de MaxEnt es que la tasa de omisión de los datos de entrenamiento sea adecuada (cercana a la recta 1:1) pero la tasa de omisión de los datos de testado se aleja del comportamiento ideal. En estos casos debe simplificarse el modelo ya sea eligiendo un valor del multiplicador de regularización superior a 1 (que es el valor por defecto) o utilizando “características” menos complejas (lineales, cuadráticas, etc.). La **Figura 8.7** contiene los gráficos de tasas de omisión obtenidos para las especies analizadas en el trabajo.

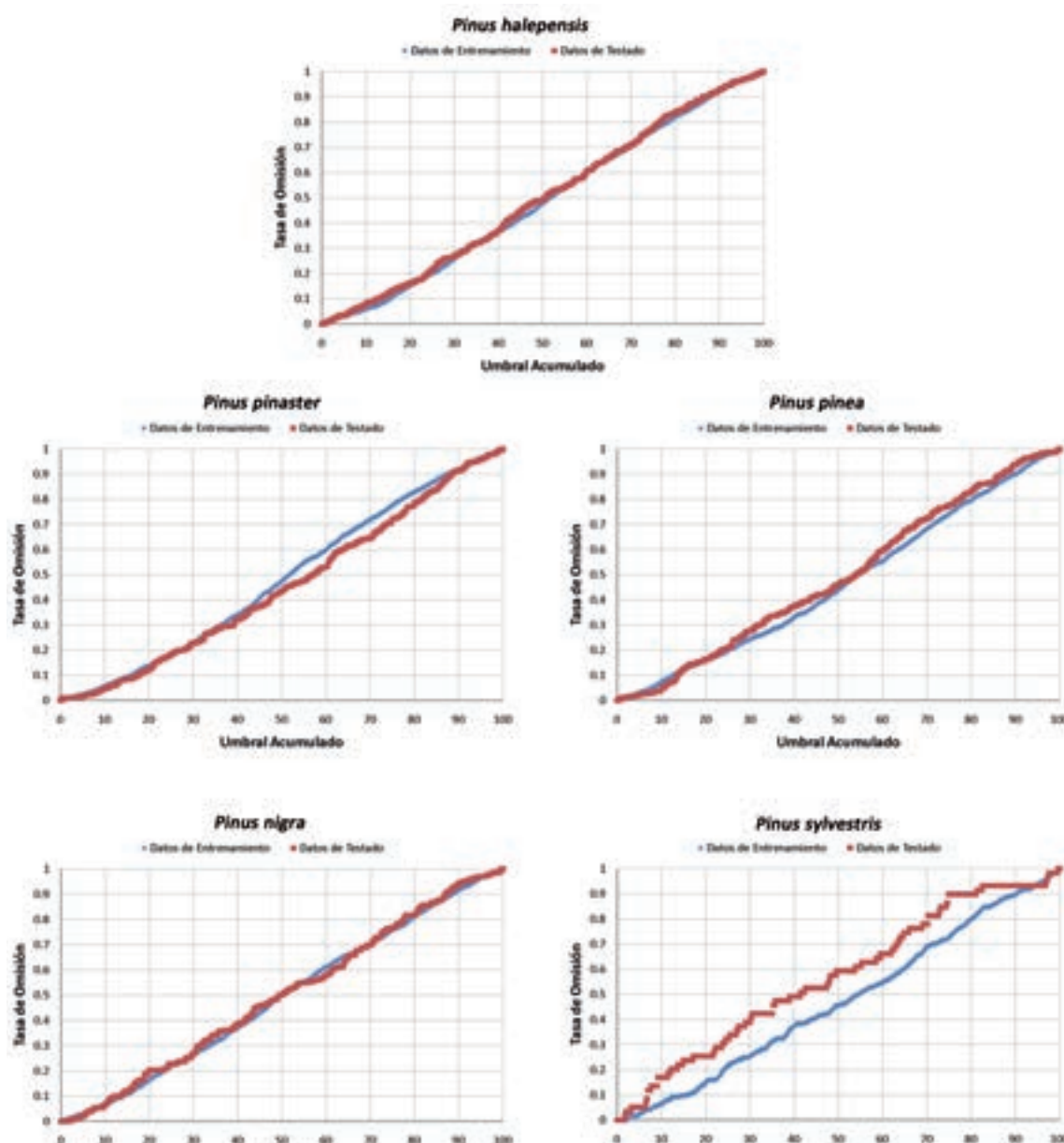


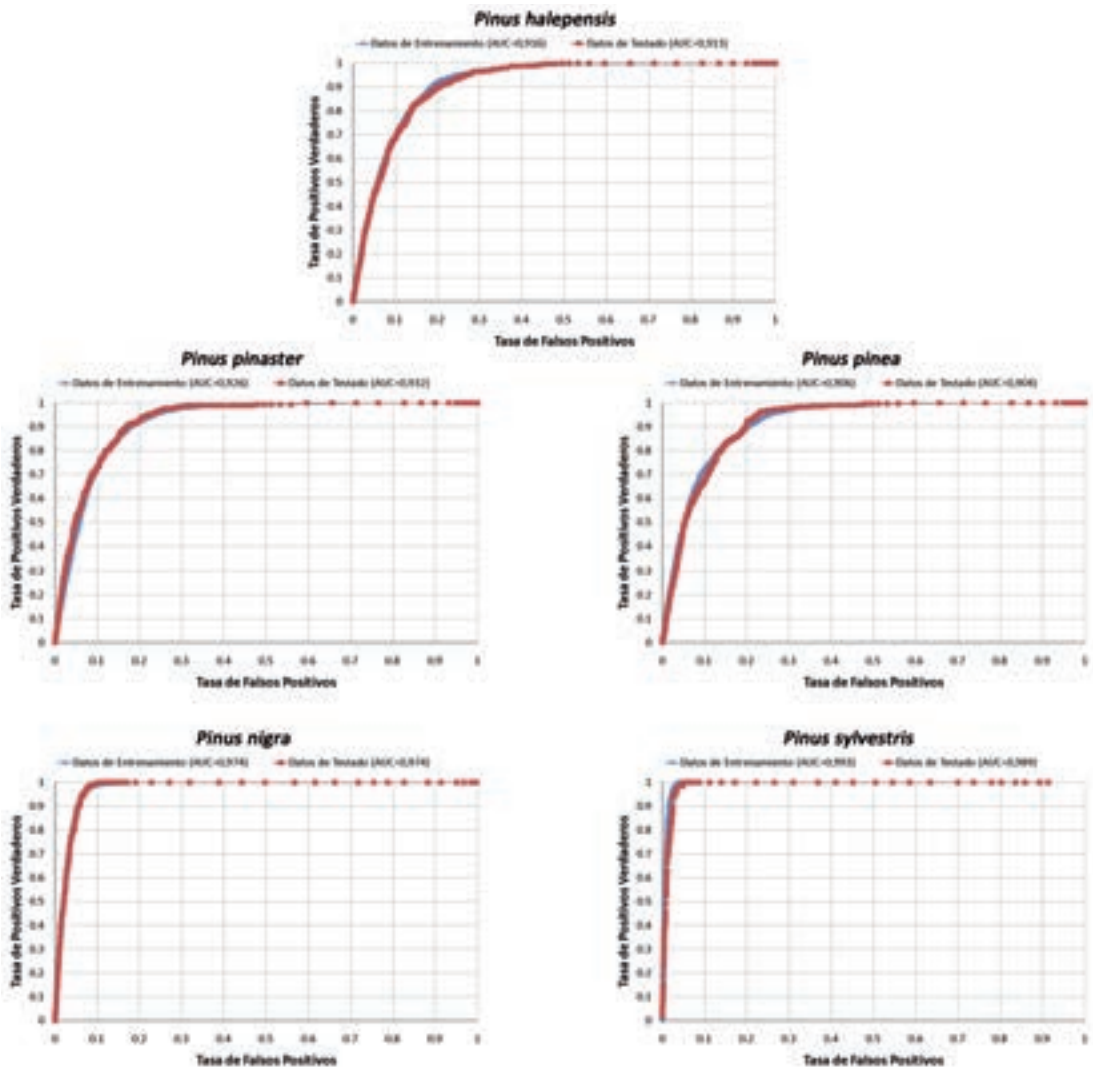
Figura 8.7. Tasas de omisión obtenidas para las especies de pinos analizadas

Puede apreciarse en la figura que para todas las especies analizadas, las tasas de omisión para los datos de entrenamiento y testado se acercaron a la tasa de omisión ideal, confirmando que los modelos obtenidos con MaxEnt fueron adecuados. Esto se logró utilizando un valor de multiplicador de regularización igual a 1, pero simplificando los modelos mediante la elección de únicamente dos tipos de “características”, la cuadrática y la lineal con umbral. Excluir del análisis la “característica” multiplicativa permitió, además, obtener modelos aditivos con mejores capacidades de generalización y cuyos resultados son fáciles de interpretar.

Tabla 8.11. Definición de verdaderos y falsos positivos (o negativos) en el entorno de MaxEnt.

CLASIFICACIÓN DEL PIXEL	PRESENCIA DE LA ESPECIE	PROBABILIDAD DE PRESENCIA ESTIMADA POR MAXENT
Positivo Verdadero	Sí	Mayor que el Valor Umbral
Falso Positivo	Sí	Menor que el Valor Umbral
Negativo Verdadero	No	Menor que el Valor Umbral
Falso Negativo	No	Mayor que el Valor Umbral

Un segundo indicador de la bondad del modelo es la calidad de la curva ROC, que representa la idoneidad de un algoritmo de clasificación cuyas salidas dependen de un valor umbral. Muestra la relación entre la tasa de positivos verdaderos y la tasa de falsos positivos (que representa el error de omisión). En la **Tabla 8.11** se definen los conceptos de verdaderos y falsos positivos (o negativos) según el entorno de MaxEnt. Un punto (x, y) de la curva ROC indica que para un valor umbral determinado, el algoritmo clasifica una fracción x de ejemplares negativos como positivos (tasa de falsos positivos, o lo que es lo mismo, 1-tasa de negativos verdaderos), y una fracción y de ejemplares positivos como positivos (tasa de positivos verdaderos). Mientras más cerca se encuentre la curva ROC al tope superior izquierdo, mejor será el modelo de clasificación. La siguiente **Figura 8.8** contiene las curvas ROC obtenidas para cada una de las especies analizadas.



Figuras 8.8. Curvas ROC obtenidas para las especies analizadas

Cuanto más se asemejen las curvas ROC de los datos de entrenamiento y de testado mejor será el modelo. Por el contrario, si estas curvas divergen sensiblemente es un síntoma de sobre-entrenamiento. En la anterior figura puede apreciarse que las curvas ROC obtenidas mostraron un comportamiento adecuado y permitieron confirmar la capacidad predictiva y generalizadora de MaxEnt para las condiciones analizadas en este estudio.

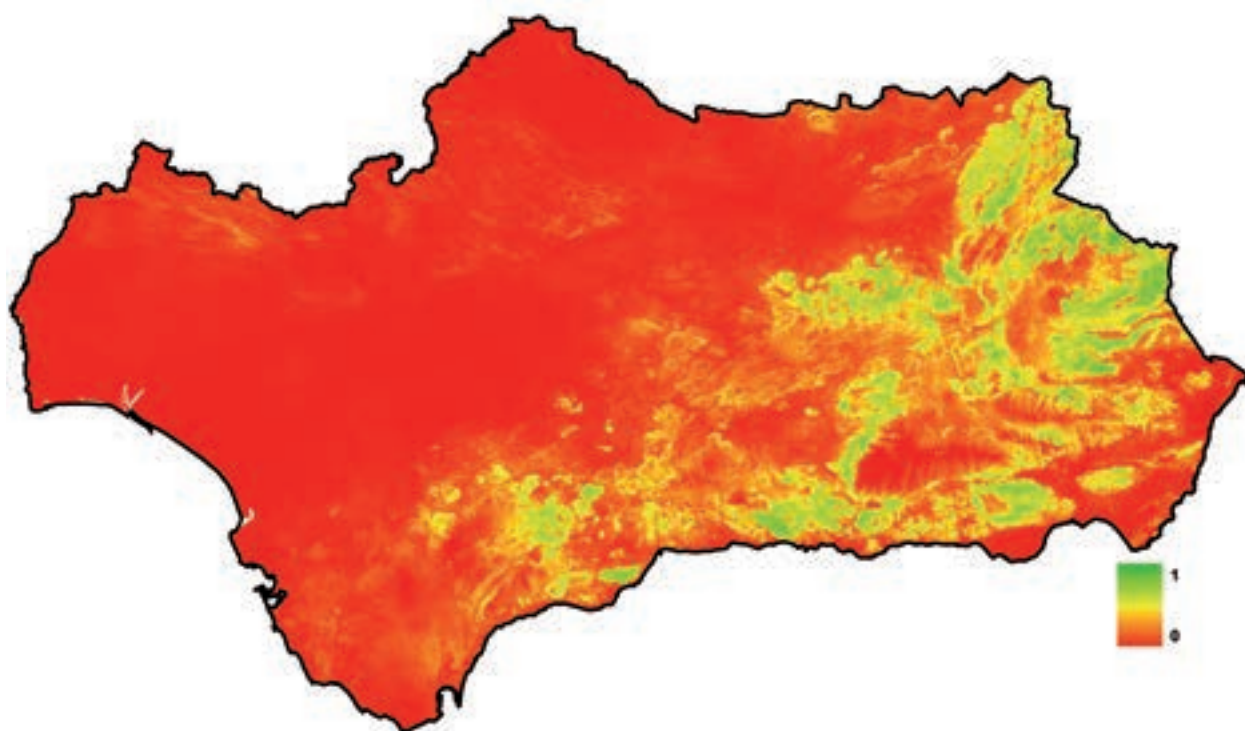
Otro indicador que proporciona MaxEnt es el área bajo la curva ROC (AUC, por sus siglas en inglés). AUC tiene una interpretación estadística: es la probabilidad de que el algoritmo de clasificación ordene correctamente dos eventos (uno positivo y otro negativo) escogidos aleatoriamente. Una clasificación perfecta alcanza un valor de AUC igual a 1, mientras que una clasificación totalmente aleatoria se corresponde con un AUC igual a 0,5. Sin embargo, como en las modelizaciones a partir de datos de presencia solamente, no existen muestras reales de ausencias, presupuesto operativo de MaxEnt, no es posible estimar la tasa de negativos verdaderos. MaxEnt resuelve esta dificultad mediante la generación de muestras de pseudo-ausencias repartidas por todo el territorio estudiado (WILEY *et al.*, 2003). Las pseudo-ausencias se generan en áreas geográficamente apartadas de las muestras de presencia y, al mismo tiempo, con pobres condiciones para el desarrollo de la especie. Este artificio implica que el máximo valor que puede alcanzar AUC bajo estas condiciones es siempre inferior a 1. Si la distribución de la especie cubre una fracción f de los píxeles que conforman el territorio, entonces el máximo valor que puede alcanzar AUC es igual a $1-f/2$. No obstante, las clasificaciones pueden considerarse adecuadas si se consiguen valores de AUC superiores a 0,7 y, asimismo, los AUC de los datos de entrenamiento y testado son similares para garantizar que el modelo no esté sobre-entrenado. Los datos de AUC de los modelos para las especies de pino de Andalucía se sitúan entre 0,904 y 0,974 (**Figura 8.8**), lo que corrobora el excelente ajuste de los modelos obtenidos por MaxEnt.

Una vez determinada la probabilidad de presencia de la especie en el territorio analizado mediante el modelo generado por MaxEnt (que adopta valores entre 0 y 1), es posible generar un mapa de distribución potencial determinando un umbral de probabilidad a partir del cual se considera que la especie puede estar representada en el territorio. Existen varios criterios para establecer el corte del valor umbral adecuado para delimitar las zonas potenciales para el desarrollo de cada especie. En este trabajo se optó por el umbral logístico que maximiza la suma de la tasa de positivos verdaderos y la tasa de negativos verdaderos tanto en la muestra de entrenamiento como de testado (LIU *et al.*, 2005; FREEMAN y MOISEN, 2008). Es decir, se elige el valor umbral que maximiza la suma del número de muestras de presencia que ocupan las zonas clasificadas como adecuadas para el desarrollo de la especie, más las muestras de ausencia (pseudo-ausencias) que se encuentran en las zonas clasificadas como no adecuadas.

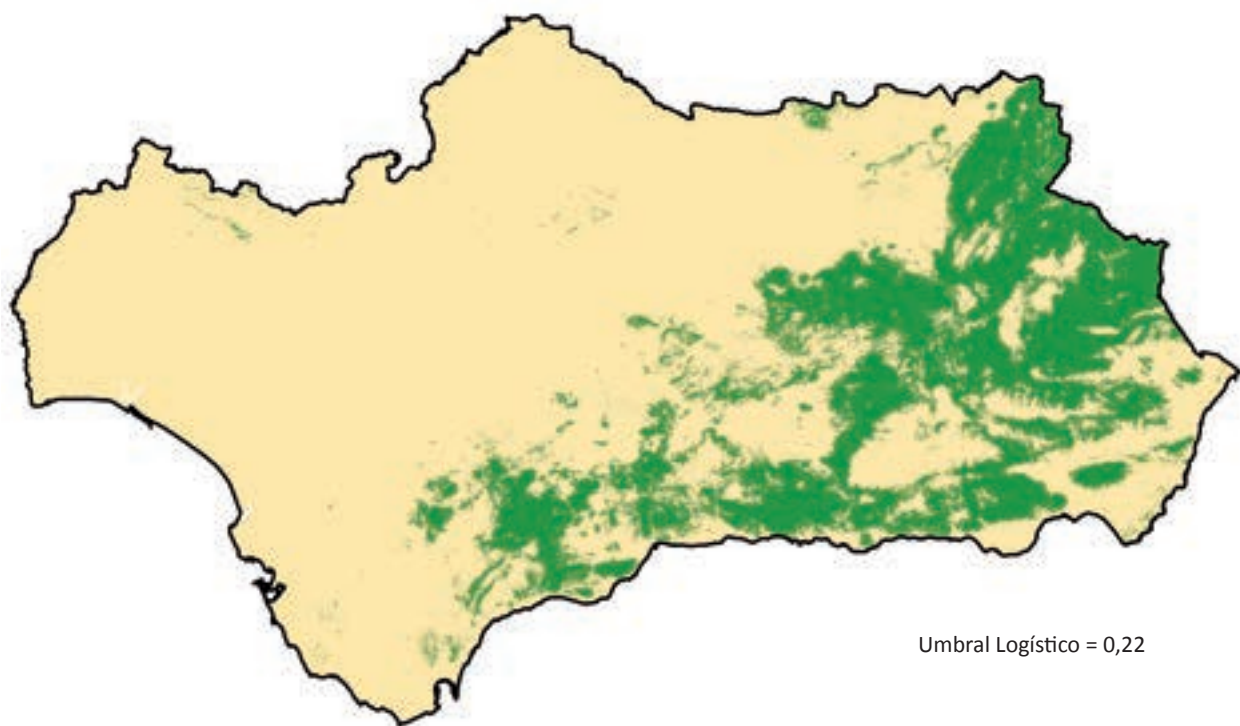
La **Figura 8.9** muestra los mapas de probabilidad de presencia y los correspondientes mapas de distribución potencial de cada especie acorde con el umbral elegido, que se sitúa entre una probabilidad 0,06 para *Pinus sylvestris* y 0,22 para *Pinus halepensis*.



Probabilidad de Presencia
Pinus halepensis



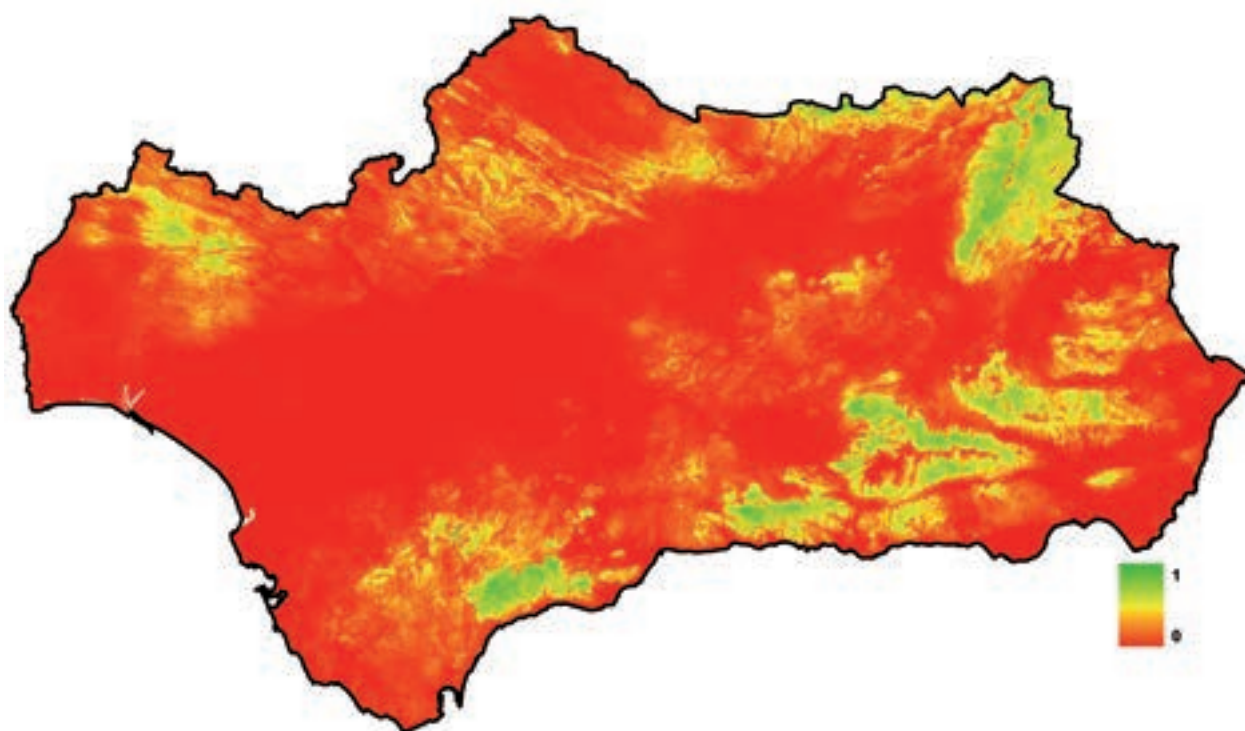
Distribución Potencial
Pinus halepensis



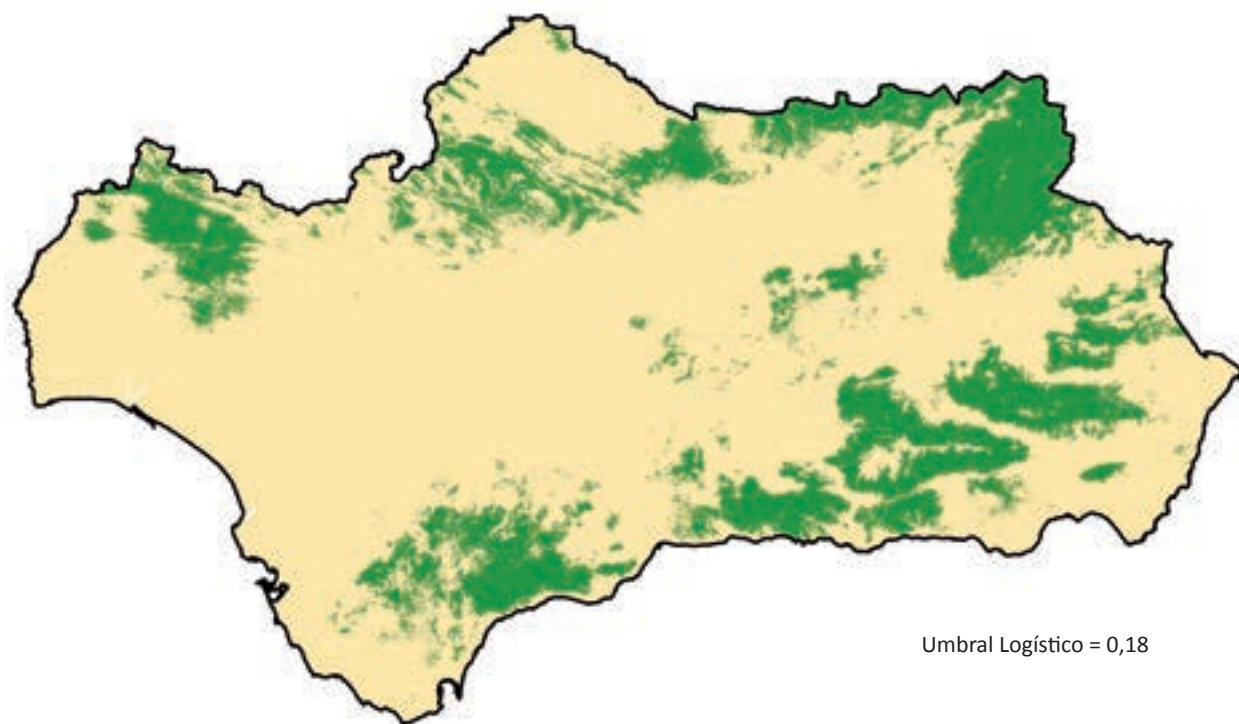
Umbral Logístico = 0,22

Figuras 8.9. Probabilidad de presencia (arriba) y distribución potencial (abajo) de las especies analizadas en la región andaluza

Probabilidad de Presencia
Pinus pinaster



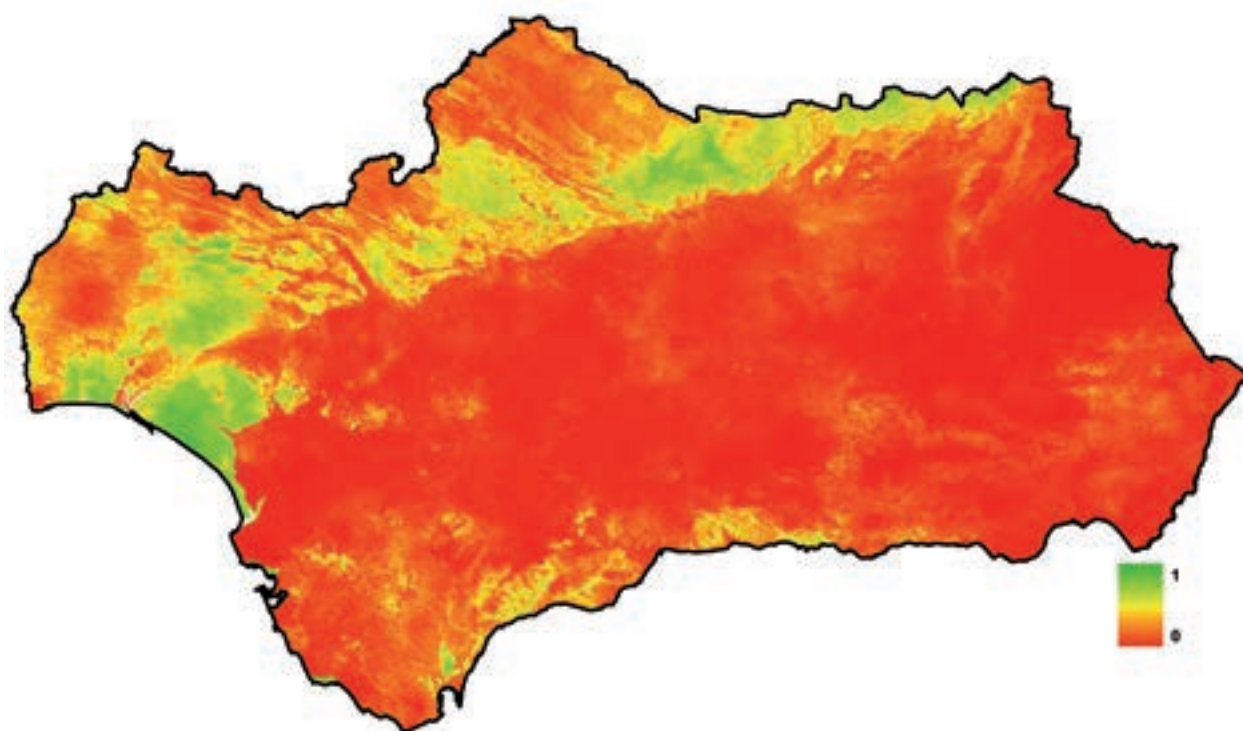
Distribución potencial
Pinus pinaster



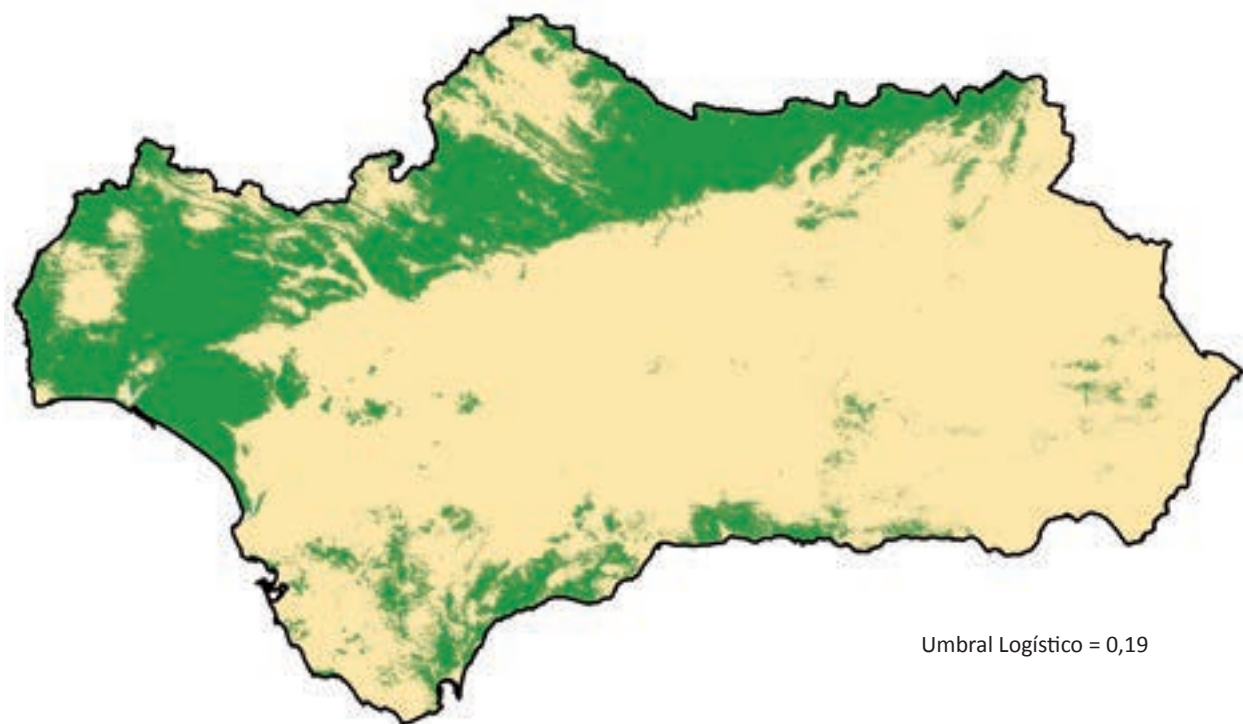
Umbral Logístico = 0,18

Figuras 8.9. Probabilidad de presencia (arriba) y distribución potencial (abajo) de las especies analizadas en la región andaluza. *Continuación*

Probabilidad de Presencia
Pinus pinea



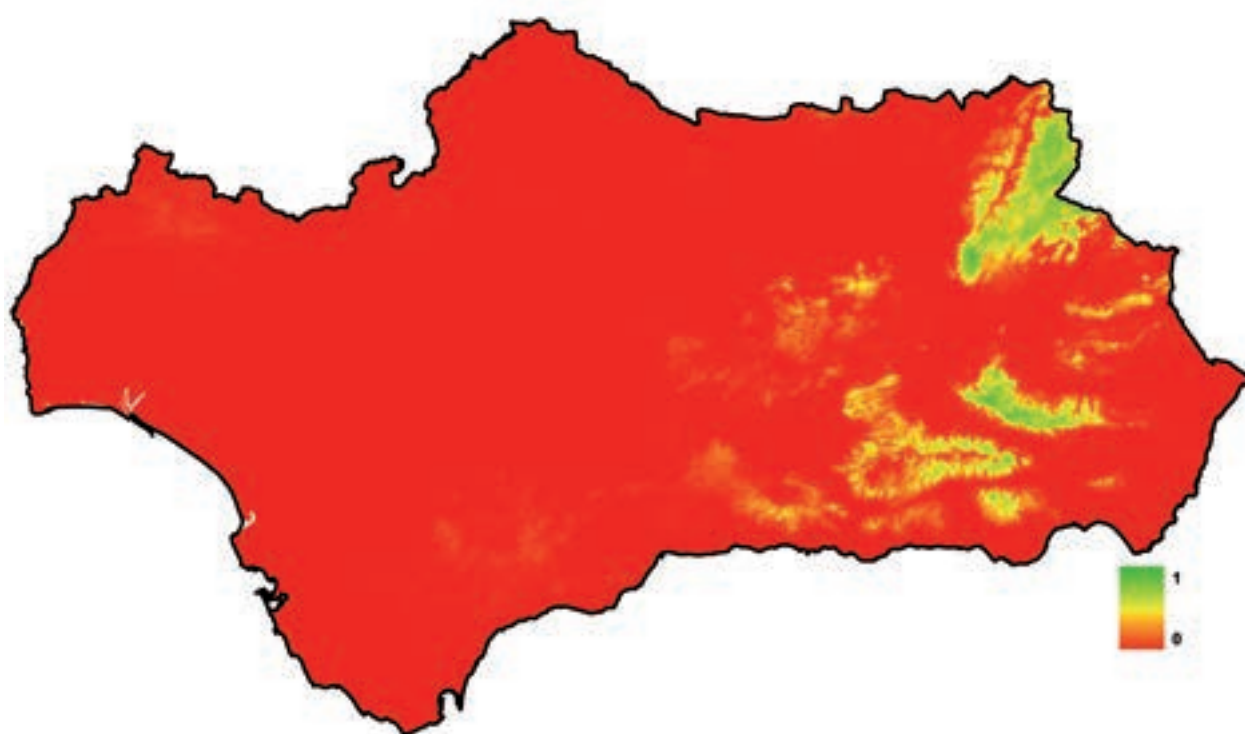
Distribución potencial
Pinus pinea



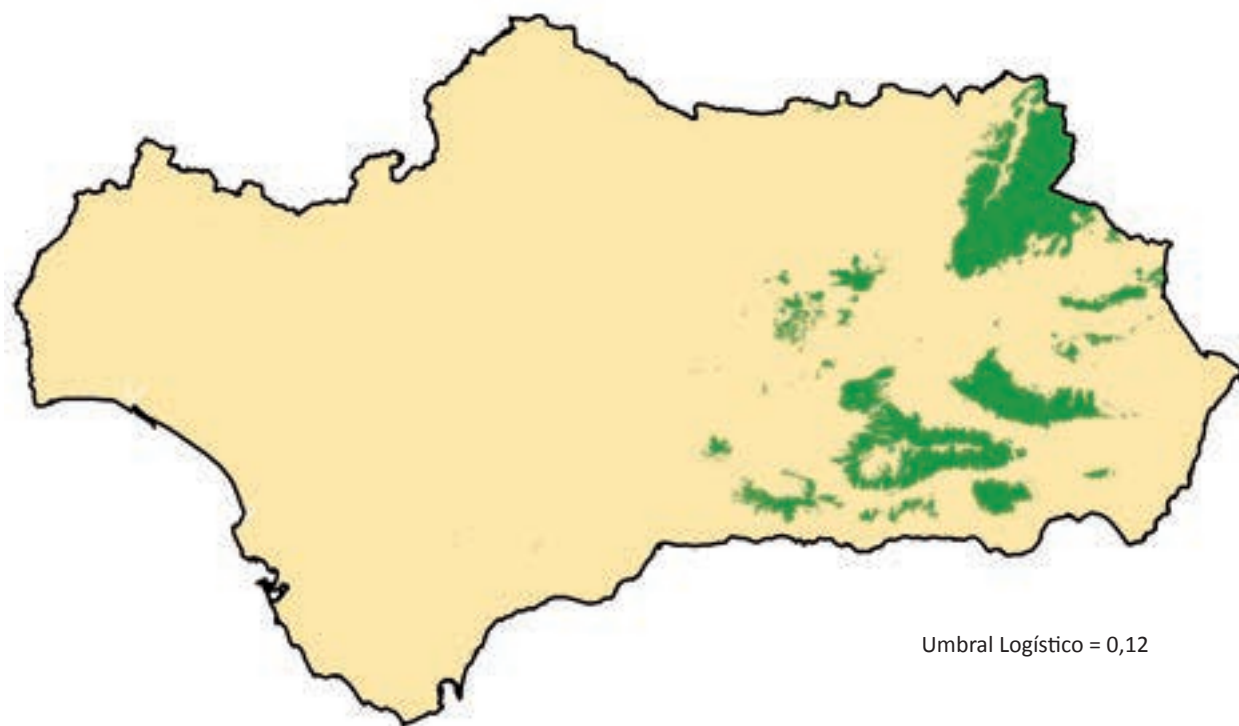
Umbral Logístico = 0,19

Figuras 8.9. Probabilidad de presencia (arriba) y distribución potencial (abajo) de las especies analizadas en la región andaluza. *Continuación*

Probabilidad de Presencia
Pinus nigra



Distribución potencial
Pinus nigra



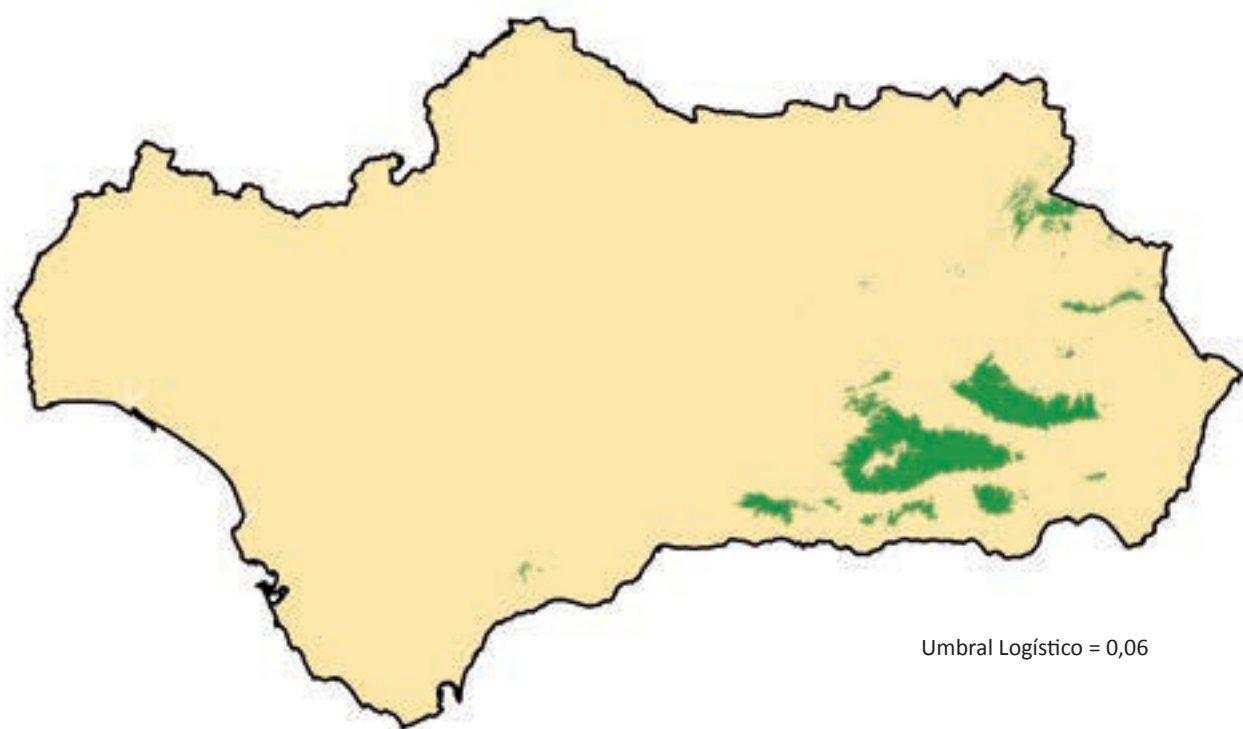
Umbral Logístico = 0,12

Figuras 8.9. Probabilidad de presencia (arriba) y distribución potencial (abajo) de las especies analizadas en la región andaluza. *Continuación*

Probabilidad de Presencia
Pinus sylvestris



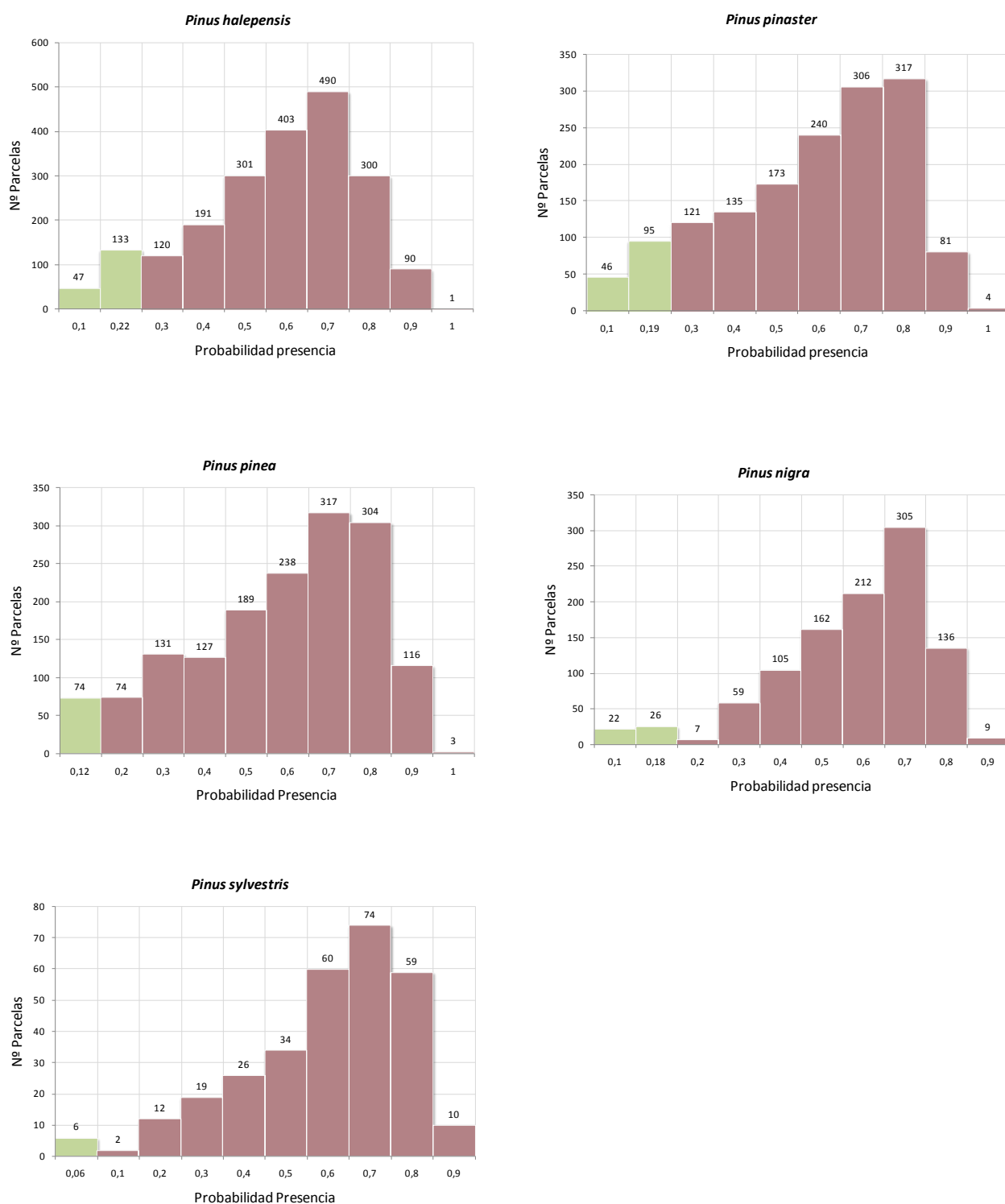
Distribución potencial
Pinus sylvestris



Umbral Logístico = 0,06

Figuras 8.9. Probabilidad de presencia (arriba) y distribución potencial (abajo) de las especies analizadas en la región andaluza. *Continuación*

En la **Figura 8.10** se incluyen los histogramas de probabilidad de presencia para las parcelas de muestreo de las especie que se han utilizado en el modelo (IFN3) demostrando el buen ajuste del modelado que en la mayor parte de las parcelas se sitúan por encima de una probabilidad de presencia estimada superior al umbral logístico de corte:



Figuras 8.10. Histogramas de probabilidad de presencia para las parcelas de especie empleadas (IFN3). En verde parcelas con valor de probabilidad de presencia de la especie inferior al umbral logístico de corte

En la **Figura 8.11** se exponen los resultados de las pruebas de *Jackknife* para determinar la importancia de las variables ambientales sobre la distribución de cada especie. La contribución de las variables debe interpretarse con cautela cuando están significativamente correlacionadas entre sí. Es decir, una variable con bajo índice de ganancia no necesariamente implica que sea poco influyente si está fuertemente correlacionada con otra variable que sí ha sido clasificada como importante. Por tanto, los resultados que se muestran a continuación deben interpretarse conjuntamente con la matriz de correlación de las variables ambientales, presentada anteriormente.

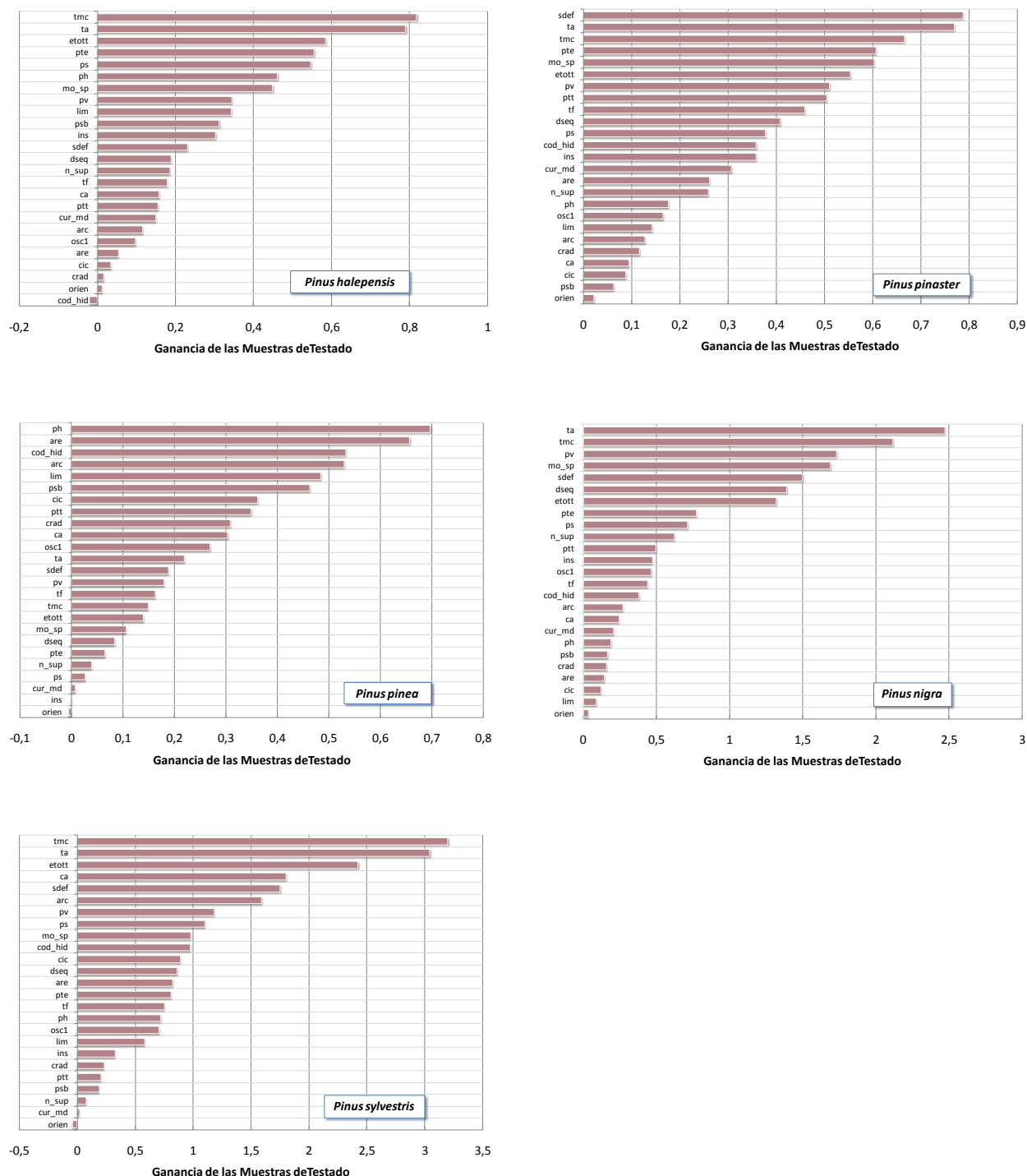


Figura 8.11. Importancia de las variables ambientales en el desarrollo de cada especie

Finalmente, en el **Anejo 5**, se muestran las curvas de respuestas de las variables ambientales para cada una de las especies de pino analizadas en este estudio. Los picos pueden interpretarse como los intervalos de las condiciones ambientales que resultan más favorables para la presencia de la especie en el territorio.

8.4. Comparación de Metodologías

8.4.1. Comparación de resultados entre los dos métodos empleados: autoecología paramétrica y MaxEnt

Los dos métodos anteriores, autoecología paramétrica y maxent, permiten obtener dos mapas de distribución potencial de las especies de pinos si bien hay que recordar que en la información de vegetación de partida no se ha discriminado el origen de los pinos presentes en el territorio, asumiendo por ello una fuente de error en los modelos generados al igualar la relevancia de la presencia de las especies cuando realmente se pueden dar lugar a condiciones de vegetación óptimas, subóptimas o, incluso, claramente deficientes.

Para seleccionar cuál de ambas aproximaciones ofrece un resultado más idóneo para la siguiente fase del este estudio (Mapas de Calidad de Estación) se ha procedido de dos maneras distintas. Por un lado, se ha contrastado los resultados obtenidos con cada metodología y, por otro, se ha realizado una comparación entre la superficie potencial obtenida con ambos métodos y la superficie actual de distribución de cada especie. Esta comparación se ha llevado a cabo mediante análisis de regresión. Debido al elevado número de registros de los modelos al ser la resolución de 100 x 100 metros, y ante la dificultad de su análisis por métodos convencionales estadísticos, se han extraído los datos para cada método en una malla de 1.000 metros para las especies de *P. halepensis*, *P. pinaster* y *P. pinea* y de 500 m, para *P. nigra* y *P. sylvestris*. Asimismo, para su análisis se han eliminado todas las celdillas sin presencia en cada modelo.

Los datos de cada modelo poseen rangos distintos. En el método paramétrico, los valores del índice de potencialidad varían entre 0 y 4, mientras que en el método MaxEnt la probabilidad de presencia varía de 0 a 1. Como se ha expuesto el índice de potencialidad procede de cálculos realizados a partir de los índices de aptitud para cada parámetro, que varían de 0 a 1, que posteriormente fueron multiplicados por 10^4 y calculado su logaritmo decimal. Con el objeto de poder establecer una relación entre dos variables, el valor obtenido de MaxEnt se ha multiplicado por 10^4 y se ha calculado su logaritmo decimal.

Tras esta transformación se llevó a cabo un análisis de regresión entre los datos de índice de potencialidad de la caracterización paramétrica y de la variable transformada de MaxEnt, obteniendo los resultados que se muestran en la **Tabla 8.12**:

Tabla 8.12. Correlación existente entre el índice de potencialidad de la caracterización paramétrica y la variable transformada de MaxEnt

ESPECIE	CORRELACIÓN LINEAL	NIVEL DE CONFIANZA	COEFICIENTE CORRELACIÓN	R ²	ERROR ESTÁNDAR
<i>Pinus halepensis</i>	$lpot = 3.50584 + 0.0823216 * (MaxEnt^*)$	99%	0,69	47,64%	0,061
<i>Pinus pinaster</i>	$lpot = 3.56004 + 0.0708544 * (MaxEnt^*)$		0,75	56,67%	0,052
<i>Pinus pinea</i>	$lpot = 3.53886 + 0.0760941 * (MaxEnt^*)$		0,47	21,71%	0,078
<i>Pinus nigra</i>	$lpot = 3.48115 + 0.0890572 * (MaxEnt^*)$		0,76	57,17%	0,061
<i>Pinus sylvestris</i>	$lpot = 3.20941 + 0.163079 * (MaxEnt^*)$		0,80	63,91%	0,060

(*) *MaxEnt**: transformación de la probabilidad de presencia dada por la metodología MaxEnt

Para todas las especies, a excepción de *Pinus pinea*, la correlación existente entre ambos índices muestran una relación moderadamente fuerte (R^2 comprendido entre 0,4764 y 0,6391) entre las variables analizadas, siendo para todas las especies esta relación estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 99% (p-valor inferior a 0.01).

Una vez realizado el análisis anterior, se comparó la superficie potencial resultante de la aplicación de cada uno de los modelos con la distribución actual. Para ello, se calculó la superficie derivada del modelo de MaxEnt a partir de su umbral logístico (celdillas del ráster 100 x 100 m con valor superior al umbral logístico para cada especie de pino) y en el caso del método de autoecología paramétrica la superficie de las celdillas cuya clase de potencialidad fuera óptimas y altas. El resultado se muestra en la **Tabla 8.13**:

Tabla 8.13. Comparación de las superficies de presencia potencial de ambos modelos con la distribución actual de las especies de pinos

ESPECIE	SUP. MODELO MAXENT DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL (ha)	SUP. MODELO PARAMÉTRICO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL (ha)	SUP. DISTRIBUCIÓN ACTUAL (ha)
<i>Pinus halepensis</i>	1.882.177	2.714.160	564.910
<i>Pinus pinaster</i>	1.848.504	3.064.132	422.324
<i>Pinus pinea</i>	2.315.826	3.583.326	475.787
<i>Pinus nigra</i>	626.213	550.216	231.202
<i>Pinus sylvestris</i>	308.618	125.645	86.258

Para las especies de pino con mayor extensión en el territorio (*P. halepensis*, *P. pinaster* y *P. pinea*) su distribución potencial aplicando el modelo paramétrico es mucho mayor que la que resulta de aplicar el modelo de MaxEnt: en ambos casos supera en gran medida a la superficie de distribución actual. En contrapartida, para las especies de menor ámbito de distribución (*P. nigra* y *P. sylvestris*), el modelo paramétrico ofrece unas cifras de superficie potencial relativamente más ajustadas en relación con la distribución actual de la especie, siendo mayor su ajuste en *P. sylvestris*.

Si bien es necesario un análisis de mayor detalle para estudiar las diferencias locales y, especialmente, contrastar la superficie de distribución actual que es correctamente identificada en cada modelo de distribución potencial, los resultados de la **Tabla 8.13** aportan una imagen comparativa de conjunto útil. Estos resultados pueden tener dos reflexiones. Por un lado, que el modelo paramétrico no tenga un buen ajuste comparativo en las especies de amplia distribución, obteniéndose resultados más ajustados cuando se discretiza estos análisis en grupos territoriales homogéneos ambientalmente o mediante la aplicación de este método en especies que presenten una distribución que responda a un mayor grado de homogeneidad de las condiciones ambientales, tal y como se ha demostrado en el estudio de SANCHEZ PALOMARES *et al.* (2008). Por otro lado, la distribución potencial más extensa en el primer grupo de especies puede estar justificada por su mayor valencia ecológica.

En la **Tabla 8.14**, se aporta un estudio de detalle de la bondad de cada uno de los métodos a partir de la evaluación de la clasificación de la superficie actual de distribución de los pinos en Andalucía.

Tabla 8.14. Distribución de la superficie actual de las especies de pinos según categorización de ambos modelos

ESPECIE	Distribución Actual (ha)	CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA										MAXENT			
		Óptima		Alta		Media		Baja		Fuera de área potencial		Sup. con valor < Umbral Logístico		Sup. con valor > Umbral Logístico	
		Sup (ha)	(%)	Sup (ha)	(%)	Sup (ha)	(%)	Sup (ha)	(%)	Sup (ha)	(%)	Sup (ha)	(%)	Sup (ha)	(%)
<i>Pinus halepensis</i>	564.910	144.574	25,59	288.473	51,07	87.035	15,41	12.998	2,30	31.830	5,63	90.604	16,04	474.306	83,96
<i>Pinus pinaster</i>	422.324	91.180	21,59	228.879	54,20	57.616	13,64	6.017	1,42	38.632	9,15	59.943	14,19	362.381	85,81
<i>Pinus pinea</i>	475.787	142.057	29,86	218.004	45,82	66.437	13,96	30.568	6,42	18.721	3,93	58.194	12,23	417.593	87,77
<i>Pinus nigra</i>	231.202	63.151	27,31	105.279	45,54	34.897	15,09	4.888	2,11	22.987	9,94	23.649	10,23	207.553	89,77
<i>Pinus sylvestris</i>	86.258	22.724	26,34	31.002	35,94	11.161	12,94	2.623	3,04	18.748	21,73	8.013	9,29	78.245	90,71

8.4.2. Elección del método más apropiado para los fines de este estudio

La elección de un método u otro es una decisión de gran importancia, ya que, en el caso concreto de este trabajo, uno de sus objetivos es la estimación de la superficie potencial de cada especie analizada para incorporar este dato territorial al modelo de existencias de biomasa.

Las superficies generadas a partir del modelo de MaxEnt (para las especies de pino con mayor extensión en el territorio andaluz) son más reducidas que las resultantes de la metodología paramétrica. Esto implica que las parcelas de inventario tienen mejor distribución espacial en la superficie obtenida a partir del modelo MaxEnt que la obtenida para la caracterización paramétrica, lo que es de crucial importancia a la hora de obtener buenos ajustes en la aplicación de métodos geoestadísticos de interpolación espacial en la obtención de mapas continuos. Esto no quiere decir que los resultados del modelo paramétrico no sean relevantes, pero para el objetivo de este trabajo, ha sido más conveniente la elección de la metodología MaxEnt.

Además de esto, se han considerado los siguientes factores (PHILLIPS *et al.*, 2006) en la elección de MaxEnt:

- ❑ Solo requiere datos de presencia de la especie junto con la información ambiental del área de estudio.
- ❑ Puede utilizar tanto datos categóricos como continuos.
- ❑ Utiliza un algoritmo determinístico eficiente que ha sido desarrollado para garantizar la convergencia de la distribución de probabilidad óptima (la de máxima entropía).
- ❑ Cuando no se utilizan características multiplicativas en la configuración de MaxEnt, el modelo aditivo resultante, aún siendo complejo, permite interpretar la influencia de cada variable ambiental sobre la idoneidad del sitio, asignando el peso específico que tiene cada una de las variables ambientales en la probabilidad de presencia de la especie.
- ❑ Los problemas de sobre-entrenamientos se pueden controlar con el parámetro de regularización o la elección de modelos más simples.
- ❑ La salida de MaxEnt es una función continua, permitiendo hacer una distinción muy precisa de la idoneidad de cada sitio para el desarrollo de una especie. No obstante, si se desea predicciones binarias, se puede utilizar valores umbrales (acumulados o logísticos) para ello.
- ❑ MaxEnt usa una aproximación generativa, no discriminativa, para llegar a los resultados, que puede ser ventajoso cuando se dispone de pocos datos de entrenamiento.
- ❑ MaxEnt permite obtener las curvas de respuestas de las variables ambientales.

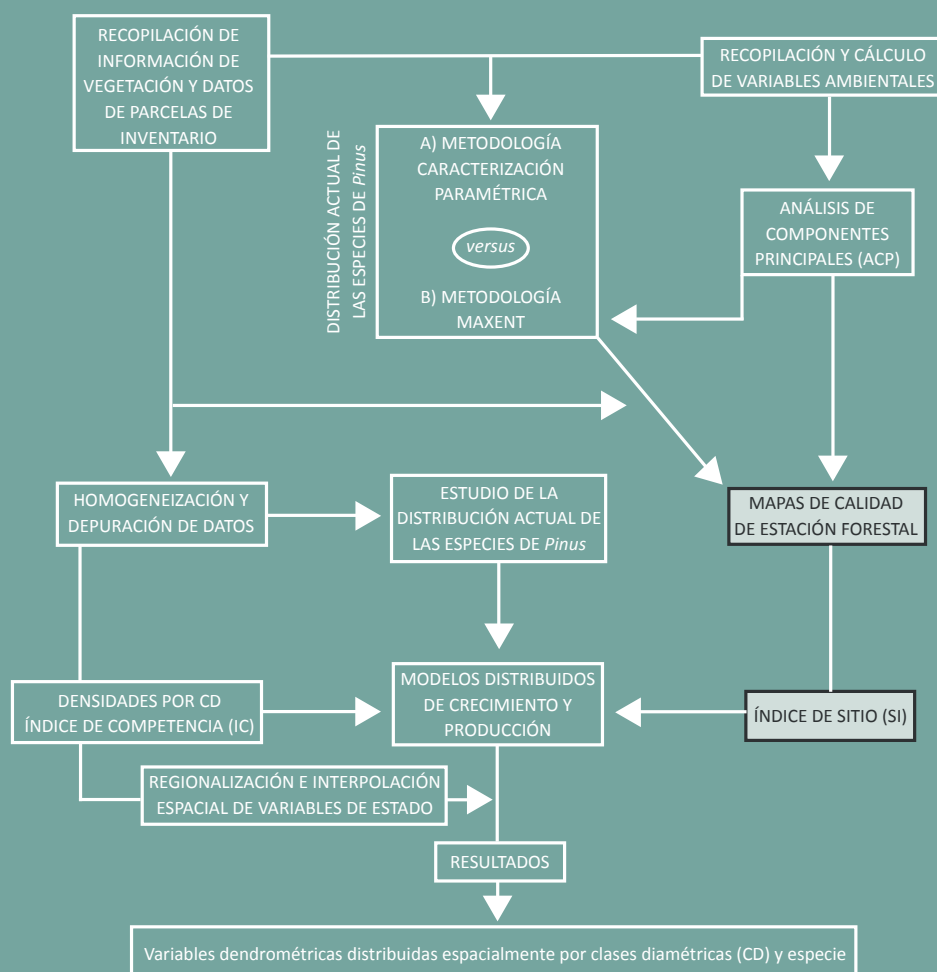
Por último indicar que la metodología paramétrica aplicada a este trabajo tiene al menos dos debilidades que, en buena medida, pueden explicar las razones por las que se obtiene mayor extensión de superficie potencial: considera que todas las variables ambientales ejercen el mismo impacto en la distribución potencial de las especies y el valor umbral inferior y superior usado para discriminar la potencialidad de un sitio se elige de una forma, más o menos arbitraria.





9

Calidad de Estación Forestal (Índice de Sitio)



9.1. Antecedentes y objetivo

La calidad de la estación forestal para una especie es un indicador de la capacidad productiva de un lugar frente a una determinada especie forestal y tipo de producto (SECF, 2005). Se refiere a la capacidad de un lugar determinado para el crecimiento de los árboles o cualquier otra vegetación, denominándose también “productividad forestal” (ÁLVAREZ GONZÁLEZ *et al.*, 2004). Con frecuencia la capacidad productiva de un sitio o estación forestal se asocia al volumen de madera que la especie forestal es capaz de generar a lo largo de su ciclo productivo. En la práctica, conocer la capacidad productiva de un sitio mediante la medición directa del volumen de biomasa no es operativo. Por ello se utilizan indicadores relacionados con la producción de más fácil medición pudiéndose considerar tanto factores intrínsecos (evolución temporal de alguna variable de la masa) como ambientales (clima, suelo, fisiografía, relaciones bióticas, etc.).

El indicador más extendido es la utilización de la altura (altura total dominante o altura total media) de los árboles como índice de calidad de estación forestal. En efecto, se parte de la evidencia experimental de que la altura de los árboles de una masa coetánea para una especie y edad determinada está altamente correlacionada con la capacidad productiva, y que esta correlación es más significativa que la que se obtiene con cualquier otro parámetro de la masa. Asimismo, la altura de los árboles es relativamente independiente de factores tales como la densidad de pies, el área basimétrica, los tratamientos silvícolas, etc. (SERRADA, 2002).

La obtención de curvas de calidad de estación es la técnica más frecuentemente utilizada para evaluar la producción de una única especie en un rodal coetáneo. Su representación es un conjunto de curvas que muestran la altura que alcanza el arbolado en función de la edad del rodal; cada curva hace referencia a las calidades de estación que se identifican en función de la altura que alcanza el arbolado para una edad de referencia. Estas curvas se elaboran mediante ajustes de regresión entre la altura de los árboles en una serie de parcelas de muestreo y la edad, estableciendo diferentes rangos de edad. Para estos ajustes se utilizan distintos tipos de métodos estadísticos (método de la curva guía, diferencias algebraicas, predicción de parámetros); se han propuesto gran número de funciones de crecimiento, aunque frecuentemente se utiliza la función propuesta por VON BERTALANFFY (1949, 1957) adaptada para el crecimiento de masas forestales por RICHARDS (1959), o modelos de tipo logísticos (función de Hossfeld, en CIESZEWSKI, 2000).

Como medida de la clase de calidad de una estación se utiliza el Índice de Calidad de Estación o Índice de Sitio, valor de la altura total media de los árboles de una masa a una determinada edad de referencia elegida arbitrariamente. En este trabajo se fija en 50 años la edad para determinar el IS (Índice de Sitio).



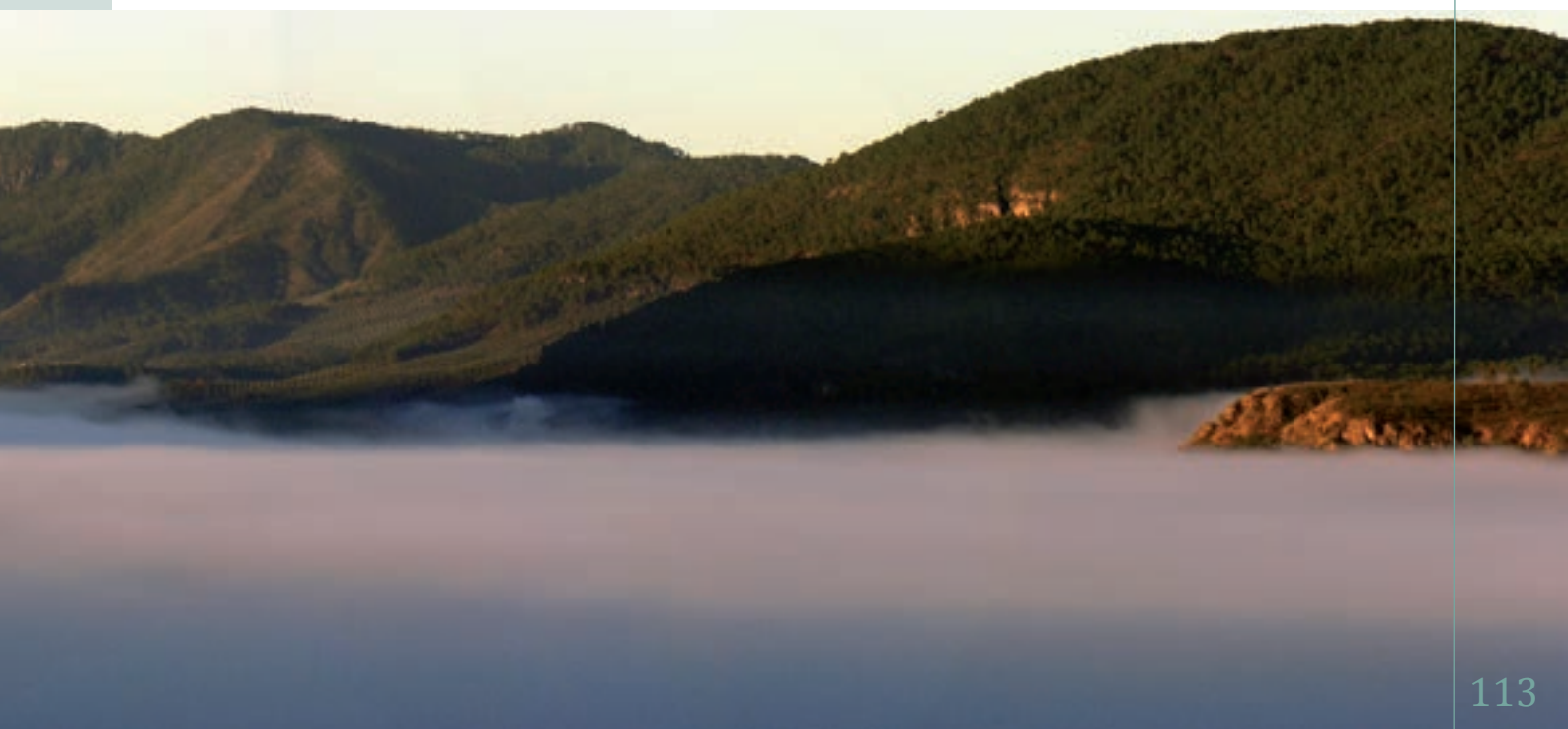
Lograr una adecuada estimación de la productividad de un sitio tiene una gran importancia para la gestión forestal, ya que permite determinar la posibilidad anual y adoptar decisiones de manejo como la planificación de las cortas o el turno apropiado; sin embargo, no siempre se dispone de muestras en número suficiente y situación espacial idónea para inferir fiablemente el *Índice de Sitio* a escala regional mediante técnicas de interpolación espacial. Por esta razón se correlaciona la altura de los árboles (para una edad de referencia predeterminada) con un conjunto de variables ambientales que son capaces de explicar el potencial productivo de los sitios y que además, están disponibles con suficiente nivel de detalle en toda la zona de estudio.

Los factores climáticos, topográficos y edáficos (GANDULLO *et al.*, 1994; EGMASA, 2003; BERGÈSA *et al.*, 2005), son los más adecuados para predecir la capacidad productiva de los sitios desde el punto de vista forestal. Uno de los procedimientos más comunes se basa en la aplicación de análisis de regresión múltiple para correlacionar las variables ambientales (o sus transformadas) con las alturas de los árboles para la edad de referencia predeterminada.

El desarrollo de curvas de calidad de estación para los pinares españoles parte de los trabajos pioneros de PITA-CARPENTER (1964, 1965, 1966, 1967), que utilizó la función de Hossfeld. En recientes revisiones (SERRADA, MONTERO y REQUE, 2008; BRAVO, ÁLVAREZ y DEL RÍO, 2012) se ofrece una panorámica exhaustiva de los diferentes trabajos en los que se han propuesto curvas de calidad de estación y ecuaciones de Índice de Sitio. Destacan en particular, los trabajos de MONTERO *et al.* (2001) y RUIZ PEINADO *et al.* (2010) para *Pinus halepensis*; de BAUTISTA *et al.* (2001) para *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*; de BRAVO OVIEDO *et al.* (2004, 2007) para *Pinus pinaster*; y CALAMA *et al.* (2003) y MADRIGAL *et al.* (2007) para *Pinus pinea*.

Este tipo de análisis logra explicar una buena parte (entre 10 y 60%) de la varianza del *IS* (GANDULLO *et al.*, 1994; BERGÈSA *et al.*, 2005; MONSERUD *et al.*, 2006; BEAULIEU *et al.*, 2011), dependiendo de la especie, la calidad de los datos disponibles y la idoneidad de las muestras elegidas. La fracción de *IS* no explicada por los modelos de regresión (residuos de las regresiones) puede interpolarse espacialmente en toda la región de interés, permitiendo mejorar sensiblemente la capacidad predictiva de los modelos. Si la interpolación espacial de los residuos se lleva a cabo con el método geoestadístico de kriging ordinario, entonces el procedimiento de inferencia espacial se denomina Regresión-Kriging (HENGL, 2007; HENGL *et al.*, 2007).

El objetivo de este capítulo ha sido generar la distribución del Índice de Sitio para las cinco especies de pino en Andalucía mediante la técnica de inferencia espacial conocida como regresión-kriging con la finalidad de que estos valores formen parte del modelo de crecimiento y producción desarrollado en la fase subsiguiente.



9.2. Materiales y metodología

Los datos de edad y altura total de las especies de pino analizadas se obtuvieron de los Inventarios Forestales Nacionales IFN2 e IFN3 (MMA, 1998; MARM, 2008). Se incluyeron datos del Inventario Forestal II para completar datos de parcelas que no contaban con esa información en el IFN3. Solo se usaron muestras pertenecientes a masas regulares y coetáneas con edades superiores a 10 años, evitando las masas de coníferas en etapas juveniles, en las cuales la posibilidad de error es mayor a la hora de determinar la curva de calidad sobre la que se sitúa la masa.

La primera fase de este método consiste en el cálculo del Índice de Sitio para cada una de las parcelas del IFN.

El Índice de Sitio se estimó tomando como referencia las curvas de calidad obtenidas por PITA-CARPENTER (1964, 1965, 1966) y GANDULLO y SANCHEZ-PALOMARES (1994), para una edad típica de 50 años. Para el *P. pinaster* GANDULLO y SANCHEZ-PALOMARES (1994) trabajaron con datos de altura total dominante por lo que fue necesario transformar los datos originales a altura total media mediante la **Ecuación 9.1** (RÍO *et al.*, 2006).

$$Hm = -0,612 + 0,989Hd \quad (9.1)$$

Siendo Hm, altura total media y Hd altura total dominante.

Como paso previo se identificaron las funciones de ajuste de los pares de datos contenidos en GANDULLO y SANCHEZ-PALOMARES (1994) (**Tabla 9.1**), de manera que estas ecuaciones permitiesen la representación continua de las curvas guías de PITA-CARPENTER.

Con los pares de datos “altura total media-edad” de cada parcela de inventario, se determinó el valor de altura para la edad de referencia (50 años) mediante curvas interpoladas entre las curvas de calidad guías correspondientes. Este valor de altura total media para la edad de referencia es el considerado como índice de sitio (*IS*) para este estudio.

Las curvas de calidad guías utilizadas se exponen gráfica y analíticamente en la siguiente **Tabla 9.1** y **Figura 9.1** conjuntamente con un gráfico que explica el proceso de obtención del *IS* para una muestra hipotética.

Tabla 9.1. Expresión analítica de las Curvas de Calidad empleadas

ESPECIE	CALIDAD	FÓRMULA
<i>Pinus halepensis</i>	1	$y = -0,0021x^2 + 0,4565x - 1,9714$
	2	$y = -0,0017x^2 + 0,3504x - 1,3286$
	3	$y = -0,0011x^2 + 0,2464x - 1,0571$
	4	$y = -0,0006x^2 + 0,1387x - 0,6429$
<i>Pinus nigra</i>	1	$y = -0,0018x^2 + 0,4794x - 2,4000$
	2	$y = -0,0011x^2 + 0,3764x - 2,0857$
	3	$y = -0,0009x^2 + 0,2933x - 1,5571$
	4	$y = -0,0008x^2 + 0,2225x - 1,1143$
	5	$y = -0,0006x^2 + 0,1452x - 0,7143$
<i>Pinus pinaster</i>	1	$y = -0,0041x^2 + 0,6556x - 4,2289$
	2	$y = -0,0035x^2 + 0,5562x - 3,6496$
	3	$y = -0,0028x^2 + 0,4544x - 3,0774$
	4	$y = -0,0023x^2 + 0,3589x - 2,5759$
	5	$y = -0,0016x^2 + 0,2595x - 1,9966$
<i>Pinus pinea</i>	1	$y = -0,0012x^2 + 0,4337x - 2,4714$
	2	$y = -0,0015x^2 + 0,3461x - 1,5571$
	3	$y = -0,0013x^2 + 0,2488x - 0,9571$
	4	$y = -0,0008x^2 + 0,1396x - 0,2857$
<i>Pinus sylvestris</i>	1	$y = -0,0021x^2 + 0,4997x - 2,7196$
	2	$y = -0,0015x^2 + 0,3953x - 1,9696$
	3	$y = -0,0010x^2 + 0,3039x - 1,6304$
	4	$y = -0,0004x^2 + 0,2020x - 1,0178$
	5	$y = 0,0001x^2 + 0,1111x - 0,8357$

Nota: y = Hm, altura total media x = Edad

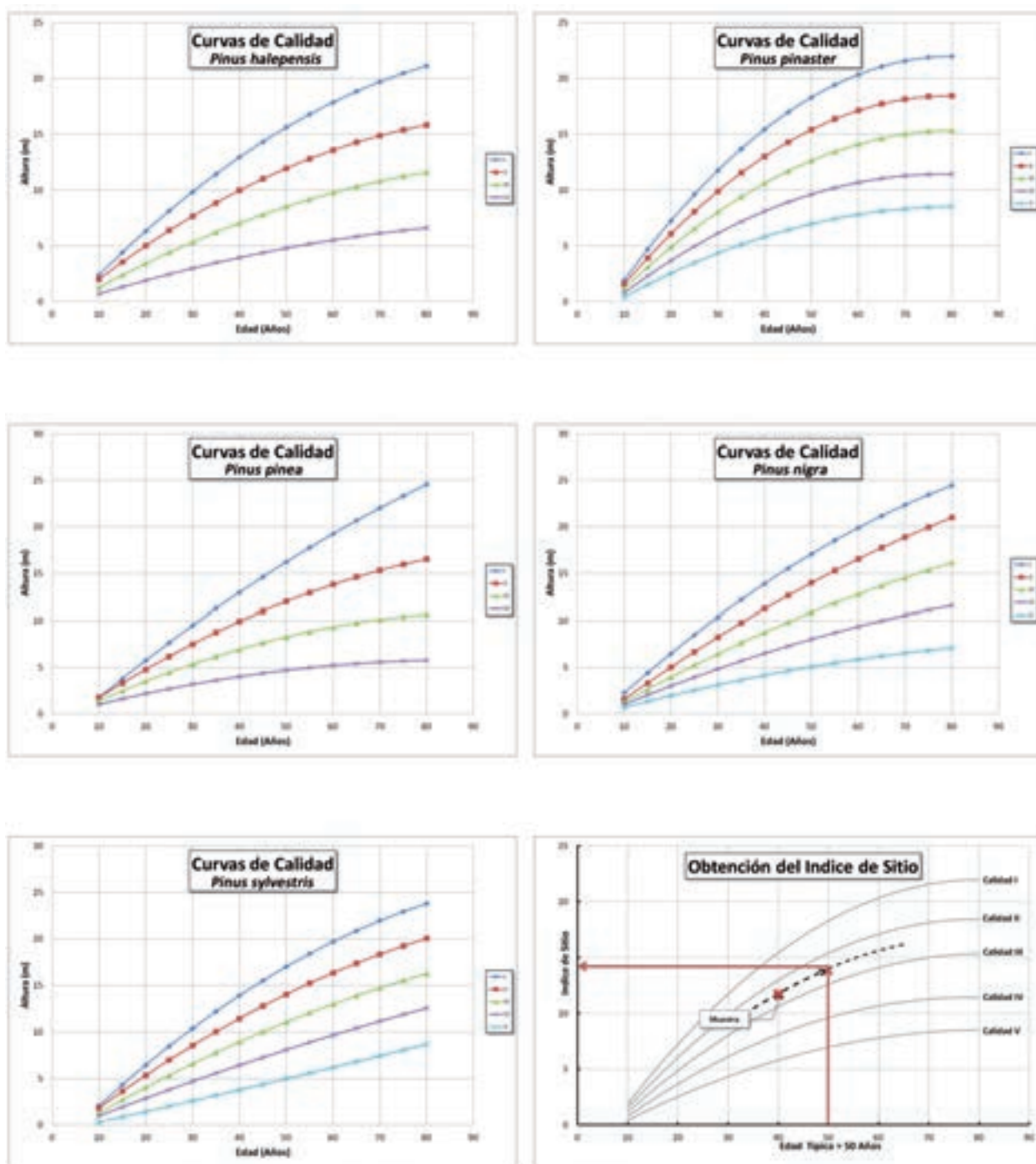


Figura 9.1. Curvas de calidad de las cinco especies de pinos y esquema del proceso de obtención del IS para una muestra hipotética

En la **Tabla 9.2** se muestra un resumen estadístico básico de las muestras utilizadas para inferir los mapas de distribución espacial (con resolución 100 x100 m) de *IS*.

En la **Figura 9.2** se presentan los mapas de la distribución espacial de las muestras utilizadas para la obtención del *IS* para las cinco especies de pino analizadas en este trabajo.

Tabla 9.2. Resumen estadístico de las muestras utilizadas para estimar el Índice de Sitio. (Fuente: IFN 2 y IFN 3)

PARÁMETRO	VALOR MÍNIMO	VALOR MEDIO	VALOR MÁXIMO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
<i>Pinus halepensis</i> (n=431 muestras)				
Altura Total (m)	3,33	8,03	18,60	3,33
Edad (Años)	11,00	32,24	61,00	9,21
Índice de Sitio (Altura Total a 50 años) (m)	5,15	12,00	21,27	3,70
<i>Pinus pinaster</i> (n=432 muestras)				
Altura Total (m)	3,00	7,57	16,77	2,47
Edad (Años)	13,00	32,13	60,00	7,39
Índice de Sitio (Altura Total a 50 años) (m)	5,45	11,49	21,20	3,27
<i>Pinus pinea</i> (n=548 muestras)				
Altura Total (m)	2,50	6,78	16,45	2,57
Edad (Años)	12,00	29,92	65,00	9,10
Índice de Sitio (Altura Total a 50 años) (m)	3,94	11,49	21,45	4,02
<i>Pinus nigra</i> (n=313 muestras)				
Altura Total (m)	3,55	7,73	16,80	2,41
Edad (Años)	15,00	31,87	55,00	6,93
Índice de Sitio (Altura Total a 50 años) (m)	6,22	12,34	20,79	2,99
<i>Pinus sylvestris</i> (n=234 muestras)				
Altura Total (m)	4,00	7,72	14,22	1,99
Edad (Años)	15,00	32,17	60,00	6,64
Índice de Sitio (Altura Total a 50 años) (m)	8,14	12,17	19,72	2,47

El objetivo de la segunda etapa del método fue determinar un valor de índice de sitio para cada pixel del territorio a partir de los calculados anteriormente en cada parcela del IFN y las variables ambientales.

Como variables ambientales explicativas del potencial productivo de los sitios desde el punto de vista forestal se emplearon las 20 CP ya descritas en el epígrafe 6.4. Estas variables caracterizan las condiciones climáticas, edáficas y topográficas de toda la región andaluza con una resolución espacial de 100 m.

Tal como se expuso en el epígrafe 6.4, así como en la matriz de correlación de las variables ambientales del epígrafe 8.3., algunas de las variables ambientales están altamente correlacionadas entre sí, de modo que para evitar problemas de multicolinealidad en la predicción de los *IS*, los análisis de regresión se ejecutaron con las primeras 20 Componentes Principales (CP) de las variables originales, que explican el 98,2 % de la varianza total.

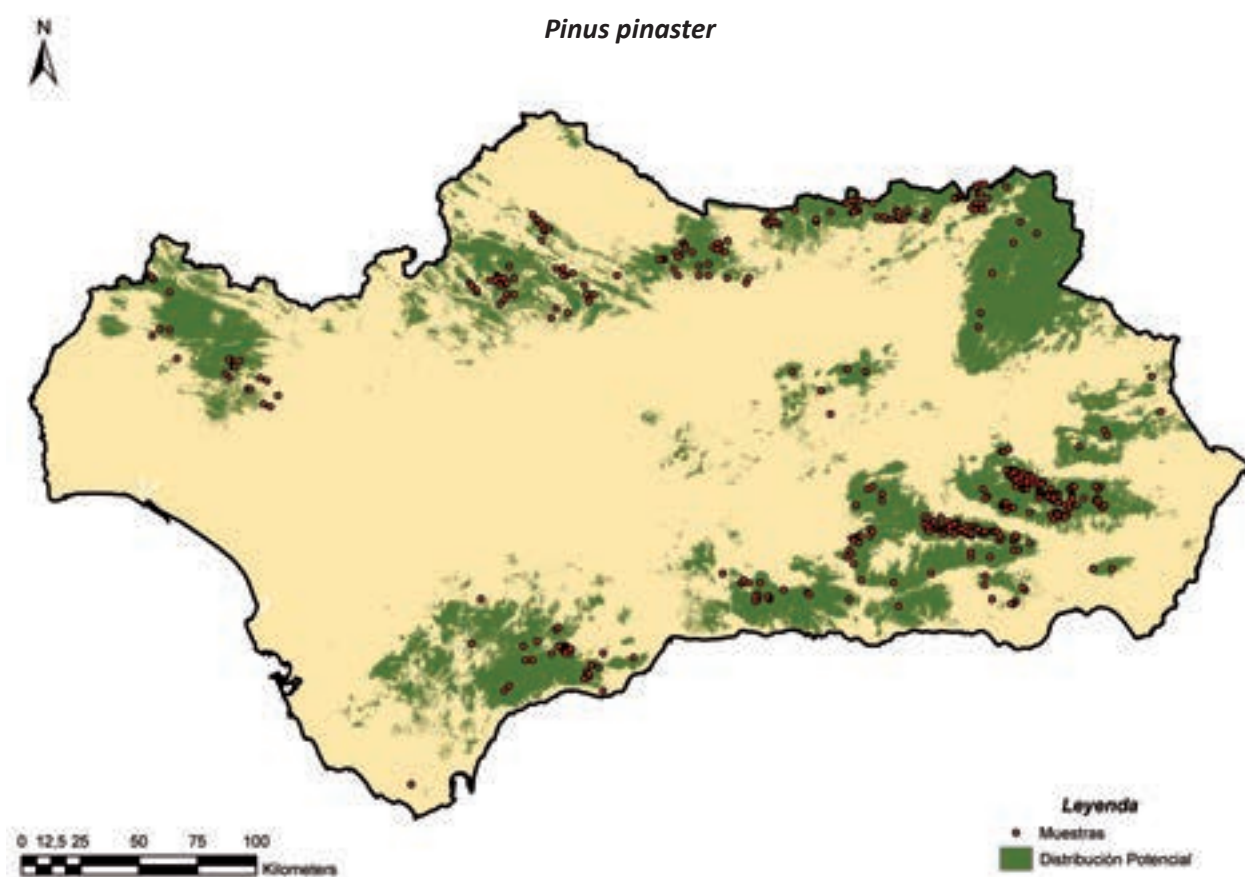
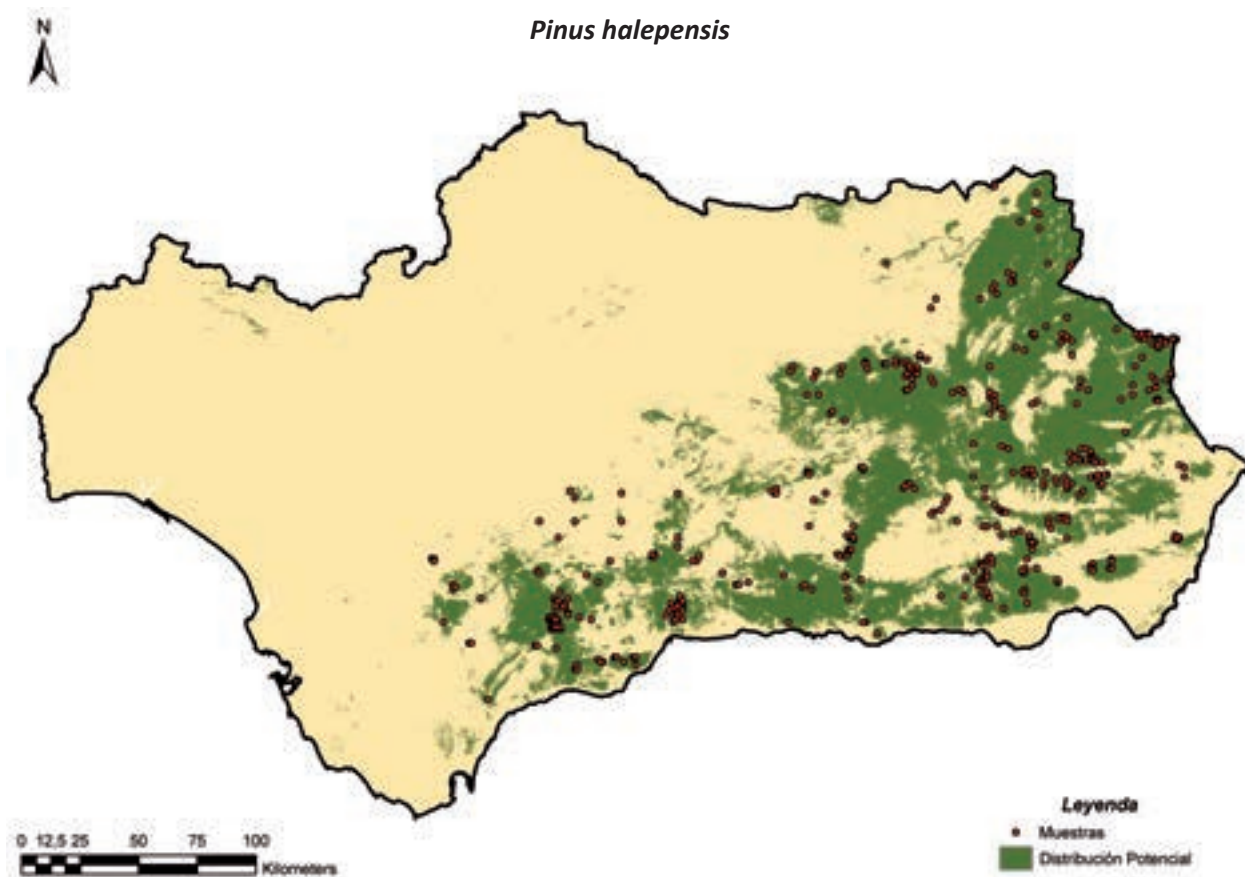
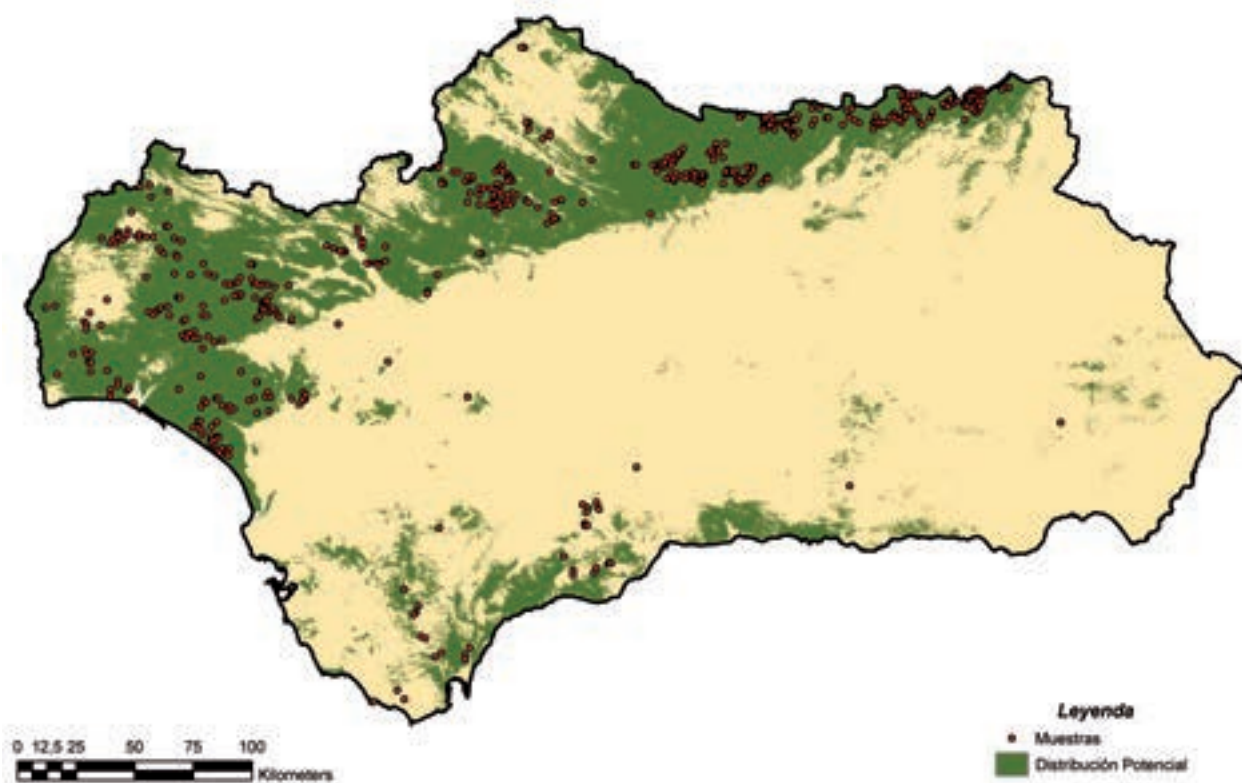


Figura 9.2. Distribución espacial de las muestras utilizadas para inferir los mapas de Índice de Sitio de cada especie de pino. Distribución potencial según método MaxEnt



Pinus pinea



Pinus nigra

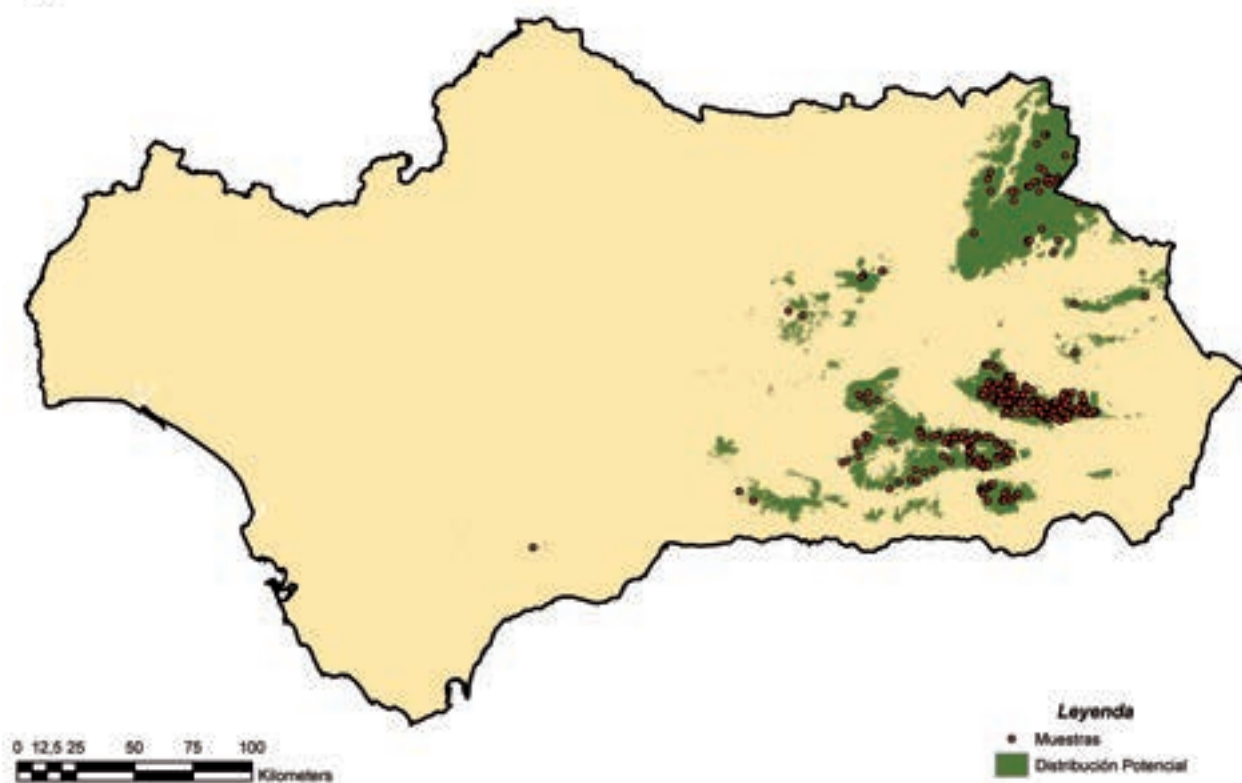


Figura 9.2. Distribución espacial de las muestras utilizadas para inferir los mapas de Índice de Sitio de cada especie de pino. Distribución potencial según método MaxEnt. *Continuación*

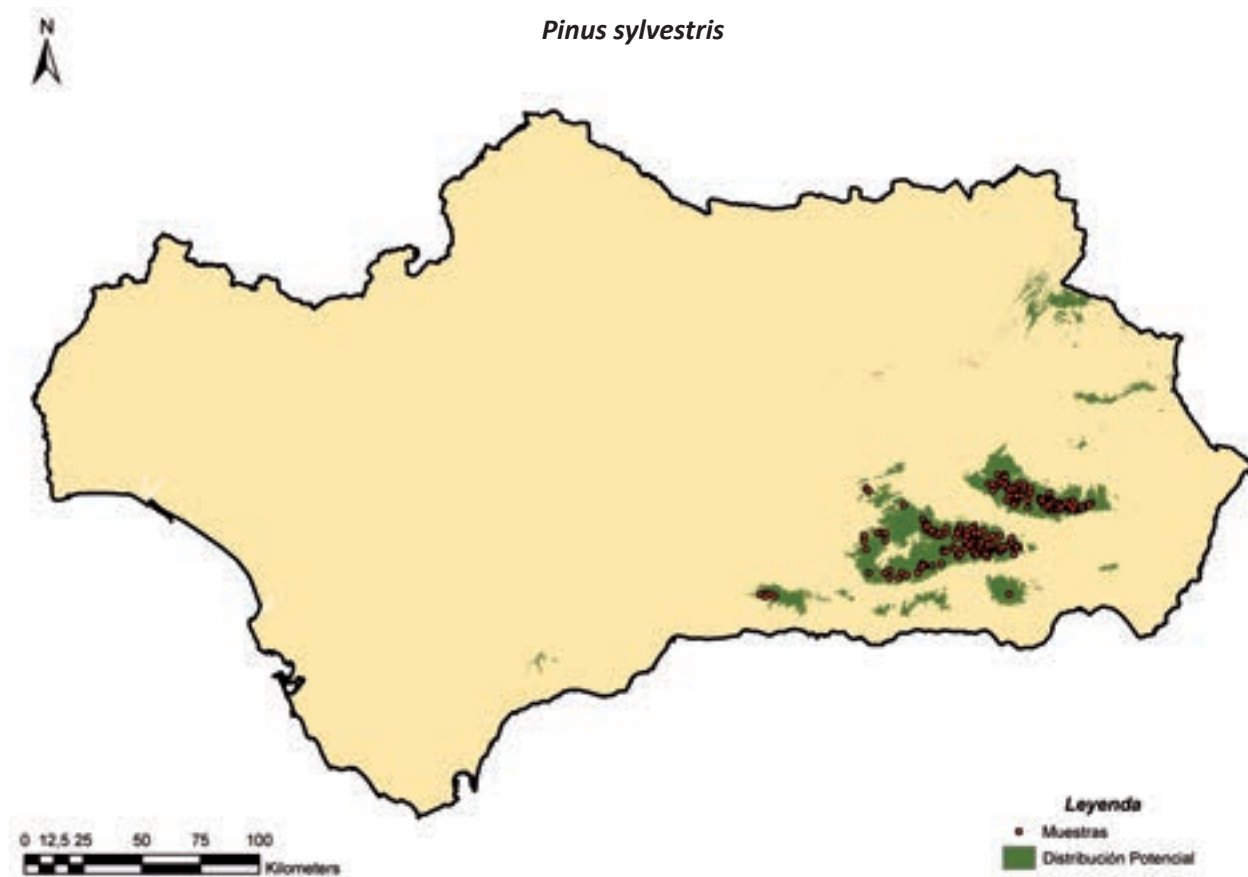


Figura 9.2. Distribución espacial de las muestras utilizadas para inferir los mapas de Índice de Sitio de cada especie de pino. Distribución potencial según método MaxEnt. *Continuación*



La cartografía digital del *IS* de cada especie de pino se obtuvo a través del procedimiento de regresión-kriging que es un procedimiento híbrido de inferencia espacial basado en la combinación del análisis de regresión múltiple con técnicas geoestadísticas de interpolación espacial (kriging ordinario). Las regresiones permiten correlacionar las variables ambientales (en este caso, las componentes principales) con el Índice de Sitio, mientras que los residuos de las regresiones se interpolan espacialmente para mejorar la precisión de las predicciones finales.

Para la implementación de este procedimiento se siguieron las recomendaciones de HENGL (2007) y HENGL *et al.* (2007). Según estos autores, la predicción espacial de una variable regionalizada en una determinada localización puede ser modelizada como la suma de dos componentes: uno determinista y otro estocástica. Ambas componentes de la variación espacial pueden calcularse por separado, de modo que el valor que adquiere una variable (Z) en una posición geográfica (x, y) se define como:

$$Z(x, y) = f(x, y, so) + e(x, y) \quad (9.2)$$

donde $f(x, y, so)$ es la parte determinista (función de predicción espacial), $e(x, y)$ es la parte no explicada por la componente determinista (residuo interpolado) y so es el conjunto de variables ambientales.

En la **Figura 9.3** se muestra el procedimiento de trabajo para generar los mapas de *IS*.

La relación funcional entre la altura media de una masa forestal, su edad y los factores ambientales es compleja. Como se ha expuesto anteriormente, modelizar esta relación con funciones lineales múltiples explica sólo una fracción de la varianza total.

En este trabajo se ha optado por modelizar la evolución temporal de la altura de los árboles mediante funciones de tipo sigmoidal (PIENAAR y TURNBULL, 1973; COBLE y YOUNG-JIN, 2006), que suponen un crecimiento inicial aproximadamente exponencial, pasando por una ralentización gradual de la tasa de crecimiento hasta llegar a la madurez, cuando el crecimiento se ralentiza ostensiblemente.

Se aplicó una transformación logística (HENGL, 2007) a los datos de la alturas de los árboles previamente a la determinación de las funciones de regresión con las *CP* de las variables ambientales, la edad y la posiciones geográfica de las muestras.

La transformación logística de los datos se formuló como sigue:

$$H^{++} = \ln \left(\frac{H^+}{1 - H^+} \right); 0 < H^+ < 1 \quad (9.3)$$

H^+ es la altura del árbol normalizada en el rango 0 y 1:

$$H^+ = \frac{H - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \quad (9.4)$$

H la altura de los árboles muestreados, mientras que $H_{\min}$ y $H_{\max}$ son los límites físicos de la altura de los árboles según la especie analizada.

La transformación logística anterior permite convertir los valores iniciales acotados por dos límites físicos ($H_{\min}$ y $H_{\max}$) al rango $(-\infty, +\infty)$ y usualmente mejora la normalidad de la variable. Los límites asumidos para transformar las alturas totales de los árboles de cada especie se muestran en la **Tabla 9.3**.

Tabla 9.3. Límites físicos asumidos en la transformación logística de la altura de los árboles

ESPECIE	$H_{\min}$ (m)	$H_{\max}$ (m) *
<i>Pinus halepensis</i>	0	35
<i>Pinus nigra</i>	0	40
<i>Pinus pinaster</i>	0	30
<i>Pinus pinea</i>	0	30
<i>Pinus sylvestris</i>	0	30

(*) CMA. 2004

Se continuó el procedimiento de cálculo desarrollando las funciones de predicción espacial del *IS*. Además de las *CP* de las variables ambientales se utilizaron las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y la edad de las parcelas como variables independientes. El procedimiento utilizado para realizar los análisis de regresión se basó en el algoritmo de selección por pasos hacia atrás (*stepwise backward selection*) para ajustar los modelos lineales múltiples y eliminar, al mismo tiempo, las variables independientes irrelevantes en las ecuaciones finales.

La parte de la varianza no explicada por los modelos de regresión, es decir, los residuos de las regresiones, se obtuvieron como la diferencia entre los valores de *IS* procedentes de las parcelas que se han utilizado como muestras (tras la transformación logística) y los estimados para esos mismos puntos por las funciones de predicción espacial (asignando un valor de 50 años a la variable *EDAD*, H_{50}^{++}).

La interpolación espacial de los residuos se realizó con el software VESPER (MINASNY *et al.*, 2005), mediante el procedimiento de *block kriging* ordinario (con tamaño de bloque igual a 100 m) y con variogramas omnidireccionales ajustados a un modelo exponencial.

Finalmente, la cartografía digital del *Índice de Sitio* para cada especie se obtuvo como la suma del mapa derivado con la función de predicción espacial correspondiente (evaluada para una edad de 50 años) y el mapa de los residuos interpolados. Los mapas así generados se transformaron a la escala original por medio de la siguiente ecuación:

$$IS = \frac{e^{H_{50}^{++}}}{1 + e^{H_{50}^{++}}} \cdot (H_{\max} - H_{\min}) + H_{\min} \quad (9.5)$$

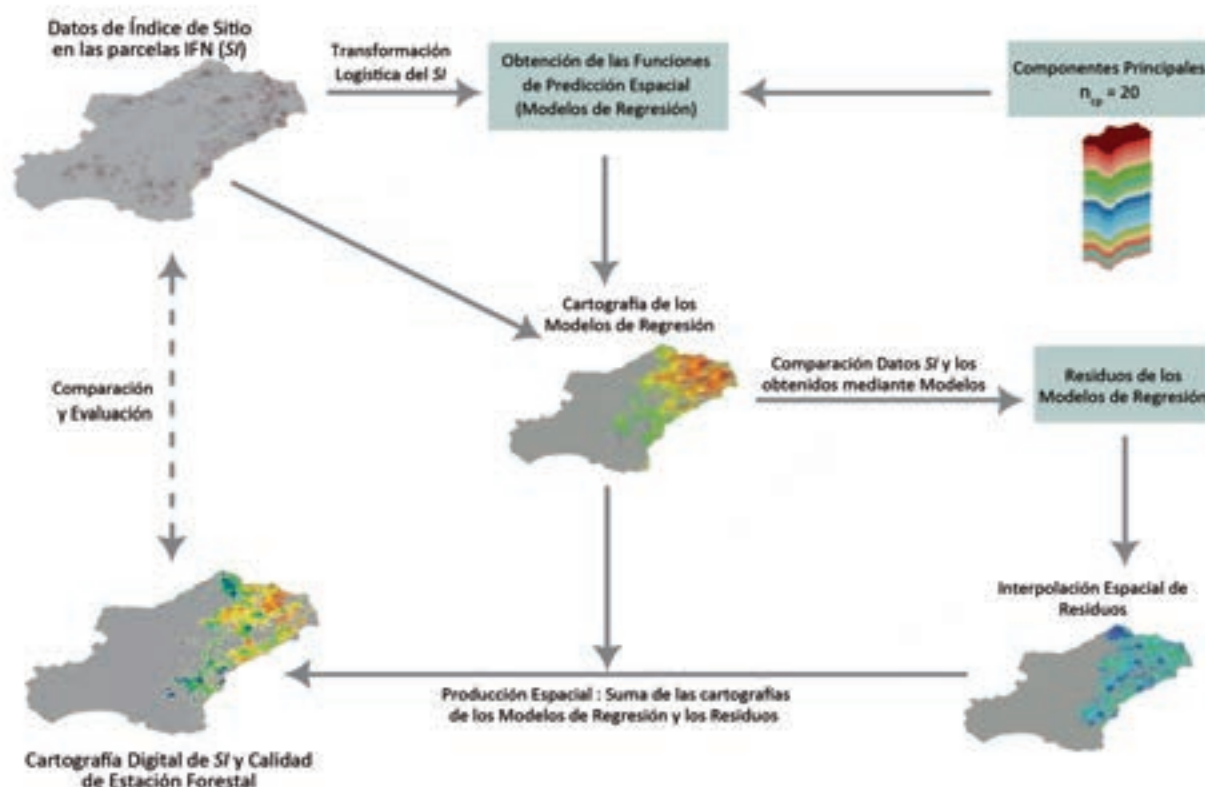


Figura 9.3. Obtención de la cartografía digital del Índice de Sitio con el procedimiento de regresión-kriging

9.3. Resultados y discusión

En la **Tabla 9.4** se incluyen las funciones de predicción espacial obtenidas para estimar el *IS* en casa pixel del territorio de cada especie de pino analizada, así como los coeficientes R^2 y los errores estándar de estimación.

Los modelos obtenidos explican entre el 48 y el 57% de la varianza del *IS*, lo que se considera un resultado razonablemente bueno, sobre todo si se tiene en cuenta que la parte no explicada por estos modelos se corrigió con técnicas geoestadísticas de interpolación espacial. Todos los modelos fueron estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 99%.

Tabla 9.4. Funciones de predicción espacial del Índice de Sitio

ESPECIE	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN ESPACIAL	ERROR ESTÁNDAR	R ²
<i>Pinus halepensis</i>	$H^{**} = -25,634 + 0,616 * LAT - 0,183 * LON + 0,026 * EDAD + 0,028 * CP1 + 0,059 * CP11 - 0,054 * CP12 + 0,075 * CP13 + 0,074 * CP14 - 0,113 * CP17 - 0,142 * CP19 + 0,129 * CP2 - 0,185 * CP20 - 0,074 * CP7$	0,345	0,568
<i>Pinus pinaster</i>	$H^{**} = -8,058 + 0,170 * LAT + 0,026 * EDAD - 0,027 * CP1 + 0,048 * CP11 + 0,073 * CP13 + 0,123 * CP17 - 0,075 * CP18 + 0,060 * CP2 - 0,074 * CP4 - 0,077 * CP7$	0,315	0,486
<i>Pinus pinea</i>	$H^{**} = -4,710 + 0,026 * EDAD + 0,054 * CP1 + 0,053 * CP11 - 0,143 * CP12 - 0,087 * CP13 + 0,135 * CP2 + 0,196 * CP20 + 0,095 * CP3 - 0,063 * CP4 + 0,064 * CP7 + 0,064 * CP9$	0,339	0,527
<i>Pinus nigra</i>	$H^{**} = -16,169 + 0,387 * LAT + 0,024 * EDAD + 0,093 * CP13 - 0,089 * CP14 - 0,137 * CP15 - 0,089 * CP16 - 0,073 * CP18 + 0,093 * CP2 + 0,124 * CP5 - 0,108 * CP7$	0,256	0,551
<i>Pinus sylvestris</i>	$H^{**} = -1,687 + 0,029 * EDAD - 0,035 * CP1 - 0,215 * CP14 - 0,091 * CP16 + 0,177 * CP19 - 0,101 * CP3 + 0,098 * CP4 + 0,103 * CP5 - 0,028 * CP6 + 0,032 * CP8$	0,234	0,551

** $p < 0,01$, todas las relaciones fueron estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 99%

La **Tabla 9.5** contiene los parámetros de los variogramas utilizados para interpolar los residuos de los modelos de regresión.

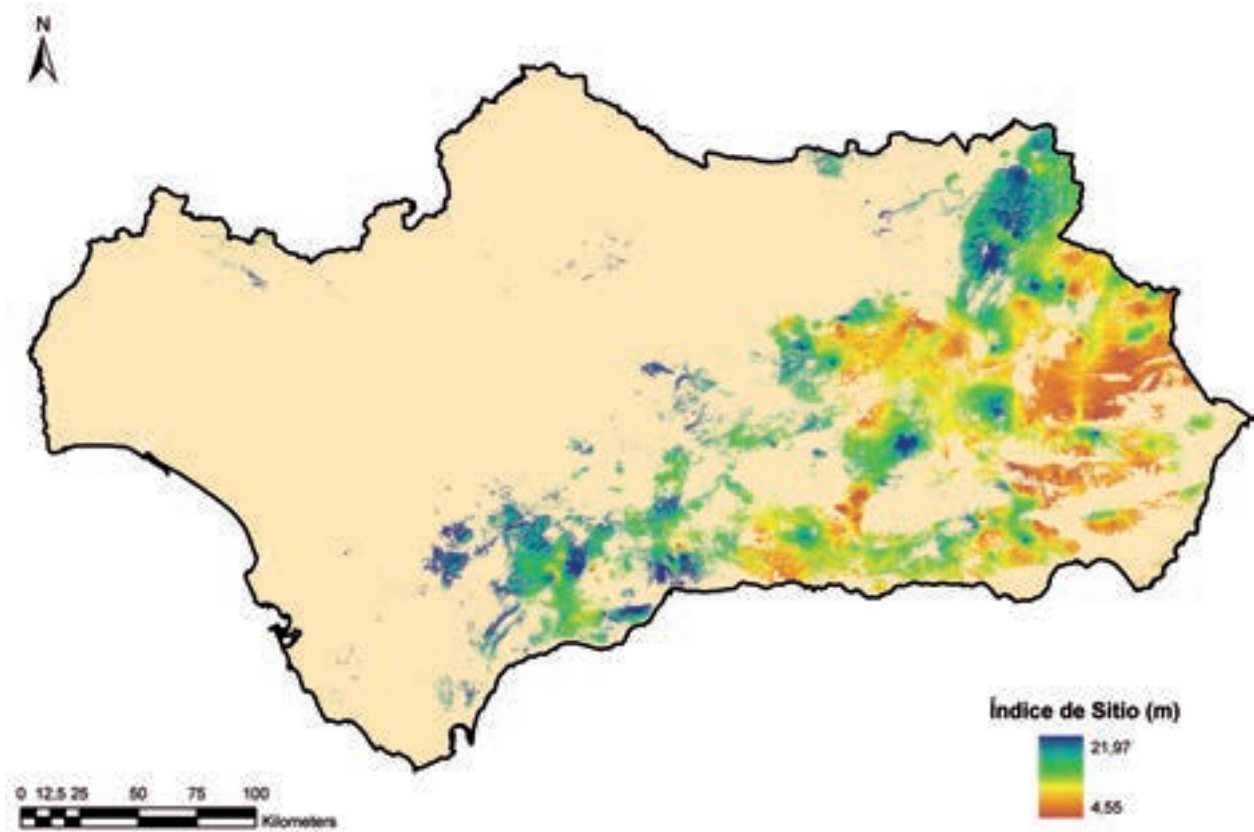
Tabla 9.5. Parámetros de los variogramas utilizados para interpolar los residuos de las funciones de predicción espacial del *IS*

ESPECIE	MODELO DE VARIOGRAMA	C ₀	C ₁	A ₁
<i>Pinus halepensis</i>	Exponencial	0,000	0,165	8268,8
<i>Pinus pinaster</i>	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{h}{A_1} \right)} \right)$	0,000	0,167	10644,0
<i>Pinus pinea</i>		0,000	0,249	9543,0
<i>Pinus nigra</i>		0,000	0,106	12453,0
<i>Pinus sylvestris</i>		0,000	0,099	6410,7

En la **Figura 9.4** se muestran los mapas temáticos con los valores de *IS* obtenidos a partir de este método y espacializados para toda la región (resolución 100 x 100 m) en el ámbito de la distribución potencial (según metodología MaxEnt) de cada una de las especies de pino estudiadas.

Los resultados del *IS* se clasificaron en clases discretas de calidad de estación forestal (4 ó 5 según la especie) según las familias de curvas de calidad definidas por PITA-CARPENTER (1964, 1965 y 1966) y GANDULLO y SANCHEZ-PALOMARES (1994), presentándose igualmente los mapas de calidad de estación forestal según esta clasificación.

Pinus halepensis



Pinus halepensis

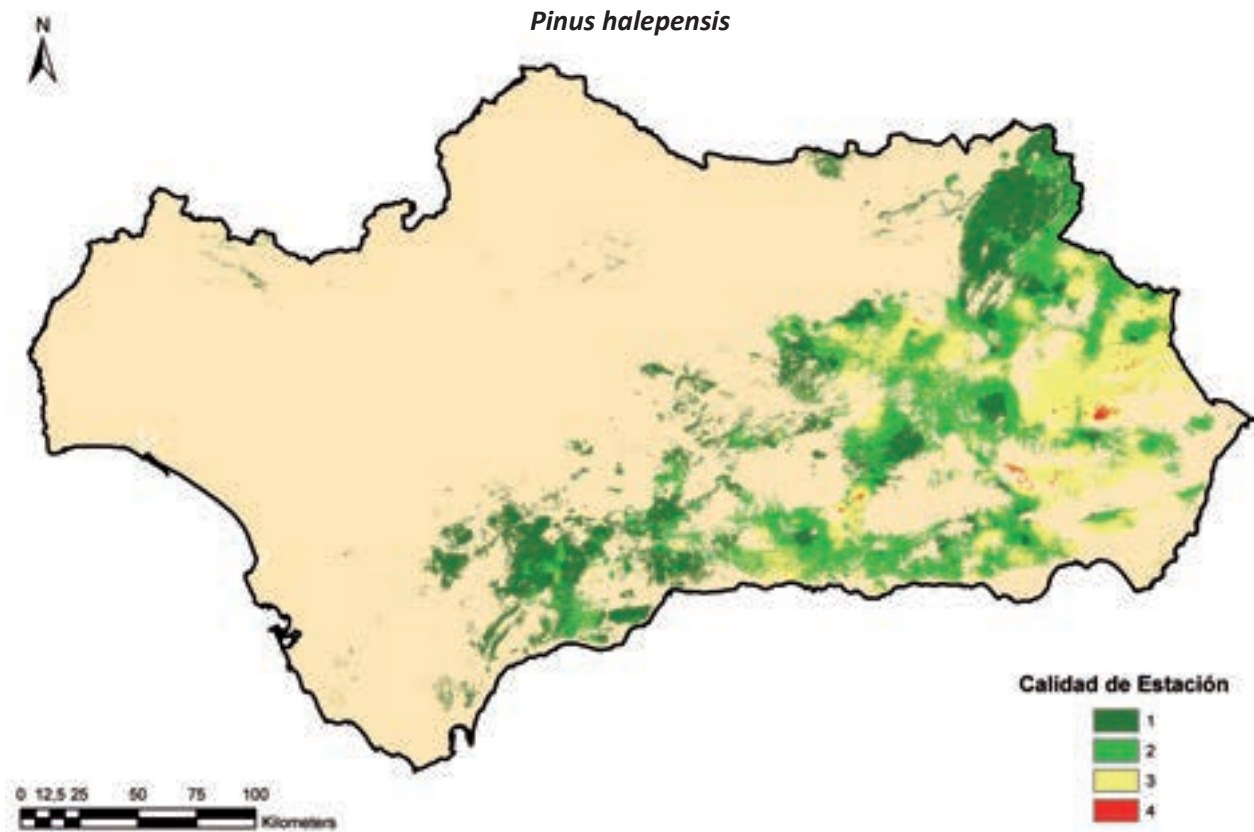
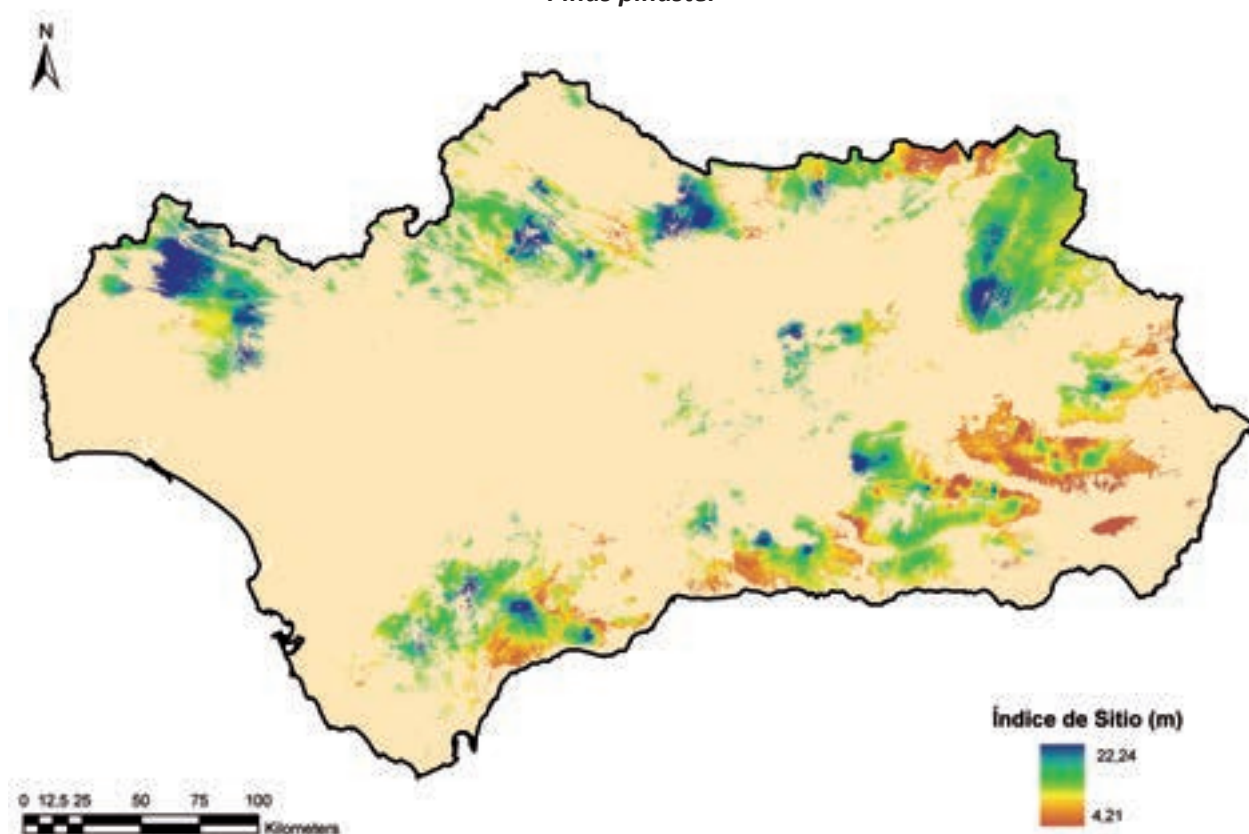


Figura 9.4. Mapas temáticos del Índice de Sitio (arriba) y Calidad de Estación Forestal (abajo) obtenidos para las zonas de distribución potencial de las especies de pino analizadas

Pinus pinaster



Pinus pinaster

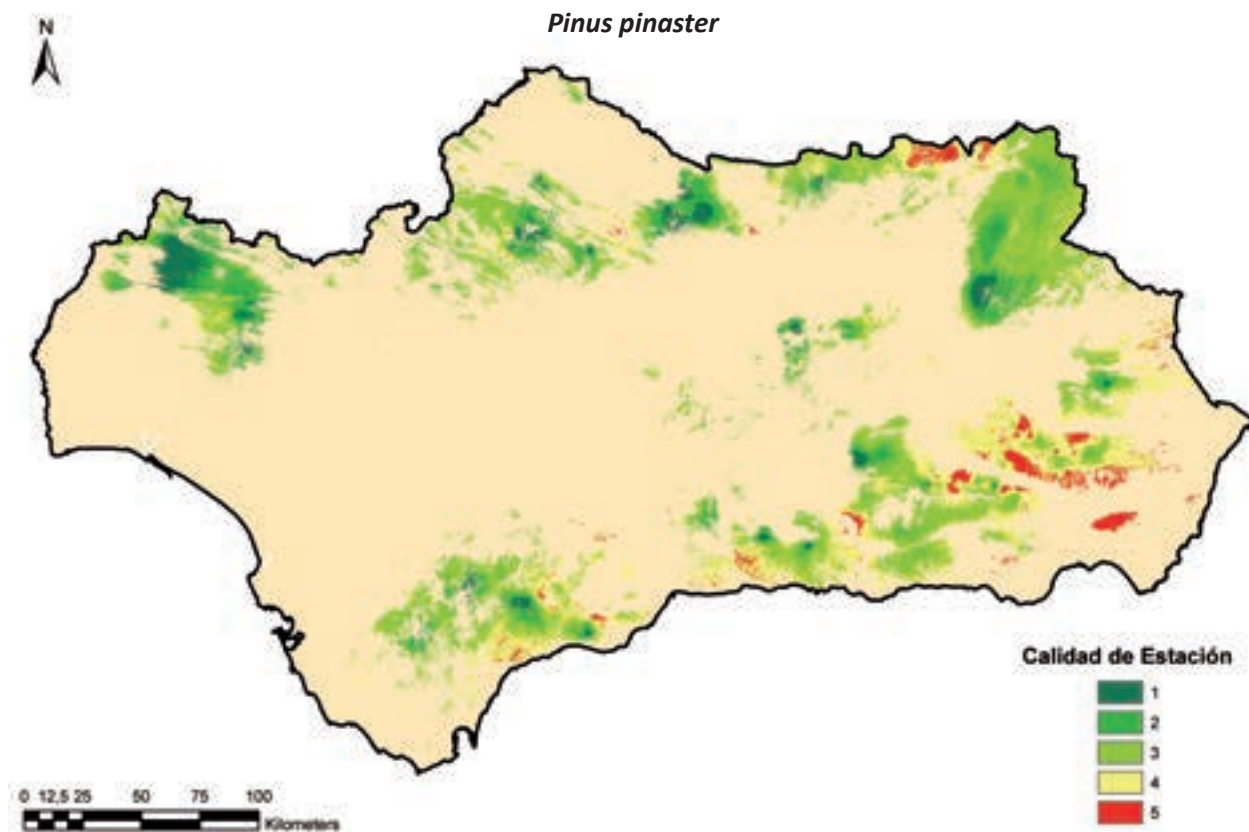
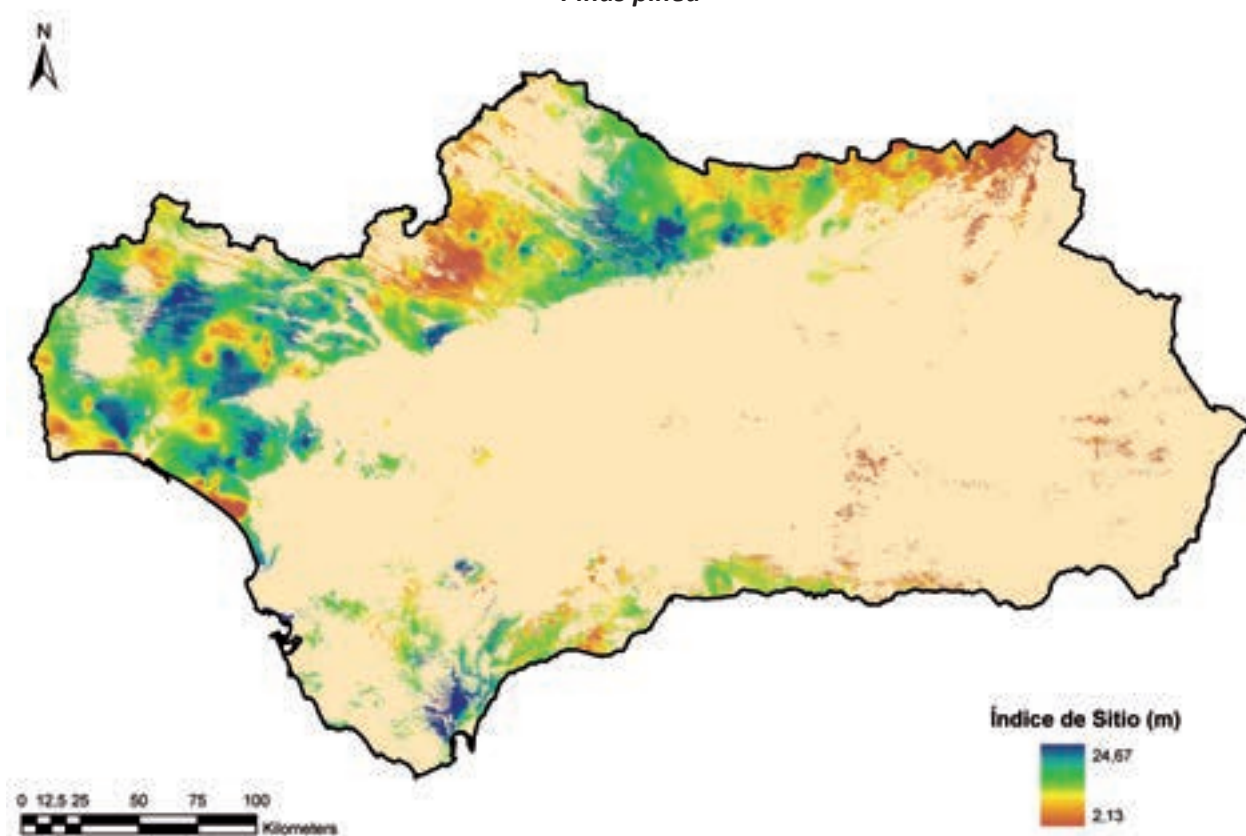


Figura 9.4. Mapas temáticos del Índice de Sitio (arriba) y Calidad de Estación Forestal (abajo) obtenidos para las zonas de distribución potencial de las especies de pino analizadas. *Continuación*

Pinus pinea



Pinus pinea

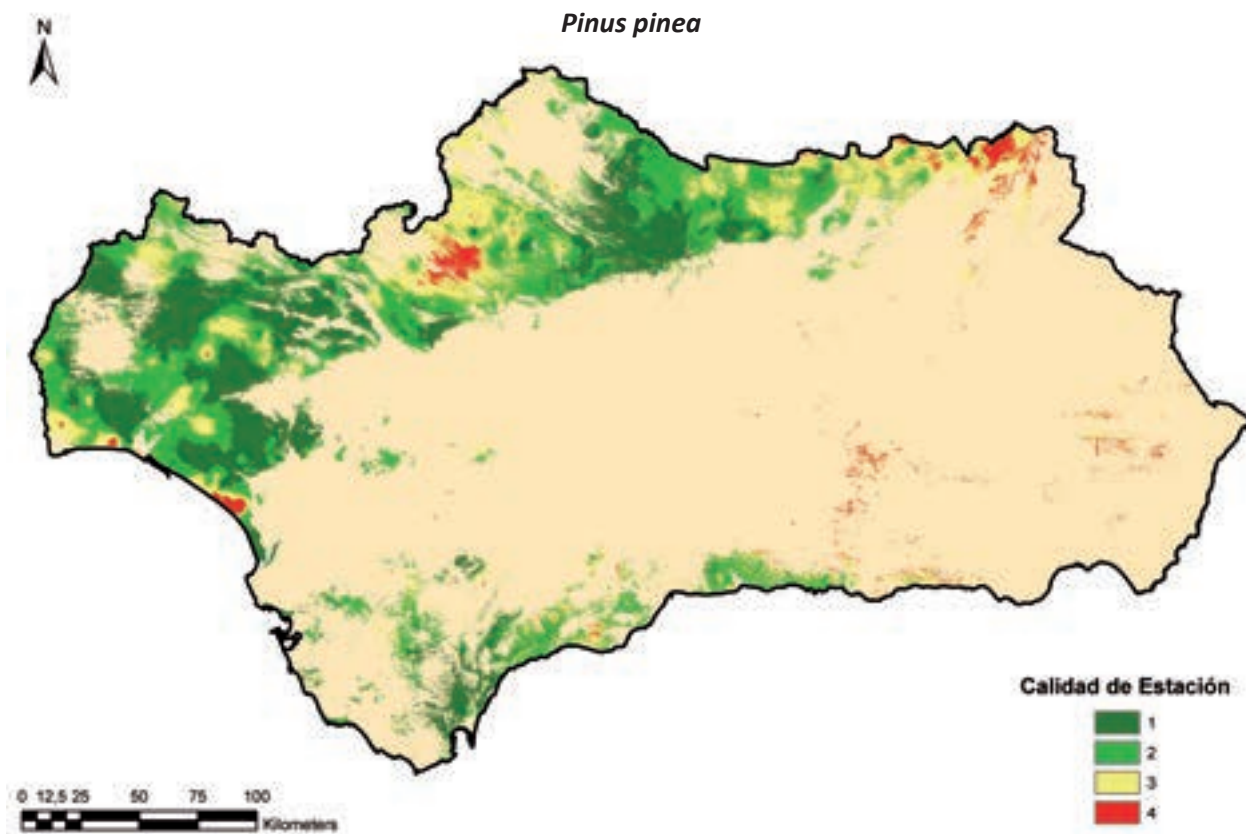
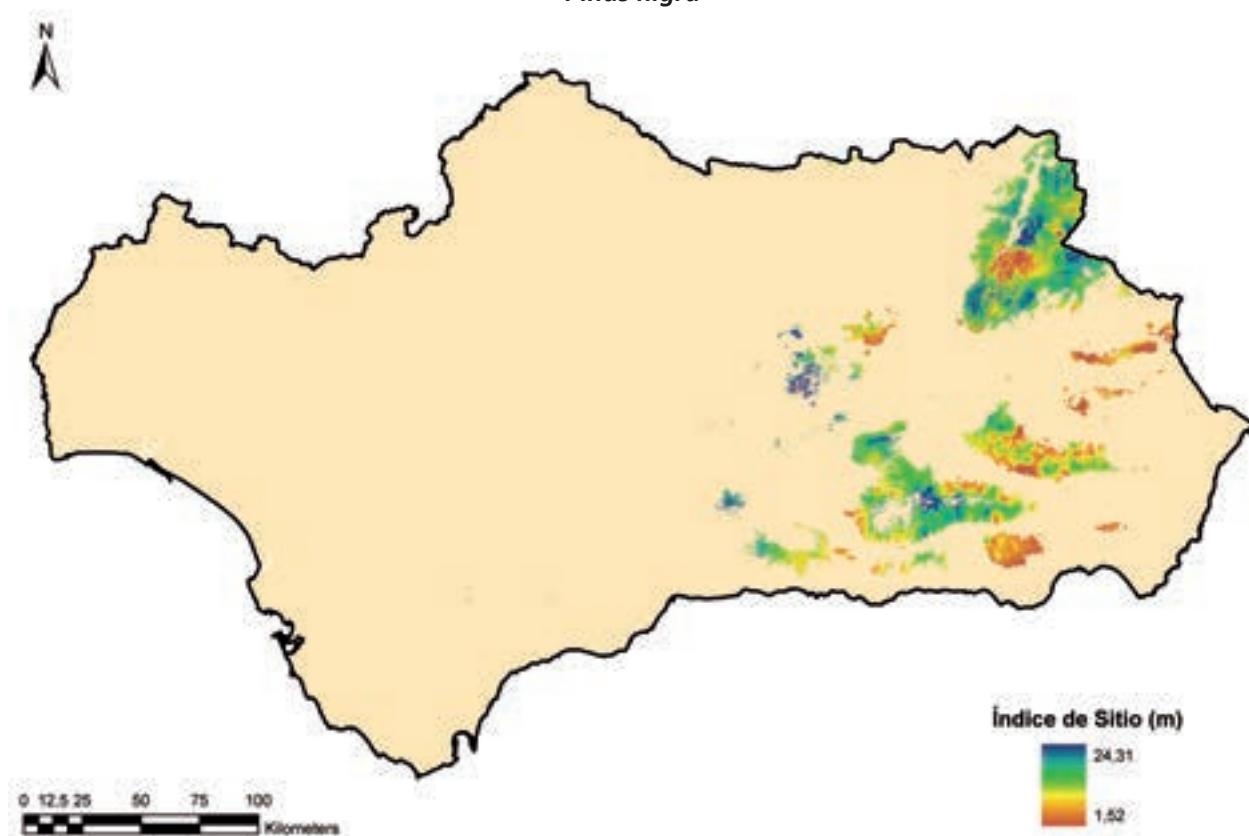


Figura 9.4. Mapas temáticos del Índice de Sitio (arriba) y Calidad de Estación Forestal (abajo) obtenidos para las zonas de distribución potencial de las especies de pino analizadas. *Continuación*

Pinus nigra



Pinus nigra

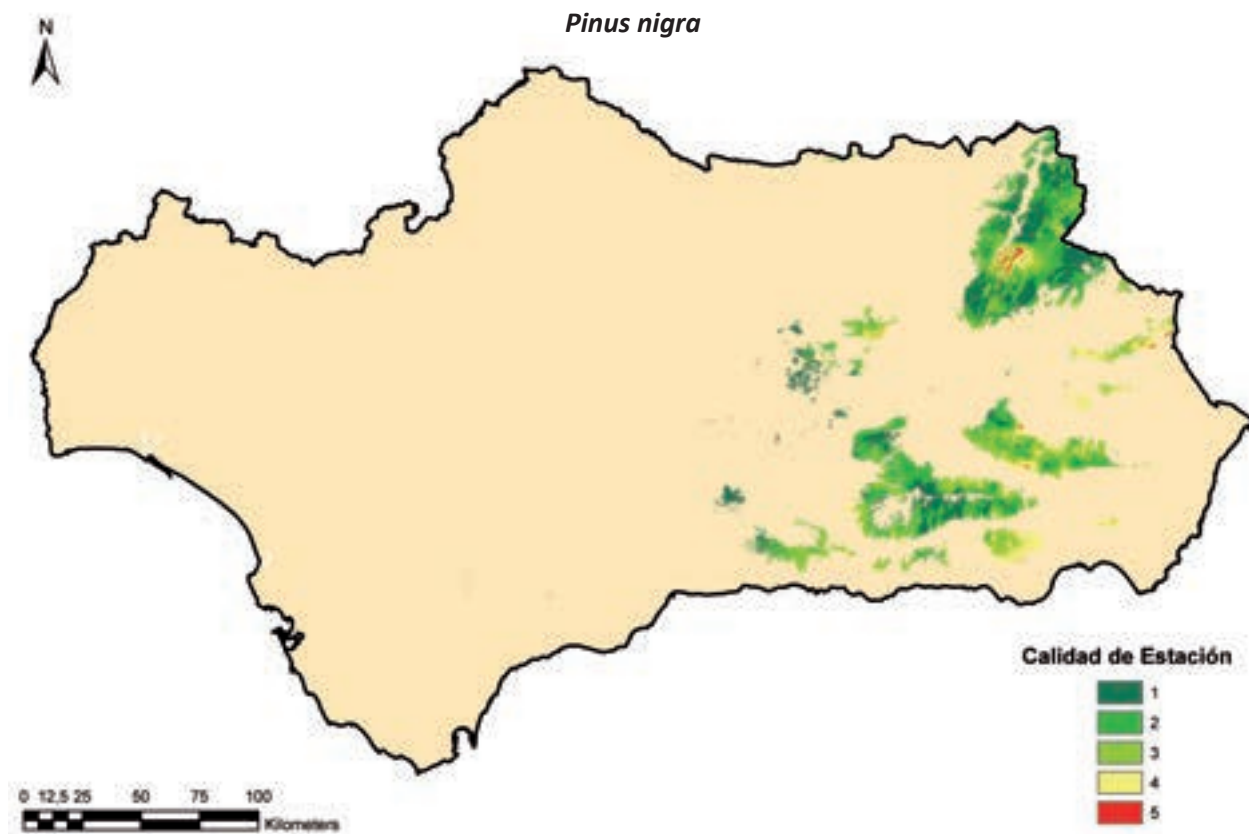
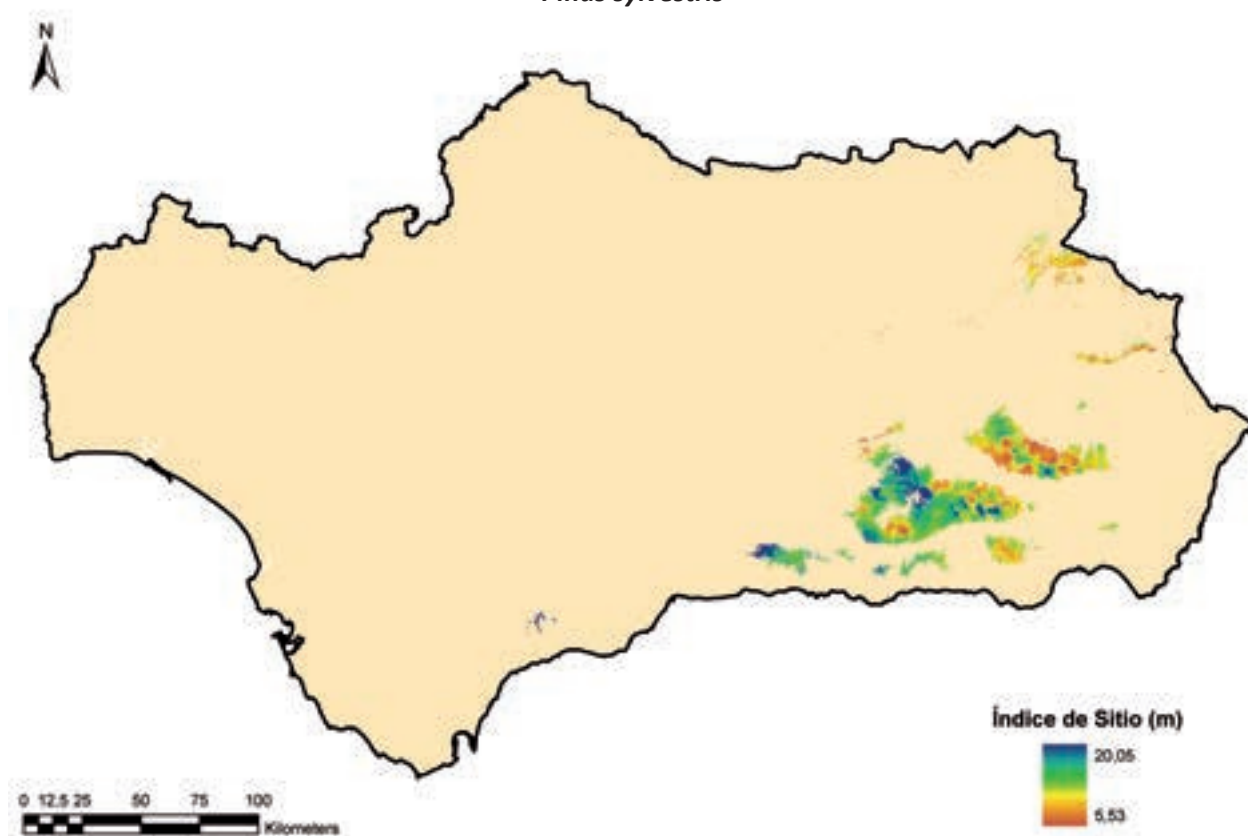


Figura 9.4. Mapas temáticos del Índice de Sitio (arriba) y Calidad de Estación Forestal (abajo) obtenidos para las zonas de distribución potencial de las especies de pino analizadas. *Continuación*

Pinus sylvestris



Pinus sylvestris

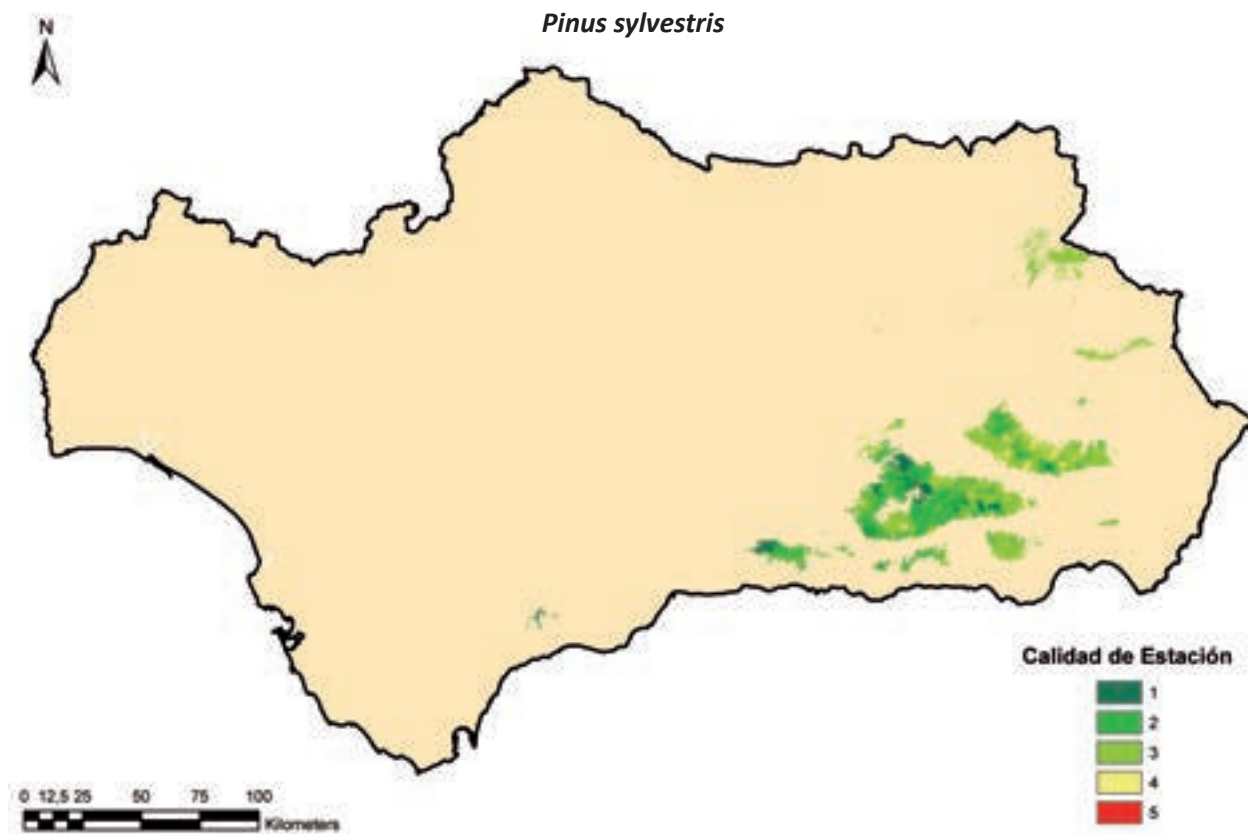


Figura 9.4. Mapas temáticos del Índice de Sitio (arriba) y Calidad de Estación Forestal (abajo) obtenidos para las zonas de distribución potencial de las especies de pino analizadas. *Continuación*

La comparación de los mapas de calidad de estación forestal con los valores puntuales originalmente obtenidos en las parcelas de muestreo permitió una evaluación de la precisión del procedimiento. También se elaboró la matriz de confusión del algoritmo de clasificación (**Tabla 9.6**). Ambos índices reflejan el grado de concordancia entre ambas fuentes, y, por tanto, la bondad del procedimiento de inferencia espacial utilizado en este trabajo.

La precisión de la clasificación representa el porcentaje total de las muestras que se clasificaron correctamente, mientras que la matriz de confusión refleja en su diagonal la precisión que se alcanzó en la clasificación de cada clase individual. El resto de las celdas de la matriz representan los porcentajes de error cometidos. Evidentemente, la situación ideal en una clasificación es obtener una matriz de confusión con una diagonal cercana a 100%.

Puede apreciarse en la matriz que todos los mapas de calidad de estación forestal obtenidos alcanzaron un índice de precisión muy elevado, validando la robustez del algoritmo de inferencia espacial utilizado. Sin embargo, pese a los buenos resultados obtenidos, debe considerarse que los modelos desarrollados no son más que simplificaciones de una realidad mucho más compleja y, por tanto, no están exentos de errores.

GANDULLO y SANCHEZ-PALOMARES (1994) resumieron las principales simplificaciones que usualmente se introducen en el desarrollo de modelos de pronóstico de la calidad de estación forestal, y que son indudables fuentes de errores, destacando las siguientes:

- Se considera que cada uno de los taxones utilizados forman una unidad genética perfectamente definida e inmutable, ignorándose el efecto de los programas de mejora forestal, la instalación de huertos semilleros, la propagación vegetativa, etc.
- Se ignora el efecto de los tratamientos selvícolas sobre la calidad de la masa.
- Se ignora que la calidad de la masa arbórea está influenciada por el conjunto de seres vivos que definen la comunidad en que se asienta.
- No se dispone de información sobre todos los elementos abióticos que influyen en la productividad de los sitios.
- Finalmente, los datos obtenidos de las parcelas de muestreo contienen errores, como asimismo no están carentes de errores los datos utilizados para caracterizar el entorno ni los procedimientos empleados para generar los mapas temáticos.

En conclusión, los resultados obtenidos para el *IS* y los mapas temáticos generados en este trabajo constituyen una herramienta orientativa sobre la calidad de las estaciones forestales a escala de semidetalle en Andalucía (100 x 100 m), pero cuyos resultados han de usarse con precaución.

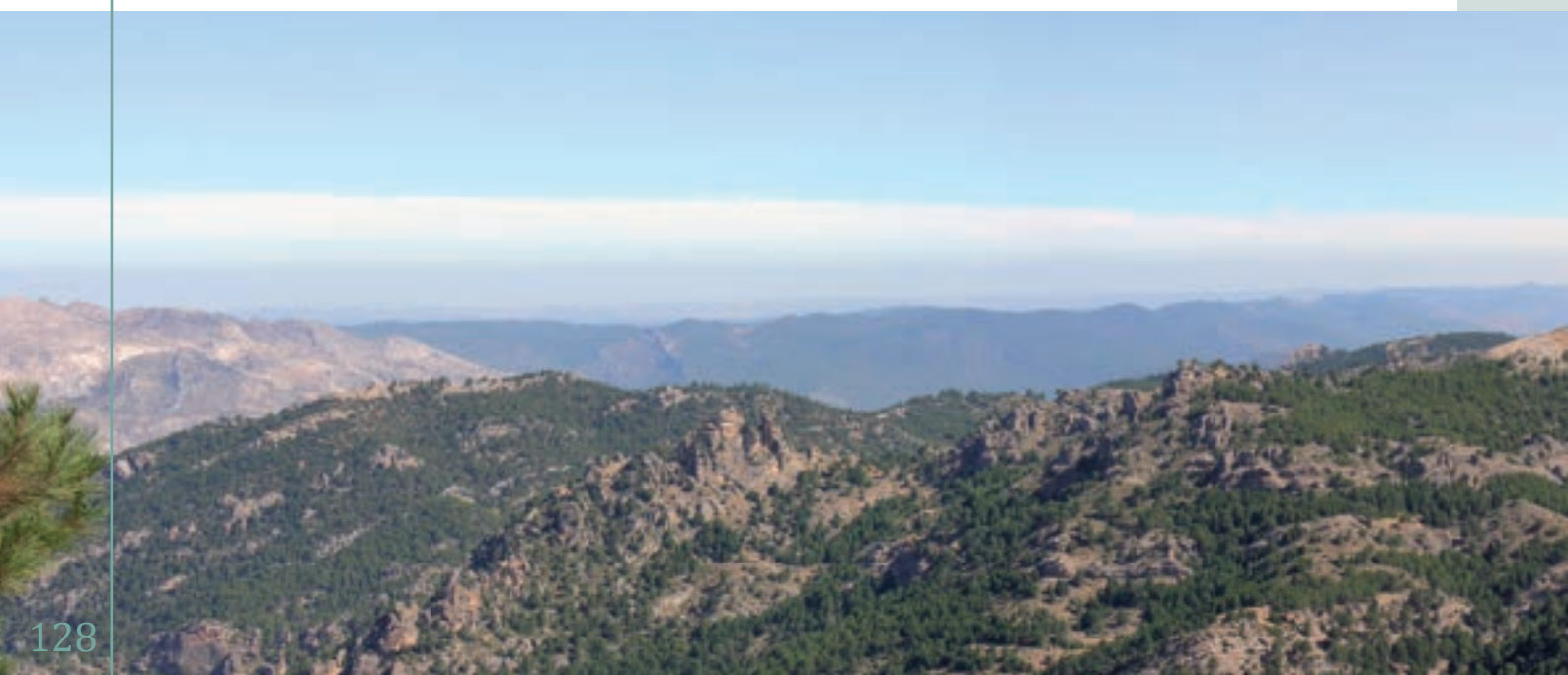
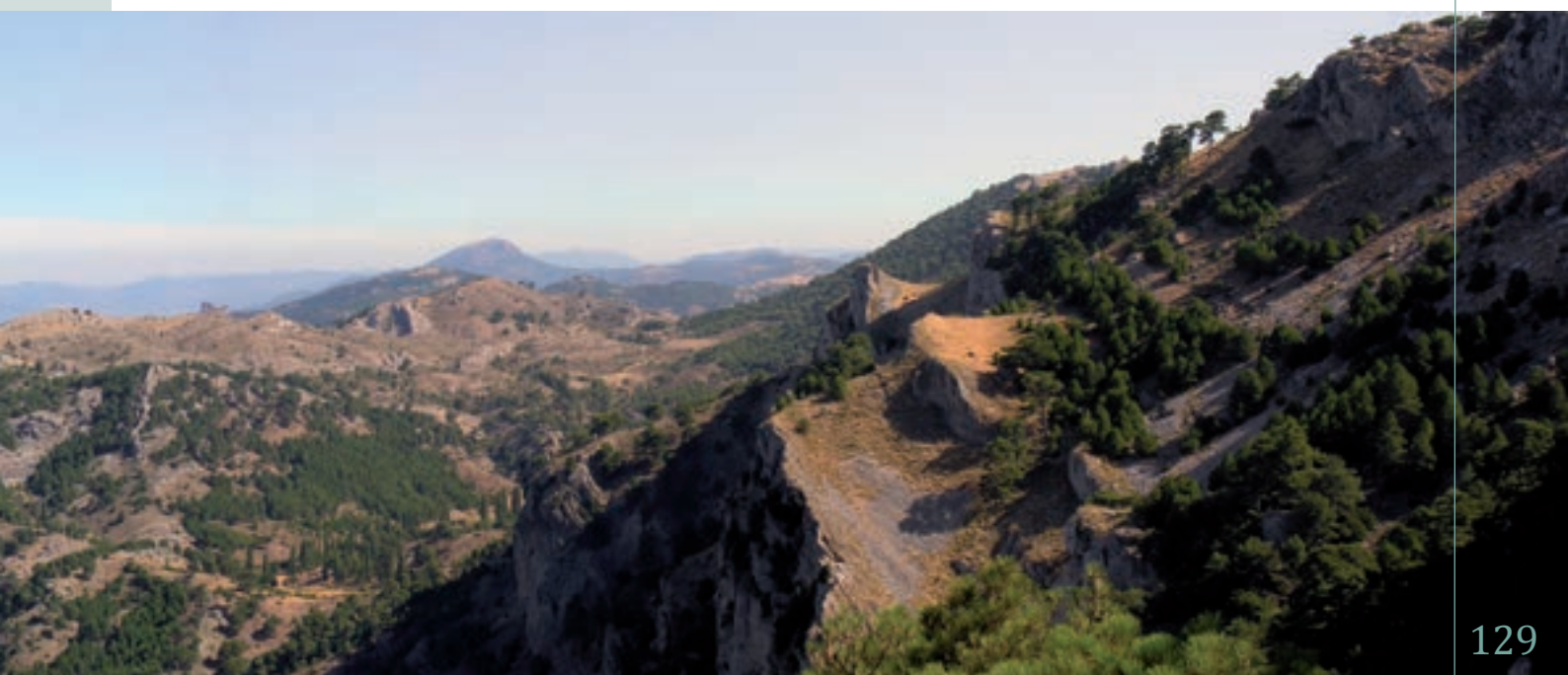


Tabla 9.6. Matriz de confusión y precisión alcanzada en la clasificación de la calidad de estación forestal

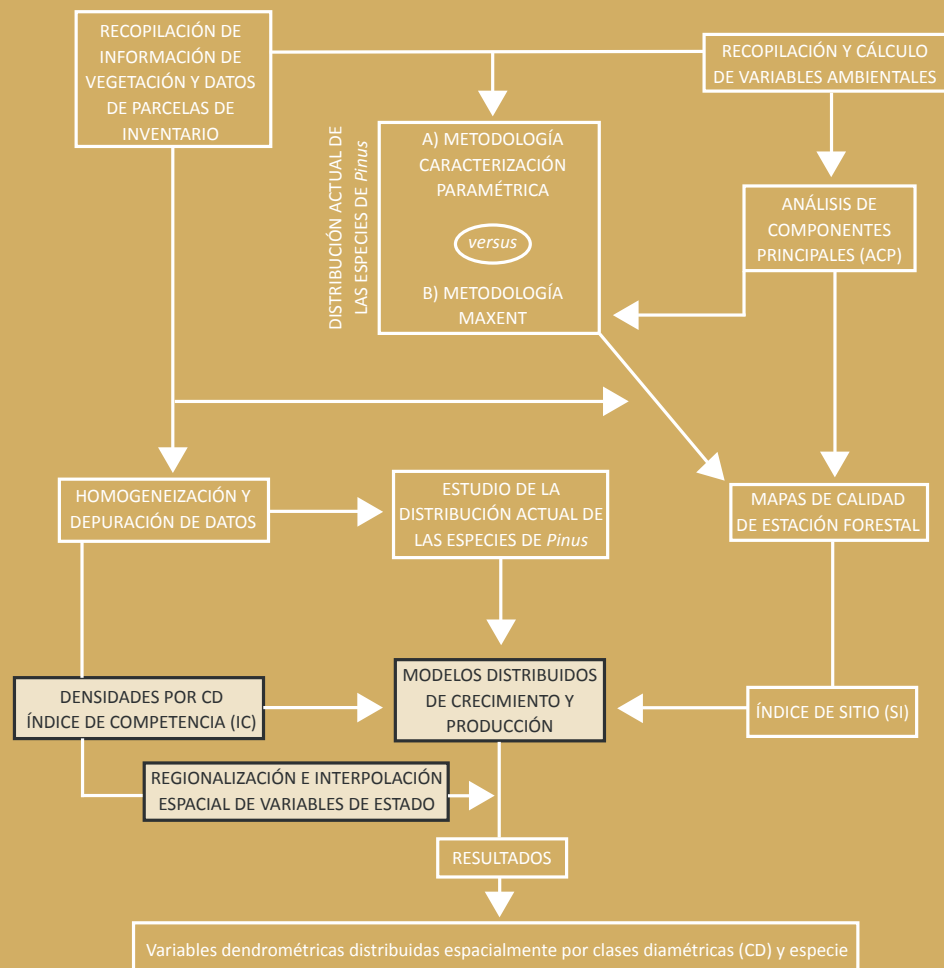
Pinus halepensis: PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN: 97,79%					
Calidad de Estación	I	II	III	IV	
I	98,23	0,90	0,00	0,00	
II	1,77	99,10	1,61	0,00	
III	0,00	0,00	98,39	20,00	
IV	0,00	0,00	0,00	80,00	
Pinus pinaster: PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN: 95,96%					
Calidad de Estación	I	II	III	IV	V
I	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
II	0,00	92,11	0,92	0,00	0,00
III	0,00	7,89	95,41	2,33	0,00
IV	0,00	0,00	3,67	97,67	6,35
V	0,00	0,00	0,00	0,00	93,65
Pinus Pinea: PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN: 98,05%					
Calidad de Estación	I	II	III	IV	
I	96,58	1,39	0,00	0,00	
II	3,42	98,61	1,14	0,00	
III	0,00	0,00	98,86	2,17	
IV	0,00	0,00	0,00	97,83	
Pinus nigra: PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN: 95,70%					
Calidad de Estación	I	II	III	IV	
I	95,74	0,00	0,00	0,00	
II	4,26	95,88	1,85	0,00	
III	0,00	4,12	96,30	6,00	
IV	0,00	0,00	1,85	94,00	
Pinus sylvestris: PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN: 95,28%					
Calidad de Estación	I	II	III	IV	
I	96,43	0,00	0,00	0,00	
II	3,57	96,92	4,72	0,00	
III	0,00	3,08	95,28	8,82	
IV	0,00	0,00	0,00	91,18	





10

Modelo distribuido de crecimiento y producción de las masas de pinos en Andalucía. Enfoque espacio-temporal



10.1. Introducción y Antecedentes

Un modelo es una representación parcial y simplificada de algún aspecto de la realidad. Mediante una abstracción se reproducen algunas propiedades del objeto o sistema original a través de un objeto o sistema de menor complejidad.

Desde sus inicios, la actividad forestal ha tenido entre sus finalidades principales obtener funciones predictivas que permitan facilitar la toma de decisiones sobre sistemas caracterizados por una evolución temporal que se dilata durante un largo periodo en comparación con otras actuaciones humanas. La ciencia forestal ha dado respuesta a este fin desarrollando métodos para la consecución de los objetivos planteados para los sistemas forestales.

En los sistemas forestales mediterráneos andaluces, como en otros muchos ámbitos, los criterios de gestión se encuadran en la actualidad en el paradigma de la gestión forestal sostenible (aquella que es ambientalmente responsable, socialmente beneficiosa y económica viable), concepto que renueva y amplía los objetivos clásicos de la práctica forestal encaminados a la obtención de rentas garantizando la perdurabilidad de la vegetación.

En una primera aproximación, el análisis predictivo se llevó a cabo de modo intuitivo a partir de la experiencia práctica; con el paso del tiempo, se han ido desarrollado metodologías cada vez más sofisticadas que incorporan modelizaciones basadas en algoritmos y ecuaciones matemáticas implementadas en simuladores informáticos.

Como simplificaciones de la realidad, los modelos suponen una pérdida de información, pero, como contrapartida, permiten aplicar reglas previamente establecidos en lugar de tener que tomar decisiones partiendo desde cero (GARCÍA, 2007). En los últimos años se ha producido un gran avance en el desarrollo de modelos forestales (véase las revisiones de BRAVO, ÁLVAREZ y RÍO, 2012 y DIÉGUEZ-ARANDA *et al.*, 2009), lo que permite disponer de metodologías para abordar una de las cuestiones básicas que se plantean en la ordenación y planificación forestal: predecir el crecimiento y la producción de los árboles y las masas forestales.

No hay que olvidar, en todo caso, que el crecimiento y la producción son indicadores de uno de los aspectos a tener en consideración en el sistema forestal (la biomasa extraíble o cosechable). Como sistemas ecológicos, los terrenos forestales (arbolados o no) incluyen otros muchos aspectos relevantes para su propia existencia y para los fines humanos (biodiversidad, paisaje, capacidad sumidero, etc.) que pueden ser caracterizados dentro de las funciones y servicios ecosistémicos que integran la multifuncionalidad de los montes.

Los modelos forestales de crecimiento se pueden clasificar por las siguientes propiedades (VALSTA, 1993; DIÉGUEZ-ARANDA *et al.*, 2009; RODRÍGUEZ *et al.*, 2009; BRAVO *et al.*, 2011): (i) la unidad de predicción (modelos de rodal; de clases dimensionales; de árbol individual); (ii) la inclusión de información sobre la localización espacial de los árboles (modelos dependientes frente a independientes de la distancia); (iii) modelos estáticos frente a modelos dinámicos; (iv) modelos determinísticos frente a modelos estocásticos; y (v) modelos estadísticos o empíricos frente a modelos basados en procesos y modelos híbridos.

Existen dos estrategias comunes de modelización (BUENO y BEVILACQUA, 2010): (i) la formulación de una componente de crecimiento potencial combinada con funciones modificadoras que consideran los efectos de los procesos de competencia, regeneración, reclutamiento y mortalidad sobre el crecimiento potencial y (ii) modelos compuestos, basados en ecuaciones que predicen el crecimiento diamétrico en función de las variables que caracterizan el árbol individual o el rodal. Muchos modelos de árbol individual utilizan la variación que experimenta el diámetro en un período específico de tiempo como la variable de respuesta. Sin embargo, para modelizar el incremento diamétrico es necesario disponer de series de datos temporales que permitan analizar la evolución temporal del crecimiento de los árboles. Afortunadamente, ésta no es la única alternativa para predecir el crecimiento de los árboles. Otras estrategias comúnmente utilizadas incluyen la predicción futura del área basal o el diámetro en función de variables de árbol individual o de rodal.

Dada la disponibilidad de datos iniciales en este trabajo (parcelas con una o dos medidas temporales) se optó por la segunda estrategia, es decir, desarrollar un modelo estadístico basado en una ecuación dinámica, que permite predecir el diámetro futuro del árbol representativo de una clase diamétrica en función de las variables que caracterizan su estado inicial y el entorno donde se desarrolla. Este modelo se utiliza para proyectar las observaciones puntuales de las parcelas de muestreo hacia una fecha común (enfoque temporal), requisito indispensable para generar la cartografía digital de las variables dasométricas y, asimismo, los mapas temáticos de biomasa y producción de las especies de pino analizadas (enfoque espacial).

En los capítulos precedentes se han desarrollado los métodos que permiten disponer de los datos de partida para modelizar la existencia de biomasa de coníferas en la superficie forestal de Andalucía. Esta modelización, como veremos a continuación, se apoya, en último término, en la aplicación de las ecuaciones de volumen y biomasa desarrolladas por MONTERO *et al.* (2005) y RUIZ-PEINADO *et al.* (2011).

Dado que los datos originales recopilados para este estudio proceden de diversas fuentes (inventarios de Proyectos de Ordenación e Inventario Forestal Nacional), las variables dasométricas se tomaron en momentos temporales distintos (las mediciones se realizaron en fechas diferentes). Por ello, para aplicar los modelos, fue preciso homogeneizar las variables dasométricas a una fecha común.



10.2. Materiales y métodos

10.2.1. Formulación general del modelo

Para satisfacer los objetivos antes expuestos se desarrolló un modelo distribuido de crecimiento y producción de las especies de pino analizadas en este trabajo. El término distribuido se refiere a que las clases diamétricas que conforman la masa forestal se actualizan individualmente, aunque se mantiene la interacción entre ellas a través de los términos de competencia (BUONGIORNO y MICHIE, 1980; NAMAALWA *et al.*, 2005). El núcleo del simulador está constituido por un modelo de clases diamétricas que permite predecir el crecimiento diamétrico del árbol medio representativo de cada clase en función de la edad, la calidad de estación, la densidad y la competencia. Al ser un modelo distribuido, es posible abordar tanto masas regulares como irregulares.

El modelo se formuló sobre la base del enfoque estado-espacio propuesto por VANCLAY (1994), que hace uso de variables de estado para caracterizar las condiciones iniciales del sistema en cualquier instante de tiempo, y de funciones de transición para proyectar las variables de estado hacia el futuro. Asimismo, el modelo permite estimar otras variables de interés mediante funciones de producción y biomasa.

La modelización del crecimiento y la producción exige una adecuada comprensión de las relaciones entre la densidad y la competencia con el crecimiento. Se han propuesto diferentes alternativas para incorporar estas relaciones; en general, es frecuente utilizar estimadores independientes de la distancia entre árboles, como el número de árboles por hectárea (densidad), cuya relación con el crecimiento puede ser modelizada a partir de diferentes procedimientos como la curva de Langsaeter, el índice de Reineke o el índice de Hart-Becking.

Para este estudio se consideraron dos variables de estado: (i) la densidad de la especie analizada agrupada en clases diamétricas y (ii) la competencia que ejercen otras especies presentes en la masa forestal que se está analizando. Estas variables caracterizan las condiciones iniciales de la masa que se consideró irregular por defecto. Además, al suponer la presencia de otras especies distintas a la analizada, también permiten abordar masas forestales mixtas.

El modelo propuesto se basó en las diversas ecuaciones de crecimiento propuestas por ZEIDE (1993), en las que el crecimiento se divide en dos componentes: uno representa la tendencia intrínseca hacia un crecimiento ilimitado y el otro las restricciones al mismo. Así, el modelo utiliza dos funciones de transición (DIÉGUEZ-ARANDA *et al.*, 2009). La primera permite pronosticar el diámetro normal futuro del árbol representativo de una clase diamétrica en función de su altura total, el número de pies de la clase que representa y la competencia que ejercen el resto de árboles presentes en la masa analizada (tanto de la propia especie como de otras especies). La segunda función predice la altura total del árbol representativo en función de la edad y la productividad del sitio donde se encuentra.

Después de analizar diversas alternativas (ZEIDE, 1993; KIVISTE *et al.*, 2002), y una vez comprobado el grado de bondad de los ajustes, las funciones que finalmente fueron elegidas para simular las transiciones descritas son las siguientes:

$$d_i = c_1 \cdot H_i^{\exp_1} \cdot N_i^{\exp_2} \cdot e^{c_2 \cdot IC_i} \quad (10.1)$$

$$H_i = c_3 \cdot E_i^{\exp_3} \cdot IS^{\exp_4} \quad (10.2)$$

donde d_i , H_i , N_i , IC_i y E_i son, respectivamente, el diámetro normal (cm), la altura total (m), la densidad (pies/ha), el índice de competencia (m/ha) y la edad (años) correspondientes al árbol representativo de la clase diamétrica, i ; IS (m) es el índice de sitio del lugar obtenido a partir del procedimiento descrito en el **Capítulo 9**, mientras que $\exp_1$, $\exp_2$, $\exp_3$, $\exp_4$, c_1 , c_2 y c_3 son los exponentes y coeficientes del modelo de regresión.

Puede observarse en las ecuaciones anteriores que todos los parámetros de los modelos están incluidos como expresiones potenciales, excepto el índice de competencia que se introdujo como una expresión exponencial. Por lo tanto, la aplicación de una transformación logarítmica permite convertir las **ecuaciones (10.1) y (10.2)** en modelos lineales múltiples que permiten obtener, para el árbol representativo de cada clase diamétrica, la altura total (H_i) y la edad (E_i), conocidos el resto de valores:

$$\ln(d_i) = c_1 + c_2 \ln(H_i) + c_3 \ln(N_i) + c_4 \cdot IC_i \quad (10.3)$$

$$\ln(H_i) = c_5 + c_6 \ln(E_i) + c_7 \ln(IS) \quad (10.4)$$

IC_i se definió como un índice de competencia independiente de la distancia que considera como competidores a todos los pies presentes en la parcela del árbol objetivo i , incluyendo las especies distintas a la analizada, tal como describe la **ecuación (10.5)**:

$$IC_i = d_a \cdot N_a + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_c} d_j \cdot N_j \quad (10.5)$$

donde d_a y N_a son el diámetro normal medio (m) y la densidad total (pies/ha) de otras especies presentes en la parcela, mientras que d_j y N_j son el diámetro y la densidad correspondiente a la clase diamétrica, j , de la especie analizada, siendo j diferente a i , y N_c es el número total de clases diamétricas.

Una vez conocidas las variables dasométricas anteriores, es posible aplicar funciones de producción para estimar el volumen con corteza, el incremento anual, y el volumen de leñas según las siguientes ecuaciones (MARTÍNEZ *et al.*, 1993):

$$\ln(VCC_i) = c_8 + c_9 \ln(H_i) + c_{10} \ln(d_i) \quad (10.6)$$

$$\ln(IAVC_i) = c_{11} + c_{12} \ln\left(\frac{VCC_i}{E_i}\right) \quad (10.7)$$

$$\ln(VLE_i) = c_{13} + c_{14} \ln(VCC_i) + c_{15} \ln(d_i) \quad (10.8)$$

siendo VCC_i el volumen con corteza (m^3 /pies), $IAVC_i$ el incremento anual del volumen con corteza (m^3 /pies) y VLE_i el volumen de leñas (m^3 /pies) que producen los árboles pertenecientes a la clase diamétrica, i . El resto de parámetros de las **ecuaciones (10.6, 10.7 y 10.8)** ya han sido definidos con anterioridad.

Se ha calculado asimismo la posibilidad teórica de madera a partir de la fórmula clásica de la masa cortable (MACKAY, 1944):

$$PT_i = \left(\frac{VCC_i}{Turno}\right) + \left(\frac{IAVC_i}{2}\right) \quad (10.9)$$

ESPECIE	Turno (años)*
<i>Pinus halepensis</i>	80
<i>Pinus nigra</i>	100
<i>Pinus pinaster</i>	80
<i>Pinus pinea</i>	100
<i>Pinus sylvestris</i>	120

(*) Fuente: Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal de Andalucía. 2006. Consejería de Medio Ambiente

La posibilidad cuantifica los productos directos que un monte ha producido o debe producir. Se expresa en unidades de producto; para madera, normalmente en metros cúbicos con corteza, por unidad de espacio y de tiempo. Es un indicador de las extracciones que se pueden realizar de una superficie forestal de manera acompasada con el crecimiento natural de las especies que la componen. La ciencia forestal ha desarrollado el concepto de posibilidad para el aprovechamiento de madera; sin embargo, aún no se ha profundizado en su aplicación para la extracción de biomasa, aprovechamiento que comparte algunas características con el de madera, pero que cuenta también con singularidades propias. Por ello, en este estudio se hace uso del concepto existencias de biomasa, entendido como la cantidad de biomasa en

pie en un área, expresada generalmente en unidades de volumen por unidad de superficie, haciéndose hincapié en el carácter descriptivo (estima lo que hay) de este término, frente al enfoque orientado a la gestión de la posibilidad (lo que es posible o se debe extraer en función de determinados criterios).

Finalmente, se utilizaron las funciones desarrolladas por MONTERO *et al.* (2005) y RUIZ-PEINADO *et al.* (2011) para estimar las diferentes fracciones de biomasa forestal de las especies de pinos estudiadas (Tabla 10.1 y Tabla 10.2).

Tabla 10.1. Funciones de biomasa forestal obtenidas por MONTERO *et al.* (2005)

ESPECIE/COMPONENTE	MODELO DE BIOMASA
<i>Pinus halepensis</i>	
Fuste	$B_F = 0,08277 \cdot d^{2,13609}$
Raíces	$B_R = 0,028447 \cdot d^{2,29823}$
Total	$B_T = 0,12463 \cdot d^{2,20988}$
<i>Pinus nigra</i>	
Fuste	$B_F = 0,043808 \cdot d^{2,4975}$
Raíces	$B_R = 0,0236151 \cdot d^{2,38784}$
Total	$B_T = 0,0627707 \cdot d^{2,51564}$
<i>Pinus pinaster</i>	
Fuste	$B_F = 0,032672 \cdot d^{2,56636}$
Raíces	$B_R = 0,0215150 \cdot d^{2,37592}$
Total	$B_T = 0,0503669 \cdot d^{2,49641}$
<i>Pinus pinea</i>	
Fuste	$B_F = 0,0352608 \cdot d^{2,52494}$
Raíces	$B_R = 0,0183457 \cdot d^{2,47024}$
Total	$B_T = 0,1169398 \cdot d^{2,42414}$
<i>Pinus sylvestris</i>	
Fuste	$B_F = 0,0232141 \cdot d^{2,70808}$
Raíces	$B_R = 0,0108866 \cdot d^{2,62841}$
Total	$B_T = 0,0843927 \cdot d^{2,41194}$

B_F : Biomasa de fuste (kg/pies), B_R : Biomasa de raíces (kg/pies), B_T : Biomasa total, suma de biomasa radical y total aérea (kg/pies), d : diámetro normal (cm)

Tabla 10.2. Funciones de biomasa forestal obtenidas por RUIZ-PEINADO *et al.* (2011)

ESPECIE/COMPONENTE	MODELO DE BIOMASA
<i>Pinus halepensis</i>	
Fuste	$W_s = 0,0139 \cdot d^2 \cdot H$
Ramas Gruesas	Si $d > 27,5$ cm $W_{bg} = 3,926 \cdot (d - 27,5)$
Ramas Medias	$W_{bm} = 4,257 + 0,00506 \cdot d^2 \cdot H - 0,0722 \cdot d \cdot H$
Ramas Delgadas	$W_{bf} = 6,197 + 0,00932 \cdot d^2 \cdot H - 0,0686 \cdot d \cdot H$
Raíces	$W_r = 0,0785 \cdot d^2$
<i>Pinus nigra</i>	
Fuste	$W_s = 0,0403 \cdot d^{1,838} \cdot H^{0,945}$
Ramas Gruesas	Si $d > 32,5$ cm $W_{bg} = 0,228 \cdot (d - 32,5)^2$
Ramas Medias	$W_{bm} = 0,0521 \cdot d^2$
Ramas Delgadas	$W_{bf} = 0,0720 \cdot d^2$
Raíces	$W_r = 0,0189 \cdot d^{2,445}$
<i>Pinus pinaster</i>	
Fuste	$W_s = 0,0278 \cdot d^{2,115} \cdot H^{0,618}$
Ramas Gruesas y Medias	$W_{bmg} = 0,000381 \cdot d^{3,141}$
Ramas Delgadas	$W_{bf} = 0,0129 \cdot d^{2,320}$
Raíces	$W_r = 0,00444 \cdot d^{2,804}$
<i>Pinus pinea</i>	
Fuste	$W_s = 0,0224 \cdot d^{1,923} \cdot H^{1,0193}$
Ramas Gruesas	Si $d > 22,5$ cm $W_{bg} = 0,247 \cdot (d - 22,5)^2$
Ramas Medias	$W_{bm} = 0,0525 \cdot d^2$
Ramas Delgadas	$W_{bf} = 21,927 + 0,0707 \cdot d^2 - 2,827 \cdot H$
Raíces	$W_r = 0,117 \cdot d^2$
<i>Pinus sylvestris</i>	
Fuste	$W_s = 0,0154 \cdot d^2 \cdot H$
Ramas Gruesas	Si $d > 37,5$ cm $W_{bg} = 0,54 \cdot (d - 37,5)^2 - 0,0119 \cdot (d - 37,5)^2 \cdot H$
Ramas Medias	$W_{bm} = 0,0295 \cdot d^{2,745} \cdot H^{-0,899}$
Ramas Delgadas	$W_{bf} = 0,53 \cdot d^{2,199} \cdot H^{-1,153}$
Raíces	$W_r = 0,13 \cdot d^2$

W_s : Biomasa de fuste (kg/pies), W_{bg} : Biomasa de las ramas gruesas (kg/pies), W_{bm} : Biomasa de las ramas medias (kg/pies), W_{bmg} : Biomasa de las ramas gruesas y medias (kg/pies), W_{bf} : Biomasa de las ramas delgadas (kg/pies), W_r : Biomasa de raíces (kg/pies), d : diámetro normal (cm), H : Altura total (m)

10.2.2. Datos

Los datos utilizados para calibrar los parámetros de la **ecuación de transición (10.4)** fueron los mismos que se utilizaron para estimar el Índice de Sitio (**capítulo 9. Calidad de Estación Forestal**). Para el resto de funciones se utilizaron las muestras provenientes de diferentes inventarios (**capítulo 5. Recopilación de información de vegetación y datos de parcelas de inventario**). La **Tabla 10.3** contiene un resumen básico de los datos utilizados.

Tabla 10.3. Resumen estadístico de las parcelas de inventario (muestras) utilizadas para desarrollar la función de transición del diámetro y las funciones de producción.

PARÁMETRO	Nº DE MUESTRAS	VALOR MÍNIMO	VALOR MEDIO	VALOR MÁXIMO
<i>Pinus halepensis</i>				
Diámetro normal (cm)	57.070	6,00	25,33	105,00
Altura total (m)	57.070	2,00	9,63	33,89
Densidad (pies/ha)	57.070	5	64,064	1.910
Volumen con corteza (m³/pies)	57.070	0,0048	0,2609	5,6750
Índice de Competencia (m/ha)	57.070	0,00	59,27	695,84
Incremento anual de volumen con corteza (m³/pies)	67.774	0,0010	0,0171	0,1228
Volumen de leñas (m³/pies)	66.820	0,0006	0,0236	1,5064
<i>Pinus nigra</i>				
Diámetro normal (cm)	45.762	7,50	30,07	138,00
Altura total (m)	45.762	2,1	10,89	36,80
Densidad (pies/ha)	45.762	5	62,09	1.655
Volumen con corteza (m³/pies)	45.762	0,0066	0,5669	15,5122
Índice de Competencia (m/ha)	45.762	0,00	77,78	402,19
Incremento anual de volumen con corteza (m³/pies)	62.721	0,0013	0,0500	0,5395
Volumen de leñas (m³/pies)	62.391	0,0008	0,0325	1,4117
<i>Pinus pinaster</i>				
Diámetro normal (cm)	53.760	6,00	27,49	121,00
Altura total (m)	53.760	2,15	9,91	31,30
Densidad (pies/ha)	53.760	5	64,67	3.055
Volumen con corteza (m³/pies)	53.760	0,0029	0,3915	12,2195
Índice de Competencia (m/ha)	53.760	0,00	68,87	586,89
Incremento anual de volumen con corteza (m³/pies)	74.704	0,0013	0,0412	0,5170
Volumen de leñas (m³/pies)	71.525	0,0005	0,0200	0,4460
<i>Pinus pinea</i>				
Diámetro normal (cm)	53.584	7,50	23,59	99,00
Altura total (m)	53.584	2,20	8,16	33,08
Densidad (pies/ha)	53.584	5	80,92	3.380
Volumen con corteza (m³/pies)	53.584	0,0026	0,1922	5,1253
Índice de Competencia (m/ha)	53.584	0,00	46,93	449,17
Incremento anual de volumen con corteza (m³/pies)	72.357	0,0007	0,0172	0,1266
Volumen de leñas (m³/pies)	67.915	0,0001	0,0233	2,0584
<i>Pinus sylvestris</i>				
Diámetro normal (cm)	1.132	8,00	20,20	64,00
Altura total (m)	1.132	2,70	8,62	23,66
Densidad (pies/ha)	1.132	5	173,74	2.037
Volumen con corteza (m³/pies)	1.132	0,0080	0,1628	2,3464
Índice de Competencia (m/ha)	1.132	0,00	105,88	371,99
Incremento anual de volumen con corteza (m³/pies)	9.188	0,0017	0,0111	0,1083
Volumen de leñas (m³/pies)	8.085	0,0012	0,0100	0,3360

10.2.3. Homogeneización temporal de las variables dasométricas

Para actualizar las variables dasométricas a la fecha de referencia (2011), el modelo elaboró parte de la situación de la masa forestal en un instante determinando (fecha de muestreo, n), que está definida por las variables de estado de las parcelas de inventario, es decir, la distribución del número de pies por clases diamétricas y la competencia de otras especies presente en la parcela.

A partir de estas variables y la posición geográfica de la parcela de inventario, se obtienen el Índice de Sitio, a través de la cartografía correspondiente (**capítulo 9**), y el Índice de Competencia mediante la **ecuación (10.5)**. Asimismo, se estiman la altura y la edad inicial de cada clase diamétrica a través de las **ecuaciones (10.3) y (10.4)** respectivamente.

Lo anterior sitúa la modelización en el momento inicial a partir del cual se desarrolla el siguiente algoritmo iterativo, que se aplica a cada una de las clases diamétricas que componen las parcelas de inventario:

1. Se calcula el número de años a actualizar como la diferencia entre la fecha de muestreo de la parcela de inventario (n) y la fecha de referencia (año 2011).
2. Se añade un año a la edad y se estiman las nuevas altura y diámetro de la clase analizada a través de las **ecuaciones de transición (10.3) y (10.4)**.
3. Una vez estimados los nuevos valores de altura y diámetro para todas las clases diamétricas que conforman la parcela de inventario para el año $n+1$, se procede a actualizar el Índice de Competencia con la **ecuación (10.5)**.
4. Si todavía no se ha alcanzado el año de referencia (2011), se repite el paso 2.

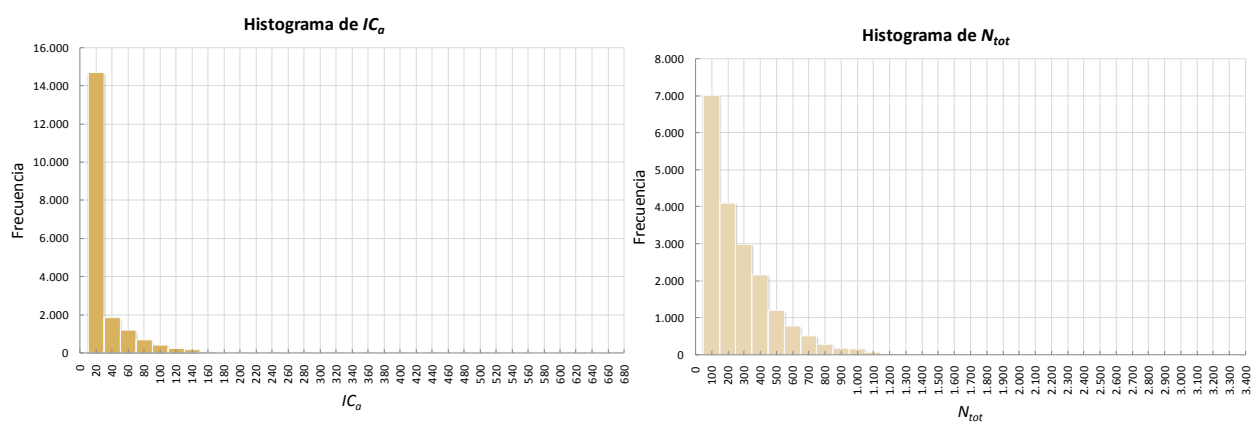
Este algoritmo iterativo se llevó a cabo desde un valor mínimo de actualización de cero años hasta un máximo de 17 años, siendo la media de años de actualización de las variables dasométricas observadas en las parcelas de muestreo de 7 para el horizonte temporal de referencia definido en este estudio (año 2011), no considerándose en el modelo las simulaciones de los procesos de regeneración, reclutamiento y mortalidad regular. Estos procesos no ejercen un impacto significativo en las predicciones de crecimiento a corto plazo.

10.2.4. Interpolación espacial de las variables dasométricas (variables de estado)

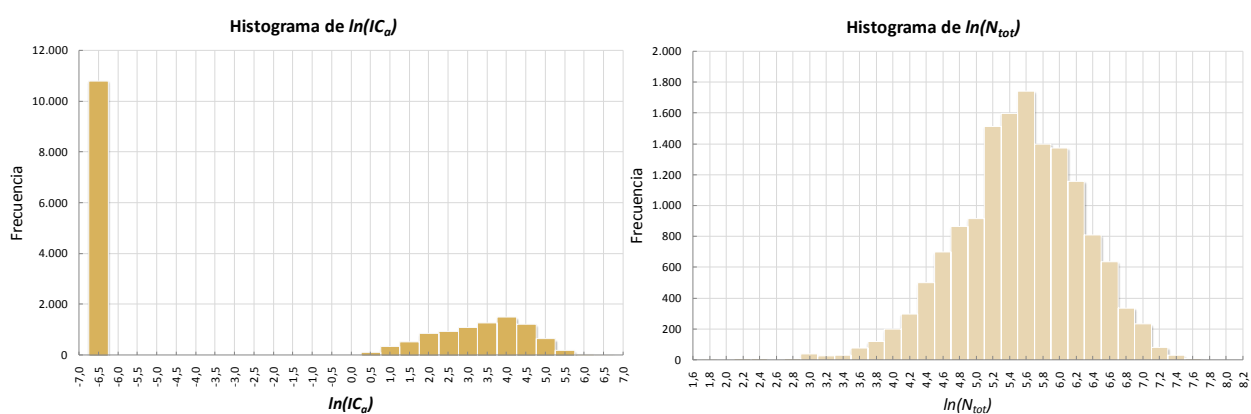
La información original de partida procede de parcelas de inventario con una determinada distribución espacial en el territorio que responde a las necesidades y criterios de los trabajos que exigieron realizar dichas parcelas (Proyectos de Ordenación, IFN). Sin embargo, el modelo de existencia de biomasa precisa contar como punto de partida con unas variables que presenten valores en todos los píxeles en que se ha dividido el territorio. Por ello, fue preciso interpolar espacialmente las variables dasométricas derivadas de las parcelas de inventario para obtener una estimación espacial de estas mismas variables distribuidas en una malla de puntos de 100 x 100m.

Con esta finalidad, una vez homogeneizadas temporalmente a la fecha de referencia (2011) las variables dasométricas observadas en cada parcela de inventario (muestreo) que definen las condiciones de partida de la masa (variables de estado), se procedió a su regionalización mediante técnicas geoestadísticas de interpolación espacial. En concreto, se utilizaron diferentes variantes del *block kriging* ordinario para interpolar el índice de competencia de otras especies distintas a la analizada, IC_a , el número total de pies de cada especie, N_{tot} , y su distribución en clases diamétricas, N_i , ya que cada variable precisaba de una transformación para su correcta interpolación espacial, como se verá a continuación.

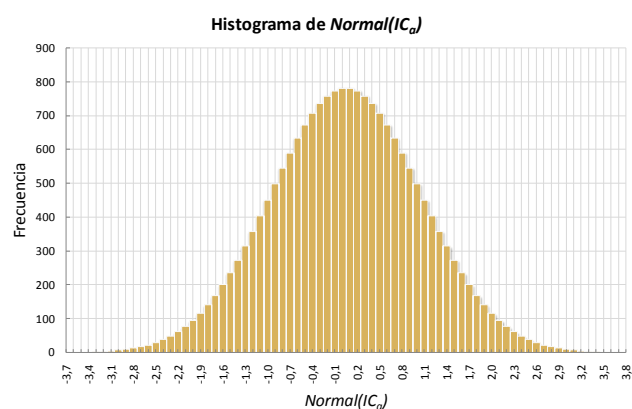
Hay que puntualizar que IC_a se definió como $IC_a = d_a \cdot N_a$, mientras que $N_{tot} = \sum_{i=1}^{Nc} N_i$.



(a)



(b)



(c)

Figura 10.1. Distribución de frecuencias del índice de competencia de otras especies y la densidad total (a) Valores originales, (b) Transformación logarítmica y (c) Transformación normal score del IC_o

10.2.4.1. Densidad total e índice de competencia de otras especies

Para llevar a cabo la interpolación mediante *kriging* es necesario analizar en primer lugar la distribución de frecuencias de los datos. En la **Figura 10.1** se presentan los histogramas característicos de índice de competencia de otras especies (IC_o) y densidad total (N_{tot}), para todos los pinos analizados. Puede apreciarse que las distribuciones de frecuencias de ambas variables son marcadamente asimétricas. Dado que las inferencias geoestadísticas con *kriging* son más eficientes cuando los datos a interpolar se aproximan a una distribución normal, fue preciso plantear una transformación de los mismos. La transformación no solo normaliza la distribución de datos, sino que permite suprimir valores extremos, mejorar la estacionalidad de los datos originales y generar variogramas más estables.

Entre las transformaciones más comunes que se aplican a las series de datos asimétricos se encuentran la logarítmica (JOURNEL, 1980; SAITO y GOOVAERTS, 2000), el orden del rango estandarizado (*standardized rank order*) (JOURNEL y DEUTSCH, 1997) y la transformación normal (*normal score*) (GOOVAERTS, 1997; DEUTSCH y JOURNEL, 1998; SAITO y GOOVAERTS, 2000). En la **Figura 10.1 (b)** puede observarse que la transformación logarítmica resultó efectiva para la densidad total (notable mejora de la simetría), pero irrelevante para el índice de competencia ajena. El hecho de que existan muchas muestras con valores de IC_o igual a cero (parcelas con presencia de una sola especie) hace que la distribución de esta variable sea altamente asimétrica por lo que para transformarla adecuadamente es necesario aplicar procedimientos alternativos a la transformación logarítmica; en este caso, se aplicó la transformación normal (*normal score*). Esta última se implementó como se describe a continuación (GOOVAERTS, 1997; DEUTSCH y JOURNEL, 1998; SAITO y GOOVAERTS, 2000):

- Los n datos originales de IC_o se organizaron en orden ascendente.
- Se asignó un número de orden o rango, r , a cada dato, siendo $r=1$ para el primero (y menor) y $r=n$ para el último (y mayor).
- Se calculó el número de orden o rango estandarizado de la muestra (función de distribución empírica acumulada) como $p^{(r)}=r/(n+1)$, donde $p^{(r)}$ puede adquirir un valor entre $1/(n+1)$ y 1.
- Se determinó el inverso de la función de distribución normal estándar acumulada, x , correspondiente a cada valor de $p^{(r)}$ mediante la solución inversa de la siguiente ecuación:

$$p^{(r)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (10.10)$$

- Los valores de x obtenidos de la función anterior (10.10) representan la transformación normal de los datos originales del índice de competencia de otras especies, y fueron los que se interpolaron espacialmente mediante el *block-kriging* ordinario. Los valores transformados de IC_o tienen una media igual a cero, una desviación estándar igual a 1 y unos coeficientes de asimetría y curtosis iguales a 0; por lo que son idóneos para ser interpolados con *kriging* (**Figura 10.1.c**).
- Una vez obtenido el mapa continuo de la variable transformada del IC_o fue necesario convertirlo a su unidad original. Para ello, se calculó la distribución normal estándar acumulada, $F(x)$, correspondiente a cada valor de x interpolado mediante la aproximación numérica propuesta por ABRAMOWITZ y STEGUN (1972):

$$\Phi(x) = 1 - \phi(x) \left(b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3 + b_4 \cdot t^4 + b_5 \cdot t^5 \right), \quad t = \frac{1}{1 + b_0 \cdot x} \quad (10.11)$$

donde $x \geq 0$, $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}$ es la función de densidad de la distribución normal estándar,

$b_0=0,2316419$, $b_1=0,319381530$, $b_2=-0,356563782$, $b_3=1,781477937$, $b_4=-1,821255978$ y $b_5=1,330274429$, parámetros establecidos por ABRAMOWITZ y STEGUN (1972). Para $x < 0$, se evaluó la ecuación anterior con el valor absoluto de x y el valor obtenido se sustrajo a 1.

- Posteriormente, se calculó el número de orden o rango correspondiente a cada valor de $F(x)$ a través de la expresión: $r=\phi(x)(n+1)$.
- Finalmente, se identificó (mediante interpolación lineal) el valor original de la variable en cuestión correspondiente a cada número de orden o rango calculado en el paso anterior.

10.2.4.2. Interpolación espacial del número de pies en clases diamétricas

La interpolación espacial del número de pies en clases diamétricas se obtuvo mediante la generación de un mapa de fracción de la densidad total, FN_i , por cada clase diamétrica presente en la masa.

Evidentemente, para una especie determinada, $\sum_{i=1}^{N_c} FN_i = 1$. Esta propiedad permitió definir el tipo de

transformación que se aplicó a los valores de FN_i antes de ser interpolados espacialmente. De acuerdo con AITCHISON (1986), una transformación adecuada para los datos cuya suma de sus componentes sea la unidad, es decir, datos composicionales es la transformación *Log-ratio*, que se formula como:

$$tFN_i = \ln \left(\frac{FN_i}{\left(\prod_{j=1}^{N_c} FN_j \right)^{\frac{1}{N_c}}} \right), \text{ si } FN_i=0, FN_i=0,001 \quad (10.12)$$

Así, todos los valores de FN_i se transformaron según (10.12) y se interpolaron espacialmente en la región de interés. Posteriormente, los mapas obtenidos de tFN_i se convirtieron a su escala original a través de la ecuación (10.13).

$$FN_i = \frac{e^{tFN_i}}{\sum_{j=1}^{N_c} e^{tFN_j}} \quad (10.13)$$

Una vez transformadas las variables dasométricas o de estado con los procedimientos explicados anteriormente, se procedió a la interpolación espacial con técnicas geoestadísticas, ajustándose los semivariogramas de las variables transformadas se ajustaron al modelo exponencial. Las interpolaciones se realizaron con el procedimiento de *block kriging* ordinario con un tamaño de bloque de 100 m, acorde con las cuadrículas de trabajo definidas por las distribuciones actuales de las especie analizadas (apartado correspondiente a distribución actual de las especies de *Pinus*). El *software* utilizado para ejecutar las interpolaciones espaciales fue VESPER (MINASNY *et al.*, 2005).



10.3. Resultados y discusión

La **Tabla 10.4** contiene las ecuaciones finalmente obtenidas de acuerdo con la metodología descrita. Debe señalarse que todos los datos utilizados para obtener estos modelos se sometieron a un proceso de depuración de valores atípicos (residuos estudentizados superiores a 2 en valor absoluto) con el fin de eliminar las observaciones con posibles errores. La tabla muestra los porcentajes de datos rechazados en cada variable.

Tabla 10.4. Modelos obtenidos por análisis de regresión lineal múltiple.

MODELO	Nº. DE MUESTRAS	% VALORES ATÍPICOS	ERROR ESTÁNDAR	R ²
<i>Pinus halepensis</i>				
$\ln(d_i) = 1,4971 + 0,9398 \cdot \ln(H_i) - 0,1073 \cdot \ln(N_i) - 0,00046 \cdot IC_i$	57.070	4,60	0,1706	0,7700
$\ln(H_i) = -3,7991 + 0,94876 \cdot \ln(E_i) + 1,0459 \cdot \ln(IS)$	459	0,90	0,0368	0,9916
$\ln(VCC_i) = -9,1790 + 0,8168 \cdot \ln(H_i) + 1,7652 \cdot \ln(d_i)$	57.070	4,30	0,1310	0,9833
$\ln(IAVC_i) = 0,7898 + 0,9877 \cdot \ln(VCC_i / E_i)$	67.785	0,00	0,0182	0,9994
$\ln(VLE_i) = -11,2059 + 0,0382 \cdot \ln(VCC_i) + 2,2529 \cdot \ln(d_i)$	67.779	1,40	0,0387	0,9987
<i>Pinus nigra</i>				
$\ln(d_i) = 1,1049 + 1,1004 \cdot \ln(H_i) - 0,0934 \cdot \ln(N_i) - 0,000420 \cdot IC_i$	45.762	4,50	0,1926	0,8474
$\ln(H_i) = -4,1267 + 1,0454 \cdot \ln(E_i) + 1,0189 \cdot \ln(IS)$	348	1,40	0,0327	0,9907
$\ln(VCC_i) = -9,7714 + 0,9322 \cdot \ln(H_i) + 1,9302 \cdot \ln(d_i)$	45.762	7,80	0,1064	0,9931
$\ln(IAVC_i) = 1,0967 + 0,9853 \cdot \ln(VCC_i / E_i)$	62.785	0,10	0,0239	0,9994
$\ln(VLE_i) = -11,7086 + 0,0099 \cdot \ln(VCC_i) + 2,3855 \cdot \ln(d_i)$	62.584	0,30	0,0723	0,9966
<i>Pinus pinaster</i>				
$\ln(d_i) = 0,8671 + 1,1349 \cdot \ln(H_i) - 0,0499 \cdot \ln(N_i) - 0,000053 \cdot IC_i$	53.760	5,10	0,1601	0,8706
$\ln(H_i) = -3,9777 + 1,0166 \cdot \ln(E_i) + 1,0182 \cdot \ln(IS)$	467	1,10	0,0446	0,9833
$\ln(VCC_i) = -9,8875 + 0,7928 \cdot \ln(H_i) + 2,0419 \cdot \ln(d_i)$	53.760	4,20	0,0473	0,9983
$\ln(IAVC_i) = 1,1468 + 0,9939 \cdot \ln(VCC_i / E_i)$	74.714	0,00	0,0112	0,9998
$\ln(VLE_i) = -11,0772 + 0,0521 \cdot \ln(VCC_i) + 2,1222 \cdot \ln(d_i)$	74.695	4,20	0,0377	0,9986

MODELO	Nº. DE MUESTRAS	% VALORES ATÍPICOS	ERROR ESTÁNDAR	R ²
<i>Pinus pinea</i>				
$\ln(d_i) = 1,3687 + 0,9496 \cdot \ln(H_i) - 0,0472 \cdot \ln(N_i) - 0,000627 \cdot IC_i$	53.584	4,50	0.131846	0,9026
$\ln(H_i) = -3,7623 + 1,0155 \cdot \ln(E_i) + 0,9264 \cdot \ln(IS)$	576	0,70	0.0629932	0,9738
$\ln(VCC_i) = -9,1933 + 0,9504 \cdot \ln(H_i) + 1,6494 \cdot \ln(d_i)$	53.584	0,80	0.22912	0,9560
$\ln(IAVC_i) = 0,8789 + 0,9881 \cdot \ln(VCC_i / E_i)$	72.365	0,00	0.0244523	0,9990
$\ln(VLE_i) = -13,5648 + 0,0412 \cdot \ln(VCC_i) + 2,9589 \cdot \ln(d_i)$	72.365	6,10	0,1489	0,9880
<i>Pinus sylvestris</i>				
$\ln(d_i) = 1,7441 + 0,8306 \cdot \ln(H_i) - 0,1056 \cdot \ln(N_i) - 0,000723 \cdot IC_i$	1.132	5,50	0,1699	0,7718
$\ln(H_i) = -4,0619 + 1,0176 \cdot \ln(E_i) + 1,0329 \cdot \ln(IS)$	274	2,20	0,0319	0,9902
$\ln(VCC_i) = -10,0619 + 0,8625 \cdot \ln(H_i) + 2,0349 \cdot \ln(d_i)$	1.132	4,50	0,0739	0,9941
$\ln(IAVC_i) = 0,8035 + 0,9743 \cdot \ln(VCC_i / E_i)$	9.198	0,10	0,0357	0,9975
$\ln(VLE_i) = -11,1710 + 0,0010 \cdot \ln(VCC_i) + 2,1397 \cdot \ln(d_i)$	8.979	10,00	0,0053	0,9999

De todos los procesos analizados, la modelización del diámetro normal del árbol fue la más compleja y en la que se lograron ajustes menos finos. No obstante, puede apreciarse en la anterior tabla que las funciones potenciales obtenidas explican entre el 78 y 90% de la varianza total. La variación de la altura total del árbol, al ser una variable mucho menos influenciada por factores como la competencia, densidad de pies o los tratamientos selvícolas se aproximó con excelentes resultados a través de un modelo potencial con la edad y el índice de sitio como variables independientes.

Es importante reseñar que en este estudio se proponen funciones de producción unificadas para todos los trabajos previos que suministraron información mediante sus parcelas de inventario y que frecuentemente vienen acompañados de funciones propias de producción (válidas para los diferentes Proyectos de Ordenación).

Por último, la **Tabla 10.5** contiene un resumen de las variables dasométricas (variables de estado) de las parcelas de muestreo, actualizadas al año 2011 a través del modelo propuesto. Ya se mencionó anteriormente que, acorde con el modelo desarrollado, las variables de estados son las mínimas necesarias para caracterizar las condiciones iniciales de las masas forestales mixtas e irregulares. La regionalización de estas variables constituye el soporte necesario para generar la cartografía digital de las principales variables de producción y biomasa de las especies de pino tratadas en este trabajo.

Tabla 10.5. Resumen estadístico de las variables de estado observadas en las parcelas de muestreo y actualizadas al año 2011

ÍNDICE DE COMPETENCIA DE OTRAS ESPECIES (m/ha)		DENSIDAD TOTAL (pies/ha)		DENSIDAD MEDIA POR CLASES DIAMÉTRICAS (pies/ha)																																															
Pinus halepensis																																																			
No. de Parcelas: 19,632		No. de Parcelas: 19,632		Distribución de la Densidad por Clases Diamétricas <table><tr><th>Clase Diamétrica (cm)</th><th>Densidad (pies/ha)</th></tr><tr><td>10</td><td>25,543</td></tr><tr><td>15</td><td>50,873</td></tr><tr><td>20</td><td>46,768</td></tr><tr><td>25</td><td>39,806</td></tr><tr><td>30</td><td>28,614</td></tr><tr><td>35</td><td>17,436</td></tr><tr><td>40</td><td>9,910</td></tr><tr><td>45</td><td>5,118</td></tr><tr><td>50</td><td>2,571</td></tr><tr><td>55</td><td>1,270</td></tr><tr><td>60</td><td>0,636</td></tr><tr><td>65</td><td>0,284</td></tr><tr><td>70</td><td>0,124</td></tr><tr><td>75</td><td>0,046</td></tr><tr><td>80</td><td>0,026</td></tr><tr><td>85</td><td>0,013</td></tr><tr><td>90</td><td>0,016</td></tr><tr><td>95</td><td>0,001</td></tr></table>		Clase Diamétrica (cm)	Densidad (pies/ha)	10	25,543	15	50,873	20	46,768	25	39,806	30	28,614	35	17,436	40	9,910	45	5,118	50	2,571	55	1,270	60	0,636	65	0,284	70	0,124	75	0,046	80	0,026	85	0,013	90	0,016	95	0,001								
Clase Diamétrica (cm)	Densidad (pies/ha)																																																		
10	25,543																																																		
15	50,873																																																		
20	46,768																																																		
25	39,806																																																		
30	28,614																																																		
35	17,436																																																		
40	9,910																																																		
45	5,118																																																		
50	2,571																																																		
55	1,270																																																		
60	0,636																																																		
65	0,284																																																		
70	0,124																																																		
75	0,046																																																		
80	0,026																																																		
85	0,013																																																		
90	0,016																																																		
95	0,001																																																		
Mínimo: 0,00		Mínimo: 5																																																	
Máximo: 676,36		Máximo: 3,301																																																	
Media: 17,40		Media: 229,06																																																	
Mediana: 0,00		Mediana: 169,51																																																	
Moda: 0,00		Moda: 18,83																																																	
Desviación Estándar: 35,30		Desviación Estándar: 222,73																																																	
Curtosis: 37,32		Curtosis: 8,30																																																	
Coeficiente de Asimetría: 4,29		Coeficiente de Asimetría: 2,10																																																	
Pinus nigra																																																			
No. de Parcelas: 16,624		No. de Parcelas: 16,624		Distribución de la Densidad por Clases Diamétricas <table><tr><th>Clase Diamétrica (cm)</th><th>Densidad (pies/ha)</th></tr><tr><td>10</td><td>38,228</td></tr><tr><td>15</td><td>71,928</td></tr><tr><td>20</td><td>53,456</td></tr><tr><td>25</td><td>38,551</td></tr><tr><td>30</td><td>30,124</td></tr><tr><td>35</td><td>20,109</td></tr><tr><td>40</td><td>13,729</td></tr><tr><td>45</td><td>9,648</td></tr><tr><td>50</td><td>6,919</td></tr><tr><td>55</td><td>4,766</td></tr><tr><td>60</td><td>3,317</td></tr><tr><td>65</td><td>2,472</td></tr><tr><td>70</td><td>1,641</td></tr><tr><td>75</td><td>0,961</td></tr><tr><td>80</td><td>0,493</td></tr><tr><td>85</td><td>0,293</td></tr><tr><td>90</td><td>0,144</td></tr><tr><td>95</td><td>0,086</td></tr><tr><td>100</td><td>0,066</td></tr><tr><td>105</td><td>0,032</td></tr><tr><td>110</td><td>0,017</td></tr><tr><td>115</td><td>0,002</td></tr></table>		Clase Diamétrica (cm)	Densidad (pies/ha)	10	38,228	15	71,928	20	53,456	25	38,551	30	30,124	35	20,109	40	13,729	45	9,648	50	6,919	55	4,766	60	3,317	65	2,472	70	1,641	75	0,961	80	0,493	85	0,293	90	0,144	95	0,086	100	0,066	105	0,032	110	0,017	115	0,002
Clase Diamétrica (cm)	Densidad (pies/ha)																																																		
10	38,228																																																		
15	71,928																																																		
20	53,456																																																		
25	38,551																																																		
30	30,124																																																		
35	20,109																																																		
40	13,729																																																		
45	9,648																																																		
50	6,919																																																		
55	4,766																																																		
60	3,317																																																		
65	2,472																																																		
70	1,641																																																		
75	0,961																																																		
80	0,493																																																		
85	0,293																																																		
90	0,144																																																		
95	0,086																																																		
100	0,066																																																		
105	0,032																																																		
110	0,017																																																		
115	0,002																																																		
Mínimo: 0,00		Mínimo: 5																																																	
Máximo: 358,07		Máximo: 2546																																																	
Media: 27,20		Media: 296,98																																																	
Mediana: 7,95		Mediana: 188,35																																																	
Moda: 0,00		Moda: 18,84																																																	
Desviación Estándar: 40,52		Desviación Estándar: 319,11																																																	
Curtosis: 5,90		Curtosis: 4,96																																																	
Coeficiente de Asimetría: 2,17		Coeficiente de Asimetría: 1,98																																																	

INDICE DE COMPETENCIA DE OTRAS ESPECIES (m/ha)

DENSIDAD TOTAL (pies/ha)

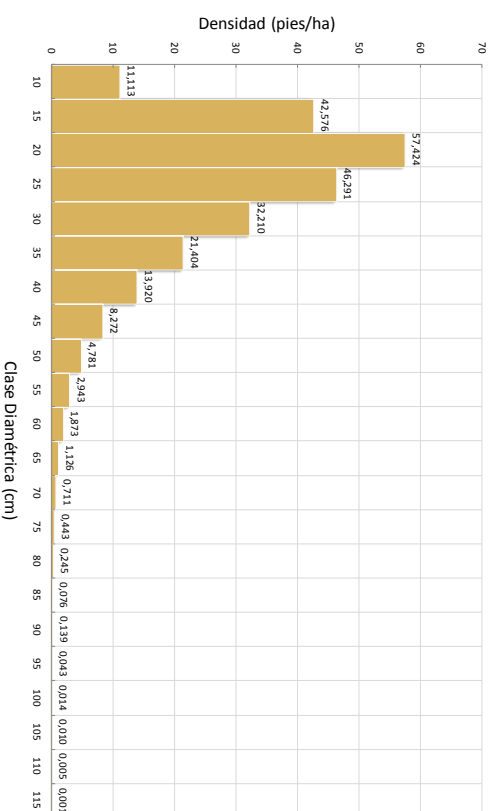
DENSIDAD MEDIA POR CLASES DIAMÉTRICAS (pies/ha)

Pinus pinaster

No. de Parcelas: 21.364
Mínimo: 0,00
Máximo: 544,85
Media: 24,65
Mediana: 9,42
Moda: 0,00
Desviación Estándar: 37,50
Curtosis: 13,68
Coeficiente de Asimetría: 2,87

No. de Parcelas: 21.364
Mínimo: 5
Máximo: 3.565
Media: 245,62
Mediana: 148,54
Moda: 18,83
Desviación Estándar: 295,97
Curtosis: 11,98
Coeficiente de Asimetría: 2,74

Distribución de la Densidad por Clases Diamétricas

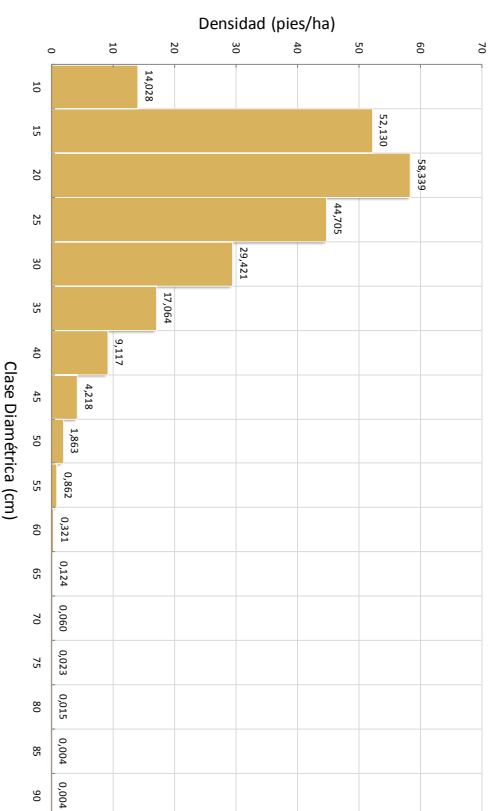


Pinus pinea

No. de Parcelas: 23.698
Mínimo: 0,00
Máximo: 389,18
Media: 6,62
Mediana: 0,00
Moda: 0,00
Desviación Estándar: 17,54
Curtosis: 47,20
Coeficiente de Asimetría: 5,44

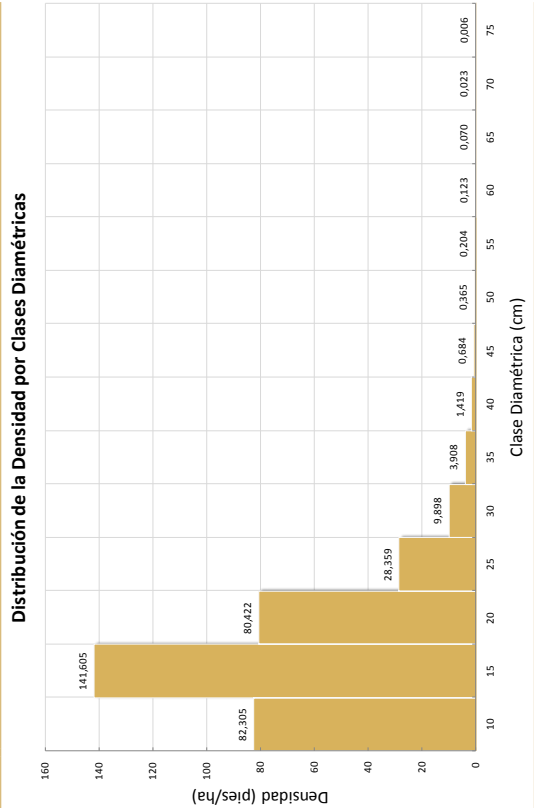
No. de Parcelas: 23.698
Mínimo: 5
Máximo: 4.205
Media: 232,30
Mediana: 169,77
Moda: 18,83
Desviación Estándar: 229,80
Curtosis: 21,68
Coeficiente de Asimetría: 3,12

Distribución de la Densidad por Clases Diamétricas



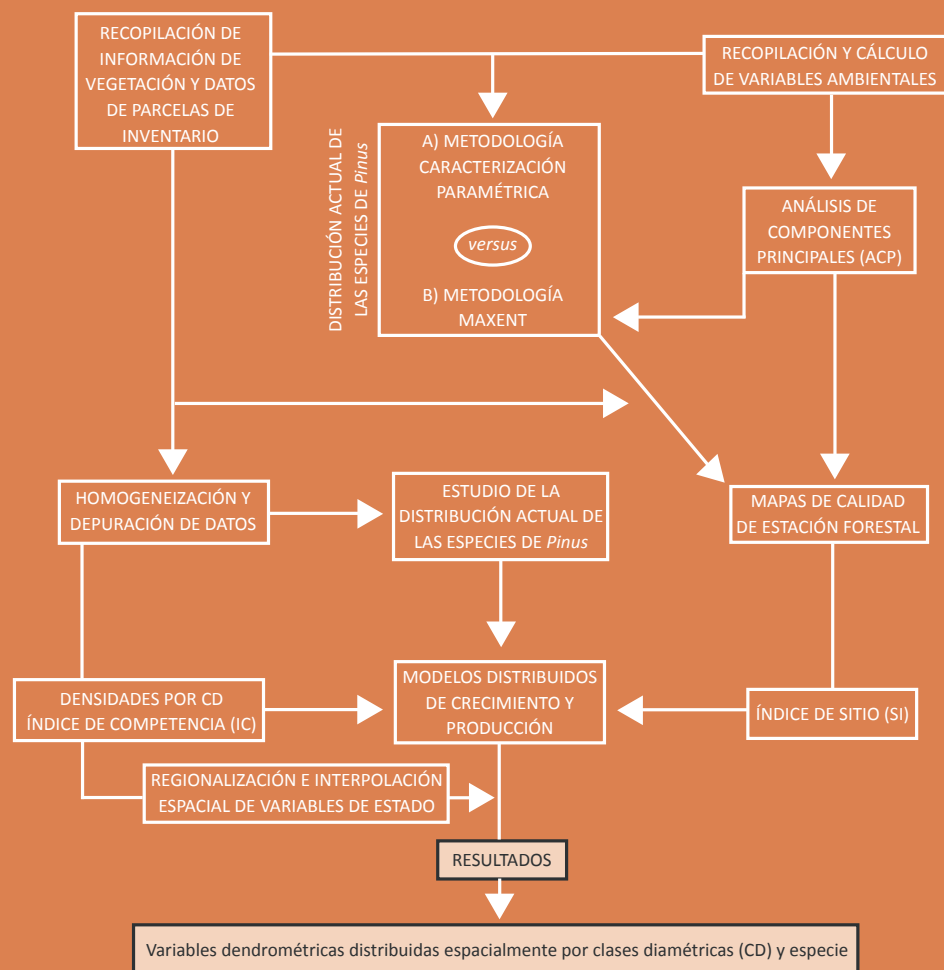
No. de Parcelas: 3213
Mínimo: 0,00
Máximo: 320,59
Media: 53,76
Mediana: 43,99
Moda: 0,00
Desviación Estándar: 50,54
Curtosis: 1,54
Coeficiente de Asimetría: 1,15

No. de Parcelas: 3.213
Mínimo: 14
Máximo: 3.117
Media: 349,39
Mediana: 226,00
Moda: 14,00
Desviación Estándar: 378,19
Curtosis: 5,72
Coeficiente de Asimetría: 1,98





Resultados



11.1. Introducción

Los resultados se han integrado en un SIG específico (malla de 100 x 100 m), consultable en la Red de Información Ambiental de Andalucía.

Como resultado de la aplicación de la metodología desarrollada en los anteriores apartados y de la aplicación de los modelos de crecimiento y producción se ha obtenido un amplio catálogo de información ráster para toda la región andaluza con resolución 100x100 actualizados al año 2011:

En la **Tabla 11.1** se resumen las variables dendrométricas características por especie, que se han obtenido con el presente trabajo:

Tabla 11.1. Información ráster resultantes. Variables dendrométricas

VARIABLES RESULTANTES	DESCRIPCIÓN
Ni_CD	Nº de pies por cd y total
VCC	Volumen con corteza
VLE	Volumen de leñas
IAVC	Incremento anual de volumen con corteza
B _F	Biomasa de fuste (MONTERO <i>et al.</i> , 2005)
B _R	Biomasa radical (MONTERO <i>et al.</i> , 2005)
B _T	Biomasa total (MONTERO <i>et al.</i> , 2005)
Posibilidad	Posibilidad teórica de madera, a partir de la expresión clásica de la masa cortable (MACKAY, 1944)
W _{bf}	Biomasa ramas < 2 cm + acículas (RUIZ-PEINADO <i>et al.</i> , 2011)
W _{bg}	Biomasa de ramas > 7 cm (RUIZ-PEINADO <i>et al.</i> , 2011)
W _{bm}	Biomasa ramas 7-2 cm (RUIZ-PEINADO <i>et al.</i> , 2011)
W _r	Biomasa radical (RUIZ-PEINADO <i>et al.</i> , 2011)
W _s	Biomasa de fustes (RUIZ-PEINADO <i>et al.</i> , 2011)
W _{ta}	Biomasa total aérea (W _{bf} + W _{bm} + W _{bg} + W _s) (RUIZ-PEINADO <i>et al.</i> , 2011)

Para cada especie de pino se han obtenido los valores de las variables dendrométricas (**Tabla 11.1**) por clase diamétrica (**Tabla 11.2**) aplicando las ecuaciones que conforman el Modelo Distribuido de Crecimiento y Producción (**Capítulo 10**), calculando adicionalmente el total de cada variable dendrométrica como el sumatorio de los valores correspondientes a todas las clases diamétricas.

Por ello el número total información rasterizadas obtenida y en disposición de ser empleadas se indican en la **Tabla 11.2**

Tabla 11.2. Número de información ráster resultantes

ESPECIES	INTERVALO DE CD	Nº RÁSTER POR VARIABLE	Nº TOTAL RÁSTER
<i>Pinus halepensis</i>	cd 10 a cd 95	18 CD + Total x 14 variables	266
<i>Pinus pinaster</i>	cd 10 a cd 115	22 CD + Total x 13 variables (*)	299
<i>Pinus pinea</i>	cd 10 a cd 90	17 CD + Total x 14 variables	252
<i>Pinus nigra</i>	cd 10 a cd 115	22 CD + Total x 14 variables	322
<i>Pinus sylvestris</i>	cd 10 a cd 75	14 CD + Total x 14 variables	210
<i>Pinus spp</i> (**)	cd 10 a cd 115	22 CD + Total x 14 variables	322

(*) Para la especie *Pinus pinaster* RUIZ-PEINADO *et al.* (2011), abarca en un único modelo la biomasa de ramas W_{bg} y W_{bm} (W_{bmg})

(**) Información resultante de la agregación de las 5 especies de pinos analizadas

Aunque la información es consultable a diferentes niveles de agregación (rodal, cantón, cuartel, sección, monte, etc.), el procedimiento metodológico seguido ofrece unos resultados más robustos para una escala de trabajo de ámbito comarcal (escala de trabajo a partir de 1:25.000), presentando un grado de aproximación menor (debido principalmente a los procedimientos de interpolación espacial y temporal empleados) para estudios de grado más fino.

Por otra parte, es muy importante tener en cuenta que si bien a través de los modelos de crecimiento se ha llevado a cabo una homogeneización temporal de los datos de las parcelas de inventario (Proyectos de Ordenación e IFN3) a 2011, no se han contemplado las variaciones que se hayan podido producir en los montes inventariados desde que se tomaron los datos en campo en los inventarios (intervenciones selvícolas como claras, aprovechamientos, incendios o algún otro tipo de circunstancia), lo que introduce un elemento de incertidumbre que ha de ser evaluado y corregido en las consultas concretas a la base de datos del SIG a partir del conocimiento histórico reciente de la evolución del monte. En este sentido, los resultados deben considerarse como datos estimativos y orientativos que deben ser contrastados con las existencias reales a través de metodologías particularizadas para los montes de referencia.

Además, de este trabajo se ha derivado la siguiente información geográfica rasterizada con una resolución espacial de 100 m, igualmente integrada en la Red de Información Ambiental (REDIAM), y que puede ser de gran utilidad para el diseño de estudios previos, proyectos y experiencias que tengan como foco de atención las cinco especies de pinos de Andalucía.

VARIABLES AMBIENTALES

Variables Orográficas

- Elevación del terreno (m).
- Pendiente del relieve (grados).
- Curvatura media (1/m).
- Orientación del relieve (grados).
- Insolación (adimensional).

Variables Climáticas

- Precipitación anual (mm).
- Precipitación de invierno (mm).
- Precipitación de primavera (mm).
- Precipitación de verano (mm).
- Precipitación de otoño (mm).
- Temperatura media anual (°C).
- Temperatura media de las mínimas del mes más frío (°C).
- Temperatura media de las máximas del mes más cálido (°C).
- Oscilación térmica media (°C).
- Temperatura media del mes más frío (°C).
- Temperatura media del mes más cálido (°C).
- Oscilación térmica total (°C).
- Evapotranspiración de referencia anual (mm).
- Suma de superávits (mm).
- Suma de déficits (mm).
- Duración de la sequía (meses).
- Índice hídrico anual (adimensional).

Variables Edáficas

- Media ponderada del contenido de arena en todo el perfil del suelo (%).
- Media ponderada del contenido de limo en todo el perfil del suelo (%).
- Media ponderada del contenido de arcilla en todo el perfil del suelo (%).
- Profundidad del suelo hasta el horizonte R (cm).
- Media ponderada de la conductividad hidráulica saturada en todo el perfil del suelo (cm/día).
- Media ponderada de Materia Orgánica en el perfil del suelo (%).
- Contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo (%).
- Media ponderada del pH en todo el perfil del suelo.
- Media ponderada del contenido de tierra fina en todo el perfil del suelo (%).
- Caliza activa (%).

Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 gr).
Porcentaje de saturación de bases (%).
Contenido de nitrógeno en el horizonte superficial del suelo (%).
Media ponderada de la capacidad de retención del agua en todo el perfil del suelo (mm/m).

DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE LAS ESPECIES DE PINOS

Distribución actual *Pinus halepensis*.
Distribución actual *Pinus pinaster*.
Distribución actual *Pinus pinea*.
Distribución actual *Pinus nigra*.
Distribución actual *Pinus sylvestris*.

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LAS ESPECIES DE PINOS

Para cada especie de pino:

Caracterización Paramétrica

Número de variables ambientales con rango óptimo.
Índice de Potencialidad.
Clase de Potencialidad.

MaxEnt

Probabilidad de presencia.
Distribución potencial.

CALIDAD DE ESTACIÓN FORESTAL (ÍNDICE DE SITIO)

Para cada especie de pino:

Distribución Actual

Índice de Sitio.
Clase de Calidad de Estación.

Distribución Potencial (MaxEnt)

Índice de Sitio.
Clase de Calidad de Estación.

Así como la geodatabase resultante de la recopilación y normalización de las parcelas de inventario y división dasocrática, integrada de mismo modo y disponible en la Red de Información Ambiental (REDIAM).



11.2. Resultados por grandes áreas forestales de pinar

De modo ilustrativo se presenta una síntesis de los resultados para cada especie de pino agrupados por grandes áreas forestales de pinar en base a una zonificación realizada específicamente para este estudio (**Figura 11.1, Tablas de 11.3 a 11.5**). Los valores medios, desviación estándar, superficie de presencia y valor total de las distintas variables analizadas (volumen con corteza, volumen de leñas, incremento anual de volumen con corteza y posibilidad de madera para cada especie, así como los valores existencias de biomasa según los modelos de MONTERO *et al.*, 2005 y RUIZ-PEINADO *et al.*, 2011) se han obtenido mediante herramientas estándares SIG.

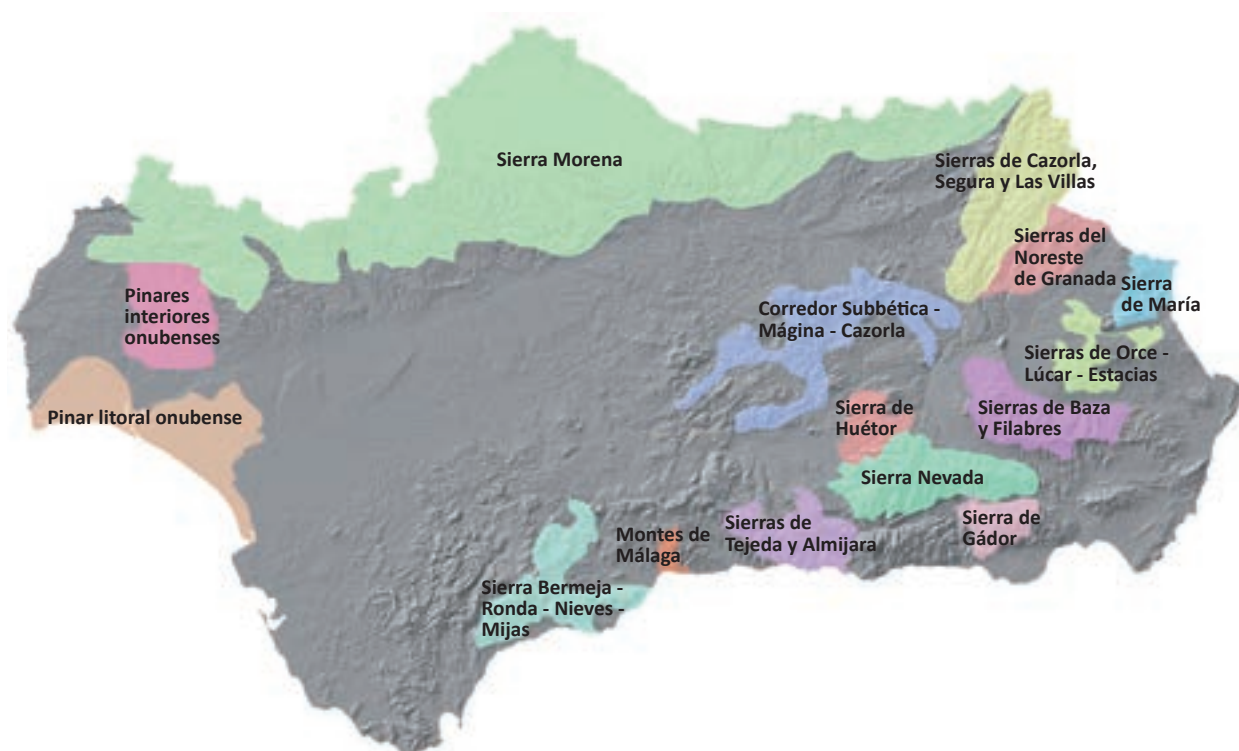


Figura 11.1. Distribución de grandes áreas forestales con presencia de pinar en Andalucía



Tabla 11.3. Resumen por especie de las variables volumen con corteza, volumen de leñas, incremento anual de volumen con corteza y posibilidad de madera por grandes áreas con presencia de pinar en Andalucía

<i>Pinus halepensis</i>												
ÁREA	ÁREA (ha)	VCC			VLE			IAVC			POSIBILIDAD DE MADERA	
		MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)	MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)	MEDIA (m³/ha año)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³/año)	MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR
SIERRA MORENA	9.852	12,60	8,62	124.270,0	1,25	0,71	12.338,7	1,05	0,48	10.301,3	0,68	0,34
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	80.761	36,72	31,23	2.978.660,0	3,13	2,45	254.072,0	2,10	1,55	169.558,0	1,51	1,15
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	29.527	28,83	21,21	852.255,0	2,53	1,69	74.874,4	1,42	0,90	41.935,5	1,07	0,70
SIERRA DE MARÍA	31.736	31,47	27,54	1.003.620,0	2,75	2,21	87.788,2	1,58	1,17	50.025,1	1,18	0,91
PINARES INTERIORES ONUBENSES	229	9,75	2,86	2.232,7	1,01	0,23	230,2	0,95	0,25	217,4	0,60	0,16
PINAR LITORAL ONUBENSE	508	9,47	0,28	4.811,7	0,98	0,03	497,7	0,88	0,10	445,6	0,56	0,05
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	41.617	35,03	33,90	1.457.850,0	2,96	2,65	123.247,0	2,09	1,81	87.119,3	1,48	1,31
MONTES DE MÁLAGA	7.715	80,94	49,81	624.440,0	6,33	3,66	48.839,5	3,89	2,15	30.002,4	2,96	1,67
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMUIJARA	39.827	24,03	19,99	957.492,0	2,16	1,62	85.952,2	1,25	0,92	49.855,3	0,93	0,70
SIERRA NEVADA	25.790	21,00	23,72	541.633,0	1,89	1,96	48.704,1	1,22	1,17	31.511,6	0,87	0,87
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	33.281	19,99	18,93	665.227,0	1,81	1,57	60.390,2	1,40	1,11	46.661,5	0,95	0,78
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	32.978	25,22	19,70	831.549,0	2,27	1,63	74.963,6	1,13	0,75	37.261,9	0,88	0,61
SIERRA DE HUÉTOR	15.794	27,79	23,37	438.946,0	2,44	1,89	38.565,4	1,61	1,28	25.380,5	1,15	0,89
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	69.405	25,74	26,40	1.786.530,0	2,26	2,09	156.805,0	1,37	1,28	94.888,4	1,01	0,95
SIERRA DE GÁDOR	20.347	22,38	10,81	455.424,0	2,05	0,90	41.708,4	1,47	0,65	29.863,0	1,01	0,43

Continuación

Pinus pinaster

ÁREA	ÁREA (ha)	VCC			VLE			IAVC			POSIBILIDAD		
		MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)	MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)	MEDIA (m³/ha año)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³/año)	MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)
SIERRA MORENA	98.271	35,32	41,41	3.478.130,0	1,97	2,13	193.652,0	2,91	3,22	285.517,0	1,89	2,11	186.173,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	86.823	69,09	68,97	6.015.760,0	3,26	2,94	283.813,0	4,38	4,10	380.016,0	3,06	2,89	265.307,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	1.244	10,87	10,49	13.518,6	0,55	0,47	682,4	0,68	0,57	843,0	0,47	0,41	590,5
SIERRA DE MARÍA	2.094	15,16	25,23	31.734,9	0,85	1,18	1.777,0	0,90	1,06	1.880,2	0,64	0,84	1.336,8
PINARES INTERIORES ONUBENSES	11.370	11,62	15,01	132.145,0	0,69	0,77	7.839,9	1,00	1,06	11.336,1	0,64	0,71	7.319,9
PINAR LITORAL ONUBENSE	2.239	12,17	6,71	27.465,1	0,78	0,42	1.762,1	1,14	0,64	2.551,7	0,72	0,40	1.617,7
SIERRAS BERMELA-RONDA-NIEVES-MIJAS	58.887	39,08	41,30	2.301.350,0	2,08	2,04	122.284,0	2,53	2,66	149.239,0	1,76	1,83	103.386,0
MONTES DE MÁLAGA	35	51,82	22,11	1.813,6	2,78	1,14	97,4	3,41	1,31	119,3	2,35	0,93	82,3
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMILARA	34.251	44,80	40,22	1.534.470,0	2,30	1,95	78.946,0	3,05	2,85	104.464,0	2,09	1,90	71.435,0
SIERRA NEVADA	38.307	52,28	45,94	2.002.510,0	2,92	2,41	111.789,0	3,62	3,20	138.800,0	2,47	2,15	94.431,5
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	31.324	32,10	34,37	1.005.460,0	1,99	1,94	62.279,7	2,43	2,49	76.150,2	1,62	1,66	50.643,4
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	7.261	18,90	16,80	137.244,0	1,06	0,81	7.662,0	1,51	1,31	10.954,6	0,99	0,84	7.192,9
SIERRA DE HUÉTOR	12.511	53,84	48,13	673.653,0	2,78	2,32	34.807,0	4,28	3,60	53.542,5	2,81	2,38	35.191,9
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	3.836	19,98	29,77	76.639,0	1,18	1,69	4.521,5	1,80	2,54	6.893,5	1,15	1,63	4.404,7
SIERRA DE GÁDOR	7.452	15,75	6,13	117.358,0	1,04	0,37	7.768,0	1,37	0,48	10.240,7	0,88	0,30	6.587,3

Continuación

Pinus nigra

ÁREA	ÁREA (ha)	VCC			VLE			IACV			POSIBILIDAD		
		MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)	MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)	MEDIA (m³/ha año)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³/año)	MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)
SIERRA MORENA	5	5,44	0,00	27,2	0,45	0,00	2,3	0,69	0,01	3,5	0,40	0,00	2,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	86.870	104,47	99,94	9.103.150,0	6,54	5,55	569.529,0	6,73	5,67	584.882,0	4,41	3,76	383.364,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	36.074	55,26	46,94	1.994.950,0	3,73	2,91	134.583,0	4,54	3,74	163.632,0	2,82	2,32	101.747,0
SIERRA DE MARÍA	1.076	18,66	26,24	20.074,1	1,34	1,76	1.444,4	0,93	1,03	998,8	0,65	0,77	700,1
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	594	7,56	0,04	4.490,6	0,64	0,00	381,1	0,73	0,07	430,7	0,44	0,03	260,2
SIERRAS DE TEJEDA Y VALMIJARA	1.923	36,75	33,77	70.665,5	2,58	2,16	4.965,6	3,40	3,28	6.540,5	2,07	1,97	3.976,9
SIERRA NEVADA	34.757	45,27	38,34	1.573.340,0	3,15	2,46	109.557,0	3,93	3,30	136.710,0	2,42	2,02	84.088,4
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	44.077	29,94	27,85	1.319.570,0	2,22	1,86	97.904,7	2,82	2,36	124.135,0	1,71	1,45	75.263,3
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	9.718	7,05	1,78	68.469,3	0,59	0,14	5.772,0	0,66	0,17	6.451,8	0,40	0,10	3.910,6
SIERRA DE HUÉTOR	2.368	32,76	31,19	77.585,2	2,29	2,01	5.433,0	2,73	2,39	6.467,6	1,69	1,50	4.009,7
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	4.308	34,19	42,37	147.305,0	2,40	2,72	10.358,4	2,49	2,94	10.730,9	1,59	1,87	6.838,5
SIERRA DE GÁDOR	7.584	19,40	13,13	147.153,0	1,51	0,93	11.488,6	1,59	0,98	12.088,2	0,99	0,62	7.515,6

Continuación

ÁREA	ÁREA (ha)	VCC			VLE			IAVC			POSIBILIDAD		
		MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)	MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)	MEDIA (m³/ha año)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³/año)	MEDIA (m³/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (m³)
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	38	1,76	0,51	66,8	0,17	0,03	6,4	0,20	0,04	7,7	0,12	0,03	4,4
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	48	1,62	0,32	77,9	0,17	0,03	8,3	0,18	0,03	8,6	0,10	0,02	5,0
SIERRA DE MARÍA	238	3,43	3,51	817,2	0,31	0,24	74,8	0,31	0,23	74,0	0,18	0,14	43,8
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	109	12,96	11,41	1.413,0	0,84	0,63	91,5	1,32	0,95	143,5	0,77	0,57	83,5
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	1.592	71,10	48,77	113.193,0	3,93	2,38	6.255,3	5,05	2,92	8.041,2	3,12	1,86	4.963,9
SIERRA NEVADA	49.603	47,19	39,25	2.340.860,0	3,02	2,19	149.753,0	3,31	2,50	164.328,0	2,05	1,56	101.671,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	30.731	24,25	25,81	745.330,0	1,79	1,52	55.161,6	1,83	1,55	56.337,1	1,12	0,98	34.379,6
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	180	0,84	0,19	150,8	0,12	0,02	21,1	0,16	0,02	28,8	0,09	0,01	15,6
SIERRA DE HUÉTOR	1.525	19,06	16,90	29.068,9	1,16	0,94	1.773,8	1,15	1,01	1.747,1	0,73	0,63	1.115,8
SIERRA DE GÁDOR	1.694	12,49	5,44	21.165,4	1,07	0,33	1.806,5	1,11	0,33	1.873,1	0,66	0,21	1.112,9

Tabla 11.4. Valores de biomasa según los modelos de MONTERO *et al.* 2005

Pinus halepensis										
ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL		
		MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)
SIERRA MORENA	9.852	5,50	3,14	54.236,7	3,22	1,82	31.782,2	10,55	5,99	104.069,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	80.761	13,22	10,13	1.071.870,0	7,96	6,18	645.679,0	25,68	19,79	2.082.750,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	29.527	10,99	7,05	324.769,0	6,48	4,27	191.569,0	21,14	13,72	624.991,0
SIERRA DE MARÍA	31.736	12,23	9,38	389.955,0	7,08	5,61	225.743,0	23,33	18,17	744.108,0
PINARES INTERIORES ONUBENSES	229	4,34	1,04	993,7	2,58	0,60	591,5	8,39	1,97	1.920,7
PINAR LITORAL ONUBENSE	508	4,26	0,12	2.162,7	2,52	0,07	1.280,7	8,21	0,23	4.170,7
SIERRAS BERMELA-RONDA-NIEVES-MIJAS	41.617	12,69	11,00	528.153,0	7,55	6,69	314.183,0	24,52	21,46	1.020.420,0
MONTES DE MÁLAGA	7.715	25,82	14,64	199.179,0	15,93	9,16	122.910,0	50,73	28,94	391.375,0
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	39.827	9,44	6,85	376.254,0	5,53	4,10	220.483,0	18,12	13,27	721.867,0
SIERRA NEVADA	25.790	8,69	8,71	224.007,0	4,90	5,03	126.287,0	16,38	16,60	422.324,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	33.281	8,49	6,99	282.558,0	4,72	4,03	157.199,0	15,91	13,31	529.484,0
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	32.978	10,39	7,24	342.557,0	5,89	4,19	194.117,0	19,63	13,81	647.342,0
SIERRA DE HUÉTOR	15.794	10,71	8,07	169.224,0	6,26	4,81	98.926,4	20,54	15,60	324.365,0
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	69.405	9,83	8,73	682.371,0	5,78	5,28	401.478,0	18,90	16,99	1.311.660,0
SIERRA DE GÁDOR	20.347	9,46	3,86	192.574,0	5,32	2,30	108.297,0	17,82	7,45	362.667,0

Continuación

<i>Pinus pinaster</i>										
ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL		
		MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)
SIERRA MORENA	98.271	19,82	22,13	1.951.650,0	6,83	7,47	672.635,0	24,08	26,68	2.371.020,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	86.823	37,07	35,15	3.228.020,0	11,84	10,87	1.031.170,0	43,79	41,02	3.813.320,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	1.244	6,22	5,65	7.743,8	1,99	1,75	2.481,2	7,36	6,61	9.156,0
SIERRA DE MARÍA	2.094	8,59	13,40	17.997,3	2,95	4,28	6.176,9	10,42	15,82	21.816,7
PINARES INTERIORES ONUBENSES	11.370	6,80	8,13	77.278,8	2,38	2,71	27.023,3	8,30	9,76	94.367,6
PINAR LITORAL ONUBENSE	2.239	7,27	3,83	16.404,0	2,64	1,41	5.948,8	9,00	4,76	20.307,0
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	58.887	21,73	21,86	1.279.800,0	7,31	7,23	430.663,0	26,17	26,12	1.540.920,0
Montes de Málaga	35	28,90	12,16	1.011,5	9,78	4,04	342,4	34,89	14,58	1.221,1
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	34.251	24,84	21,46	850.732,0	8,21	7,00	281.171,0	29,71	25,53	1.017.580,0
SIERRA NEVADA	38.307	29,12	24,63	1.115.630,0	10,09	8,38	386.604,0	35,45	29,76	1.357.890,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	31.324	18,42	18,79	577.096,0	6,69	6,63	209.576,0	22,82	23,03	714.712,0
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	7.261	10,91	9,32	79.204,1	3,70	2,94	26.851,4	13,16	10,94	95.570,6
SIERRA DE HUÉTOR	12.511	29,55	25,36	369.676,0	9,85	8,28	123.276,0	35,46	30,19	443.686,0
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	3.836	11,51	16,59	44.138,6	4,05	5,81	15.529,1	14,09	20,27	54.035,2
SIERRA DE GÁDOR	7.452	9,42	3,51	70.220,2	3,48	1,24	25.926,0	11,74	4,30	87.497,2

Continuación

Pinus pinea

ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL		
		MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL
		(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)
SIERRA MORENA	221.825	17,03	16,18	3.782.810,0	7,36	6,94	1.635.110,0	40,15	37,60	8.917.680,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	1.019	11,89	5,35	12.314,7	5,03	2,21	5.211,5	26,95	11,63	27.918,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	171	4,36	0,08	745,1	1,86	0,03	317,4	10,00	0,18	1.710,1
SIERRA DE MARÍA	231	4,31	0,00	995,7	1,84	0,00	424,5	9,90	0,00	2.287,8
PINARES INTERIORES ONUBENSES	47.986	13,50	11,10	647.986,0	5,90	4,79	282.932,0	32,43	26,13	1.556.240,0
PINAR LITORAL ONUBENSE	112.688	23,08	19,53	2.629.510,0	9,93	8,28	1.131.740,0	53,97	44,47	6.149.850,0
SIERRAS BERMELA-RONDA-NIEVES-MIJAS	9.567	13,71	10,92	131.251,0	5,92	4,65	56.639,3	32,23	25,05	308.537,0
MONTES DE MÁLAGA	134	10,05	3,27	1.346,5	4,29	1,37	574,4	23,12	7,27	3.098,2
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	1.074	4,95	1,06	5.319,9	2,17	0,46	2.325,3	11,92	2,51	12.800,8
SIERRA NEVADA	280	6,46	0,00	1.808,0	2,81	0,00	785,5	15,36	0,01	4.301,8
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	466	3,63	0,06	1.690,1	1,55	0,03	722,2	8,37	0,15	3.900,8
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	575	3,95	0,20	2.269,8	1,69	0,08	969,8	9,11	0,45	5.237,5
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	146	4,95	0,68	722,4	2,12	0,30	309,0	11,44	1,63	1.670,5

Continuación

<i>Pinus nigra</i>										
ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL		
		MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)
SIERRA MORENA	5	3,54	0,00	17,7	1,33	0,00	6,7	5,39	0,00	27,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	86.870	52,58	45,60	4.581.900,0	18,97	16,00	1.653.290,0	80,53	70,18	7.017.310,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	36.074	29,61	23,20	1.069.070,0	10,86	8,45	392.245,0	45,23	35,48	1.632.720,0
SIERRA DE MARÍA	1.076	10,55	13,83	11.353,4	3,93	5,14	4.224,1	16,08	21,07	17.299,0
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	594	4,94	0,02	2.934,8	1,89	0,01	1.122,2	7,49	0,03	4.451,1
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	1.923	20,12	16,80	38.686,2	7,57	6,33	14.547,8	30,60	25,54	58.836,9
SIERRA NEVADA	34.757	24,34	19,07	846.062,0	9,25	7,21	321.631,0	36,96	28,99	1.284.460,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	44.077	16,77	14,28	739.004,0	6,56	5,47	289.296,0	25,33	21,66	1.116.540,0
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	9.718	4,40	1,04	42.785,6	1,77	0,42	17.156,6	6,62	1,56	64.380,8
SIERRA DE HUÉTOR	2.368	17,85	15,76	42.257,4	6,72	5,87	15.923,1	27,13	24,00	64.247,4
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	4.308	18,81	21,54	81.034,2	7,04	7,95	30.318,3	28,63	32,86	123.352,0
SIERRA DE GÁDOR	7.584	11,41	7,15	86.501,0	4,48	2,75	33.988,4	17,22	10,84	130.607,0

Continuación

Pinus sylvestris

ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL		
		MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL
		(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	38	0,98	0,21	37,3	0,37	0,08	13,9	1,54	0,35	58,4
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	48	1,37	0,31	66,0	0,52	0,12	24,7	2,18	0,48	104,7
SIERRA DE MARÍA	238	2,57	2,02	612,7	0,96	0,74	228,3	3,99	2,91	948,9
SIERRAS BERMELA-RONDA-NIEVES-MIJAS	109	8,29	6,61	903,3	3,02	2,39	329,5	11,85	9,12	1.292,1
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	1.592	41,40	25,39	65.915,4	14,96	9,15	23.815,7	57,19	34,73	91.042,5
SIERRA NEVADA	49.603	28,34	21,45	1.405.870,0	10,40	7,80	516.035,0	41,55	30,56	2.060.860,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	30.731	15,26	14,54	468.867,0	5,67	5,29	174.378,0	23,52	20,80	722.668,0
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	180	0,77	0,17	138,1	0,30	0,06	53,4	1,36	0,26	245,1
SIERRA DE HUÉTOR	1.525	11,95	9,85	18.221,1	4,33	3,56	6.606,1	16,72	13,58	25.497,5
SIERRA DE GÁDOR	1.694	8,60	3,34	14.572,2	3,23	1,22	5.465,8	13,66	4,74	23.139,3

Tabla 11.5. Valores de biomasa según los modelos de RUIZ-PEINADO et al. 2011

Pinus halepensis													
ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA COPAS (RAMAS+ACÍCULAS)			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL ÁREA		
		MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)
SIERRA MORENA	9.852	5,61	3,92	55.288,6	4,9	3,1	48.813,3	3,34	1,92	32.943,7	10,55	6,96	104.102,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	80.761	18,14	16,56	1.471.390,0	16,3	15,5	1.324.120,0	7,84	5,95	636.061,0	34,47	31,99	2.795.510,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	29.527	13,56	11,29	400.939,0	11,7	10,4	346.867,0	6,64	4,19	196.265,0	25,30	21,61	747.806,0
SIERRA DE MARÍA	31.736	14,16	13,74	451.665,0	12,0	12,3	382.759,0	7,50	5,60	239.294,0	26,16	25,97	834.423,0
PINARES INTERIORES ONUBENSES	229	4,44	1,27	1.016,3	4,0	1,1	911,2	2,60	0,64	595,0	8,42	2,32	1.927,5
PINAR LITORAL ONUBENSE	508	4,25	0,13	2.159,9	3,7	0,1	1.895,6	2,56	0,07	1.300,0	7,98	0,26	4.055,5
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	41.617	16,84	17,49	700.772,0	14,7	15,8	610.840,0	7,61	6,49	316.713,0	31,52	33,27	1.311.610,0
Montes de Málaga	7.715	42,58	27,70	328.514,0	39,5	26,9	304.475,0	14,99	8,43	115.677,0	82,05	54,55	632.989,0
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	39.827	11,09	10,23	441.956,0	9,8	9,4	388.946,0	5,74	4,11	228.717,0	20,85	19,58	830.902,0
SIERRA NEVADA	25.790	8,84	10,72	228.020,0	7,4	8,5	191.743,0	5,45	5,37	140.557,0	16,28	19,23	419.763,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	33.281	8,18	8,58	272.232,0	7,1	6,8	236.416,0	5,39	4,31	179.330,0	15,28	15,35	508.649,0
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCÍAS	32.978	10,73	9,07	353.722,0	9,0	7,3	295.881,0	6,49	4,45	214.013,0	19,70	16,33	649.603,0
SIERRA DE HUÉTOR	15.794	12,74	11,56	201.195,0	10,8	10,2	170.797,0	6,52	4,84	102.971,0	23,55	21,69	371.992,0
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	69.405	12,03	13,60	834.997,0	10,6	12,4	733.786,0	5,95	5,18	413.235,0	22,60	25,98	1.568.780,0
SIERRA DE GÁDOR	20.347	9,29	5,38	189.100,0	7,7	4,8	157.572,0	5,95	2,34	121.050,0	17,04	10,12	346.672,0

Continuación

Pinus pinaster

ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA COPAS (RAMAS+ACÍCULAS)			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL AÉREA		
		MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL
		(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)
SIERRA MORENA	98.271	16,22	18,71	1.597.410,0	5,0	5,7	497.069,0	6,07	6,98	597.377,0	21,27	24,37	2.094.480,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	86.823	30,93	30,28	2.693.160,0	9,7	9,3	842.029,0	12,49	12,37	1.087.730,0	40,60	39,59	3.535.190,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	1.244	4,93	4,66	6.127,1	1,6	1,5	2.025,2	2,09	1,97	2.605,9	6,55	6,14	8.152,3
SIERRA DE MARÍA	2.094	6,96	11,24	14.563,8	2,2	3,5	4.639,7	2,67	4,52	5.580,7	9,17	14,72	19.203,5
PINARES INTERIORES ONUBENSES	11.370	5,40	6,79	61.375,9	1,7	2,1	19.719,9	2,05	2,60	23.283,6	7,13	8,86	81.095,8
PINAR LITORAL ONUBENSE	2.239	5,73	3,13	12.932,7	1,8	1,0	4.166,7	2,09	1,09	4.706,4	7,58	4,11	17.099,4
SIERRAS BERMELA-RONDA-NIEVES-MIJAS	58.887	17,80	18,51	1.048.320,0	5,6	5,6	328.436,0	6,87	7,13	404.491,0	23,38	24,16	1.376.760,0
MONTES DE MÁLAGA	35	23,67	10,03	828,6	7,3	3,1	256,9	9,02	3,88	315,5	31,02	13,13	1.085,5
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMUIJARA	34.251	20,33	18,02	696.372,0	6,4	5,5	219.285,0	8,03	7,07	274.910,0	26,73	23,55	915.657,0
SIERRA NEVADA	38.307	23,98	20,80	918.676,0	7,4	6,3	284.672,0	8,87	7,73	339.732,0	31,41	27,09	1.203.350,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	31.324	14,98	15,77	469.264,0	4,7	4,8	146.795,0	5,28	5,59	165.453,0	19,67	20,53	616.059,0
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	7.261	8,69	7,52	63.080,8	2,8	2,5	20.543,8	3,44	3,28	24.982,5	11,52	10,02	83.624,6
SIERRA DE HUÉTOR	12.511	24,41	21,51	305.406,0	7,6	6,5	94.833,0	9,43	8,36	117.971,0	31,99	28,05	400.239,0
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	3.836	9,27	13,70	35.549,4	2,9	4,2	11.204,8	3,43	4,97	13.153,1	12,19	17,90	46.754,2
SIERRA DE GÁDOR	7.452	7,45	2,84	55.497,8	2,4	0,9	17.890,6	2,65	1,05	19.715,8	9,85	3,73	73.388,4

Continuación

Pinus pinea													
ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA COPAS (RAMAS+ACÍCULAS)			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL ÁREA		
		MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)
SIERRA MORENA	221.825	15,48	16,25	3.437.540,0	11,8	10,3	2.628.590,0	9,69	8,62	2.153.290,0	27,34	26,39	6.063.840,0
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	1.019	12,18	6,82	12.617,0	8,1	3,7	8.214,6	5,50	2,02	5.694,5	20,35	10,53	20.739,8
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	171	3,87	0,08	661,7	2,9	0,1	500,8	2,15	0,03	368,2	6,80	0,14	1.162,5
SIERRA DE MARÍA	231	3,81	0,00	879,5	2,9	0,0	668,0	2,14	0,00	494,7	6,70	0,00	1.547,6
PINARES INTERIORES ONUBENSES	47.986	11,33	10,62	543.769,0	10,0	7,4	478.293,0	8,46	6,38	405.794,0	21,30	17,81	1.022.060,0
PINAR LITORAL ONUBENSE	112.688	21,61	20,92	2.462.130,0	15,6	12,5	1.757.570,0	12,58	9,33	1.433.420,0	37,31	33,37	4.204.350,0
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	9.567	12,53	11,71	119.914,0	9,6	7,2	91.598,1	7,75	5,68	74.233,8	22,10	18,71	211.388,0
MONTES DE MÁLAGA	134	9,12	3,58	1.222,7	6,7	2,2	900,7	5,02	1,39	673,1	15,85	5,82	2.123,4
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	1.074	3,69	0,85	3.966,4	3,8	0,7	4.133,3	3,13	0,61	3.362,1	7,54	1,54	8.099,7
SIERRA NEVADA	280	5,04	0,00	1.409,9	4,6	0,0	1.288,1	3,84	0,00	1.074,4	9,64	0,00	2.698,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	466	3,17	0,06	1.475,6	2,5	0,0	1.148,2	1,85	0,03	862,3	5,63	0,10	2.623,7
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	575	3,45	0,19	1.983,8	2,6	0,1	1.520,0	2,01	0,08	1.154,0	6,09	0,33	3.503,8
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	146	4,26	0,55	621,5	3,4	0,5	499,4	2,55	0,44	372,8	7,68	1,03	1.120,9

Continuación

Pinus nigra

ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA COPAS (RAMAS+ACÍCULAS)			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL AÉREA		
		MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL	MEDIA	DESVIACIÓN	TOTAL
		(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)	(tm/ha)	ESTANDAR	(tm)
SIERRA MORENA	5	2,91	0,00	14,6	2,0	0,0	9,8	1,29	0,00	6,4	4,87	0,00	24,4
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	86.870	54,35	50,89	4.736.110,0	27,7	23,1	2.410.260,0	18,71	16,01	1.630.690,0	82,01	73,86	7.146.370,0
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	36.074	29,13	24,64	1.051.710,0	15,8	12,1	569.745,0	10,62	8,29	383.558,0	44,91	36,66	1.621.450,0
SIERRA DE MARÍA	1.076	9,93	13,97	10.684,8	5,8	7,6	6.229,5	3,81	4,99	4.100,7	15,72	21,54	16.914,3
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	594	4,11	0,02	2.441,3	3,0	0,0	1.757,5	1,81	0,01	1.074,2	7,07	0,03	4.198,8
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	1.923	19,75	18,19	37.978,6	11,2	9,4	21.563,9	7,30	6,10	14.046,1	30,96	27,58	59.542,5
SIERRA NEVADA	34.757	24,54	20,71	852.897,0	14,3	11,0	495.612,0	8,88	6,94	308.781,0	38,80	31,60	1.348.510,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	44.077	16,58	15,19	730.776,0	11,3	8,8	496.639,0	6,21	5,23	273.509,0	27,85	23,94	1.227.410,0
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	9.718	3,97	1,00	38.612,3	3,3	0,8	31.689,9	1,65	0,39	16.020,5	7,23	1,76	70.302,3
SIERRA DE HUÉTOR	2.368	17,63	16,66	41.755,2	10,1	8,5	23.855,5	6,49	5,70	15.357,4	27,71	25,14	65.610,7
CORREDOR SUBBÉTICA-MÁGINA-CAZORLA	4.308	18,29	22,48	78.810,0	10,4	11,3	44.892,8	6,81	7,75	29.348,4	28,71	33,77	123.703,0
SIERRA DE GÁDOR	7.584	10,77	7,18	81.711,8	7,7	4,4	58.732,6	4,23	2,62	32.073,1	18,52	11,55	140.444,0

Continuación

<i>Pinus sylvestris</i>													
ÁREA	ÁREA (ha)	BIOMASA FUSTE			BIOMASA COPAS (RAMAS+ACÍCULAS)			BIOMASA RADICAL			BIOMASA TOTAL ÁREA		
		MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	TOTAL (tm)
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	38	0,73	0,23	27,9	1,5	0,1	55,3	1,03	0,16	39,2	2,19	0,31	83,1
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	48	0,67	0,13	32,0	1,6	0,2	78,6	1,08	0,19	52,0	2,31	0,32	110,6
SIERRA DE MARÍA	238	1,44	1,53	343,7	2,5	1,4	595,1	1,95	1,45	463,7	3,94	2,86	938,8
SIERRAS BERMEJA-RONDA-NIEVES-MIJAS	109	5,74	5,17	625,4	4,5	2,8	488,9	5,01	3,68	546,5	10,22	7,88	1.114,3
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIIJARA	1.592	32,21	22,56	51.279,2	17,6	9,6	28.015,5	23,10	13,99	36.771,1	49,81	31,45	79.294,7
SIERRA NEVADA	49.603	20,99	17,90	1.041.060,0	16,1	10,8	800.740,0	18,29	13,20	907.483,0	37,13	27,49	1.841.800,0
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	30.731	10,59	11,75	325.462,0	11,5	8,0	354.885,0	11,16	9,25	343.108,0	22,14	18,87	680.347,0
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	180	0,33	0,08	59,7	1,5	0,2	273,5	0,78	0,12	140,0	1,85	0,25	333,2
SIERRA DE HUÉTOR	1.525	8,51	7,67	12.981,7	5,9	4,4	9.015,6	6,89	5,56	10.499,6	14,42	11,79	21.997,3
SIERRA DE GÁDOR	1.694	5,33	2,41	9.031,5	8,0	1,3	13.570,3	6,71	1,93	11.370,6	13,34	3,48	22.601,8

En la **Tabla 11.6** se muestran los datos de biomasa total aérea de las especies de coníferas analizadas, según los modelos de RUIZ PEINADO, *et al.*, 2011, particularizadas para estas grandes áreas, pero incluyendo sólo la superficie de presencia de pinos donde la biomasa aérea total alcanza valores a partir del modelo superior a 10 tm/ha. Esta restricción se realiza con el objetivo de descartar la superficie forestal ocupada por un pinar ralo, disperso o en el que estén presente solamente las primeras clases de edad.

Tabla 11.6. Valores de biomasa total aérea según los modelos de RUIZ-PEINADO *et al.* (2011), para coníferas analizadas por grandes áreas con presencia de pinar en Andalucía

BIOMASA TOTAL AÉREA				
NOMBRE	SUP. PRESENCIA (ha)	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	BIOMASA TOTAL (tm)
SIERRA MORENA	193.789	37,55	29,79	7.276.030
SIERRAS DE CAZORLA, SEGURA Y LAS VILLAS	162.207	81,47	64,23	13.215.000
SIERRAS DEL NORESTE DE GRANADA	47.187	48,88	35,86	2.306.700
SIERRA DE MARÍA	23.158	34,91	27,27	808.480
PINARES INTERIORES ONUBENSES	36.267	26,19	16,98	949.762
PINAR LITORAL ONUBENSE	91.606	41,42	28,92	3.793.960
SIERRAS BERMEJA - RONDA - NIEVES - MIJAS	70.184	38,32	30,72	2.689.310
MONTES DE MÁLAGA	7.673	82,82	54,14	635.482
SIERRAS DE TEJEDA Y ALMIJARA	45.939	38,40	29,95	1.763.910
SIERRA NEVADA	68.606	67,55	46,27	4.634.100
SIERRAS DE BAZA Y FILABRES	62.456	44,35	32,93	2.769.940
SIERRAS DE ORCE - LÚCAR - ESTANCIAS	22.911	28,34	16,52	649.305
SIERRA DE HUÉTOR	21.104	38,38	27,17	809.998
CORREDOR SUBBÉTICA - MAGINA - CAZORLA	46.018	34,37	29,41	1.581.780
SIERRA DE GÁDOR	22.265	22,68	12,97	505.013
SUBTOTAL	921.370	48,18		44.388.770
OTRAS	121.861	42,64	25,71	5.196.900
TOTAL	1.043.231	47,53		49.585.670



11.3. Resultados por provincias

A modo de resumen, se aportan los valores de biomasa total aérea (según RUIZ PEINADO *et al.*, 2011) para las distintas provincias andaluzas y para cada especie (**Tablas 11.7, 11.8, 11.9, 11.10 y 11.11**), considerando solamente la superficie forestal de pinar que superan, según el modelo aplicado, 10 tm/ha.

Adicionalmente se presentan los mapas correspondientes a la distribución territorial. También se muestra de manera gráfica la bondad del ajuste de la interpolación espacial, tras aplicar el software VESPER (MINASNY *et al.*, 2005) (**Figuras 11.2, 11.3, 11.4, 11.5 y 11.6**).

Tabla 11.7. Valores de biomasa total aérea según los modelos de RUIZ-PEINADO *et al.* (2011), para *Pinus halepensis* y provincia

BIOMASA <i>Pinus halepensis</i>					
PROVINCIA	SUP PRESENCIA (ha)	MODELOS CALCULADOS	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	BIOMASA TOTAL (tm)
Almería	69.085	Biomasa de fustes	15,05	11,24	1.039.840
		Biomasa copas	12,56	9,82	867.917
		Biomasa total aérea	27,61	21,06	1.907.757
Cádiz	2.795	Biomasa de fustes	16,48	12,12	46.068
		Biomasa copas	14,20	10,05	39.679
		Biomasa total aérea	30,68	22,17	85.747
Córdoba	2.674	Biomasa de fustes	9,20	4,74	24.595
		Biomasa copas	7,80	3,83	20.857
		Biomasa total aérea	17,00	8,57	45.452
Granada	101.941	Biomasa de fustes	14,86	9,78	1.514.840
		Biomasa copas	12,78	8,80	1.302.440
		Biomasa total aérea	27,64	18,58	2.817.280
Huelva	30	Biomasa de fustes	6,35	2,99	191
		Biomasa copas	5,77	2,29	173
		Biomasa total aérea	12,12	5,27	364
Jaén	107.274	Biomasa de fustes	19,68	16,06	2.110.720
		Biomasa copas	17,56	15,05	1.883.940
		Biomasa total aérea	37,24	31,10	3.994.660
Málaga	51.616	Biomasa de fustes	23,90	20,60	1.233.820
		Biomasa copas	21,10	19,37	1.089.120
		Biomasa total aérea	45,00	39,96	2.322.940
Sevilla	1.774	Biomasa de fustes	16,84	18,52	29.880
		Biomasa copas	15,44	17,96	27.385
		Biomasa total aérea	32,28	36,49	57.265
ANDALUCÍA	337.189	Biomasa de fustes	17,79		5.999.954
		Biomasa copas	15,52		5.231.511
		Biomasa total aérea	33,31		11.231.464

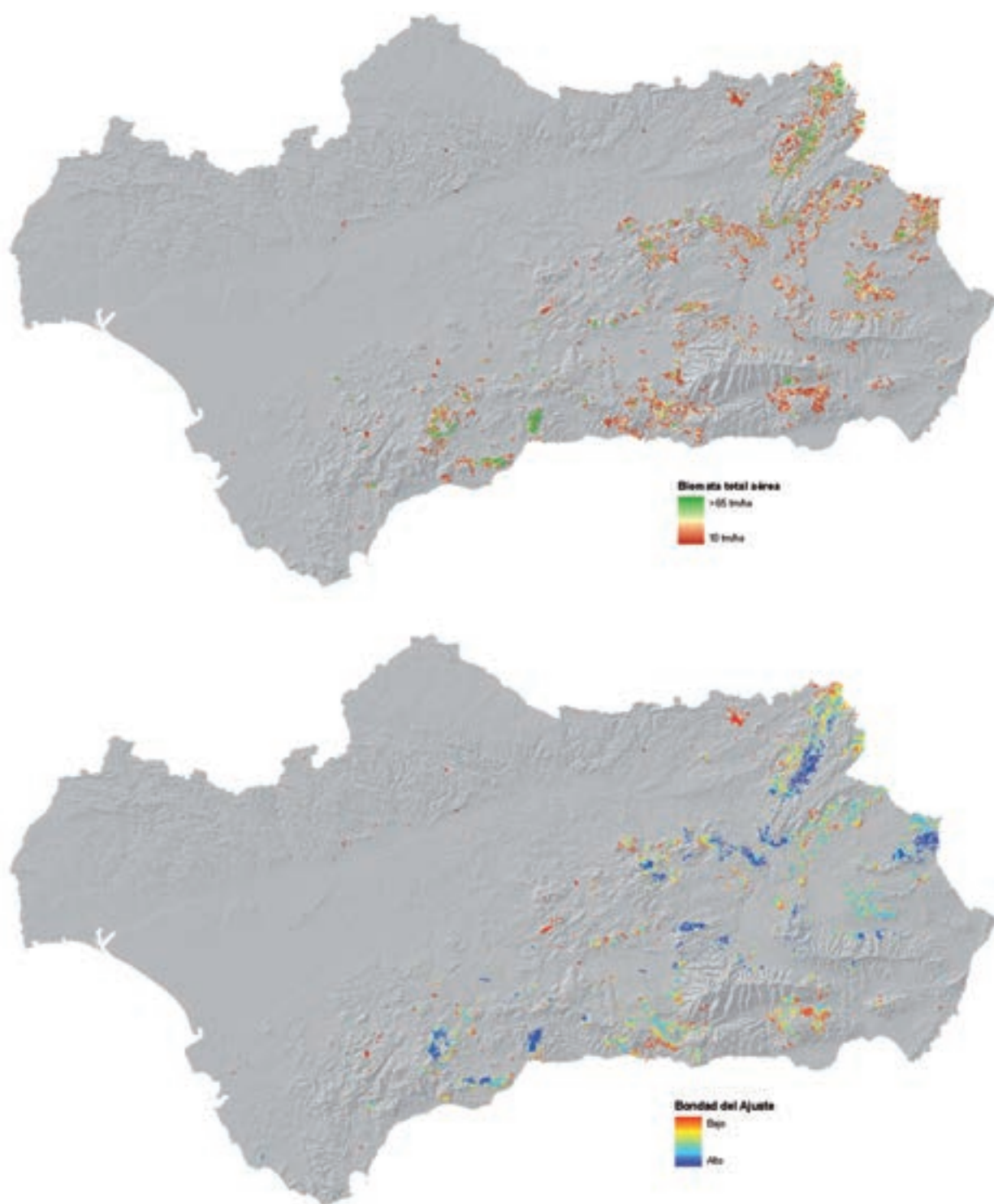


Figura 11.2. Distribución de biomasa total aérea mayor de 10 tm/ha y bondad de ajuste de *Pinus halepensis*

Tabla 11.8. Valores de biomasa total aérea según los modelos de RUIZ-PEINADO *et al.* (2011), para *Pinus pinaster* y provincia

BIOMASA <i>Pinus pinaster</i>					
PROVINCIA	SUP PRESENCIA (ha)	MODELOS CALCULADOS	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	BIOMASA TOTAL (tm)
Almería	26.009	Biomasa de fustes	22,66	18,46	589.458
		Biomasa copas	7,04	5,54	183.069
		Biomasa total aérea	29,70	24,00	772.527
Cádiz	4.146	Biomasa de fustes	28,04	31,67	116.263
		Biomasa copas	8,70	9,49	36.065
		Biomasa total aérea	36,74	41,16	152.328
Córdoba	28.358	Biomasa de fustes	24,94	19,82	707.291
		Biomasa copas	7,72	5,93	218.940
		Biomasa total aérea	32,66	25,75	926.231
Granada	60.953	Biomasa de fustes	26,96	18,92	1.643.550
		Biomasa copas	8,40	5,75	511.986
		Biomasa total aérea	35,36	24,67	2.155.536
Huelva	10.199	Biomasa de fustes	23,35	19,08	238.118
		Biomasa copas	7,24	5,76	73.880
		Biomasa total aérea	30,59	24,84	311.998
Jaén	93.978	Biomasa de fustes	34,15	29,02	3.209.290
		Biomasa copas	10,65	8,89	1.000.510
		Biomasa total aérea	44,80	37,92	4.209.800
Málaga	49.424	Biomasa de fustes	23,48	19,24	1.160.310
		Biomasa copas	7,34	5,84	362.845
		Biomasa total aérea	30,82	25,09	1.523.155
Sevilla	895	Biomasa de fustes	14,38	12,11	12.874
		Biomasa copas	4,51	3,69	4.032
		Biomasa total aérea	18,89	15,80	16.907
ANDALUCÍA	273.962	Biomasa de fustes	28,02		7.677.154
		Biomasa copas	8,73		2.391.327
		Biomasa total aérea	36,75		10.068.481



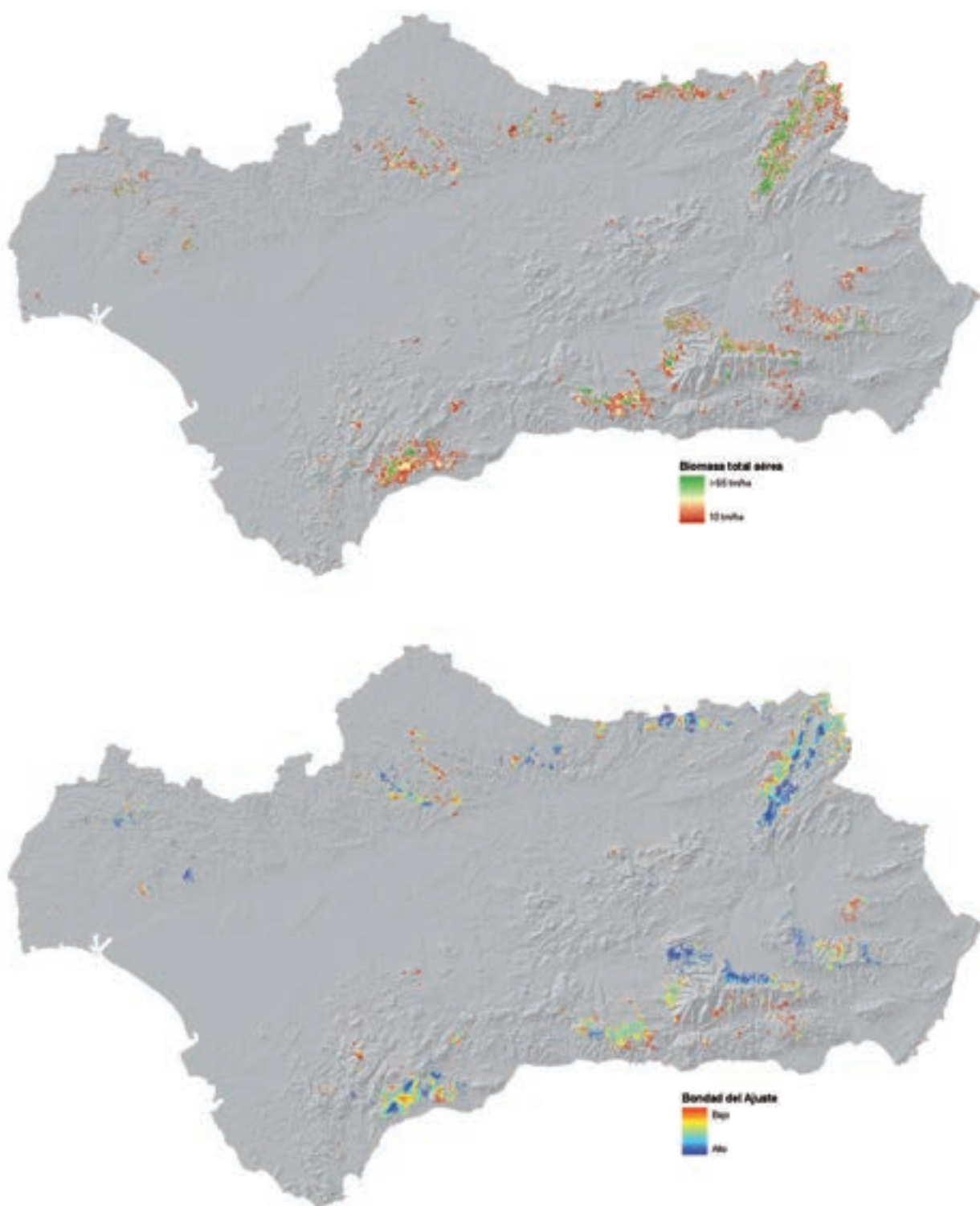


Figura 11.3. Distribución de biomasa total aérea mayor de 10 tm/ha y bondad de ajuste de *Pinus pinaster*

Tabla 11.9. Valores de biomasa total aérea según los modelos de RUIZ-PEINADO *et al.* (2011), para *Pinus pinea* y provincia

BIOMASA <i>Pinus pinea</i>					
PROVINCIA	SUP PRESENCIA (ha)	MODELOS ALCULADOS	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	BIOMASA TOTAL (tm)
Cádiz	20.687	Biomasa de fustes	27,54	20,47	569.780
		Biomasa copas	18,63	12,07	385.421
		Biomasa total aérea	46,17	32,38	955.201
Córdoba	77.944	Biomasa de fustes	19,67	15,22	1.533.350
		Biomasa copas	14,33	9,58	1.116.920
		Biomasa total aérea	34,00	24,65	2.650.260
Huelva	151.552	Biomasa de fustes	22,31	19,25	3.381.000
		Biomasa copas	16,46	11,50	2.495.170
		Biomasa total aérea	38,77	30,61	5.876.170
Jaén	61.526	Biomasa de fustes	20,30	16,88	1.248.860
		Biomasa copas	15,25	10,09	937.990
		Biomasa total aérea	35,54	26,71	2.186.850
Málaga	7.783	Biomasa de fustes	16,94	12,18	131.865
		Biomasa copas	12,46	7,27	96.979
		Biomasa total aérea	29,40	19,23	228.845
Sevilla	29.744	Biomasa de fustes	19,44	15,62	578.080
		Biomasa copas	13,61	9,63	404.942
		Biomasa total aérea	33,05	25,19	983.022
ANDALUCÍA	349.236	Biomasa de fustes	21,31		7.442.935
		Biomasa copas	15,57		5.437.422
		Biomasa total aérea	36,88		12.880.348



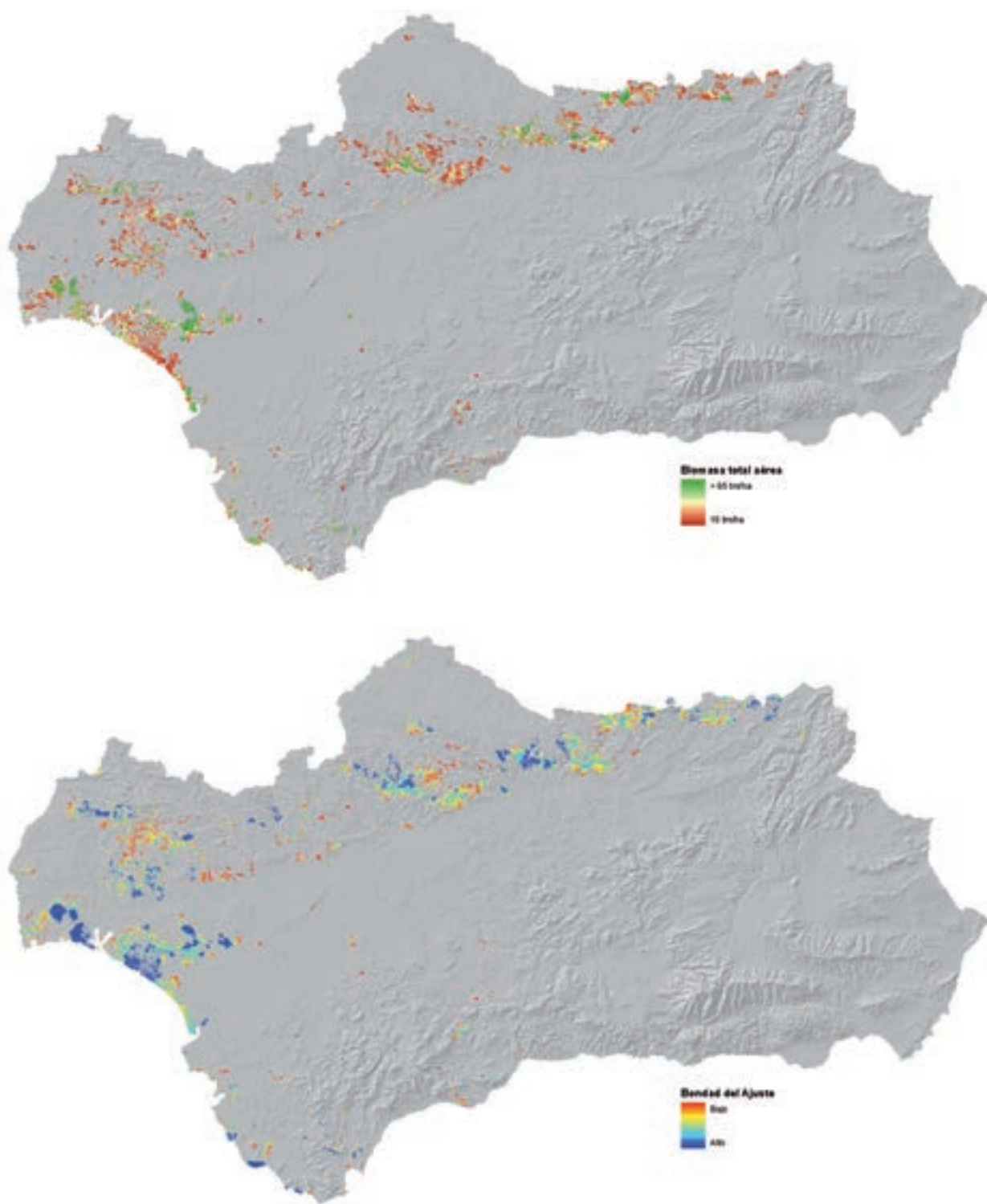


Figura 11.4. Distribución de biomasa total aérea mayor de 10 tm/ha y bondad de ajuste de *Pinus pinea*

Tabla 11.10. Valores de biomasa total aérea según los modelos de RUIZ-PEINADO *et al.* (2011), para *Pinus nigra* y provincia

BIOMASA <i>Pinus nigra</i>					
PROVINCIA	SUP PRESENCIA (ha)	MODELOS CALCULADOS	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	BIOMASA TOTAL (tm)
Almería	39.641	Biomasa de fustes	24,13	18,09	956.419
		Biomasa copas	15,26	9,73	604.770
		Biomasa total aérea	39,38	27,82	1.561.189
Granada	68.581	Biomasa de fustes	25,44	21,41	1.744.470
		Biomasa copas	14,49	10,62	993.943
		Biomasa total aérea	39,93	32,03	2.738.413
Jaén	87.089	Biomasa de fustes	55,40	50,40	4.825.080
		Biomasa copas	28,22	22,77	2.457.510
		Biomasa total aérea	83,62	73,16	7.282.590
Málaga	719	Biomasa de fustes	29,55	26,00	21.249,40
		Biomasa copas	16,82	13,26	12.094,00
		Biomasa total aérea	46,37	39,25	33.343,40
ANDALUCÍA	196.030	Biomasa de fustes	38,50		7.547.218
		Biomasa copas	20,75		4.068.317
		Biomasa total aérea	59,25		11.615.535



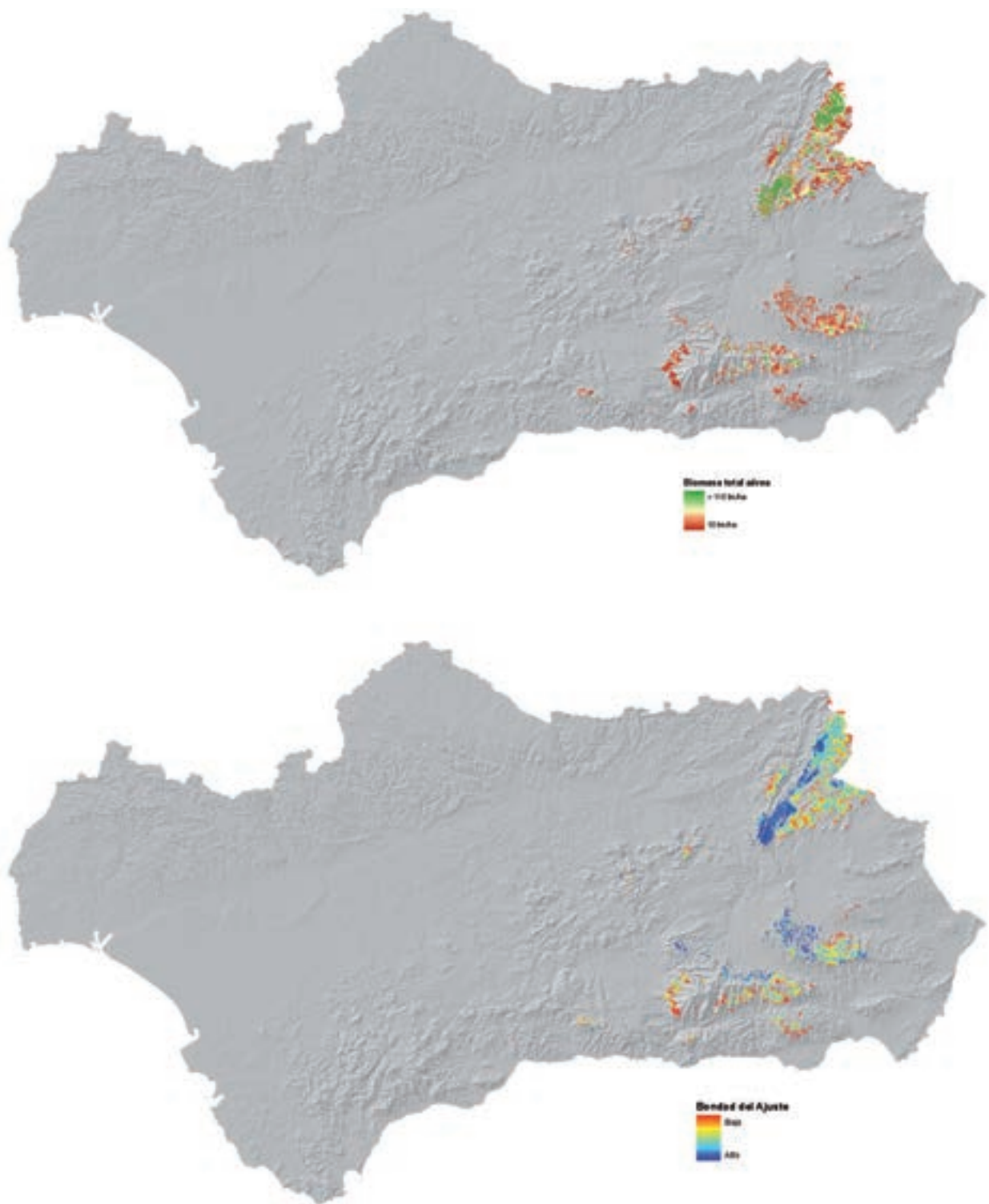


Figura 11.5. Distribución de biomasa total aérea mayor de 10 tm/ha y bondad de ajuste de *Pinus nigra*

Tabla 11.11. Valores de biomasa total aérea según los modelos de RUIZ-PEINADO *et al.* (2011), para *Pinus sylvestris* y provincia

BIOMASA <i>Pinus sylvestris</i>					
PROVINCIA	SUP PRESENCIA (ha)	MODELOS CALCULADOS	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	BIOMASA TOTAL (tm)
Almería	31.025	Biomasa de fustes	19,91	15,87	617.557
		Biomasa copas	18,35	9,69	569.251
		Biomasa total aérea	38,25	25,56	1.186.808
Granada	37.226	Biomasa de fustes	20,17	17,19	750.746
		Biomasa copas	15,03	9,05	559.643
		Biomasa total aérea	35,20	26,24	1.310.389
Málaga	815	Biomasa de fustes	38,94	26,40	31.737
		Biomasa copas	21,81	10,54	17.777
		Biomasa total aérea	60,75	36,94	49.514
ANDALUCÍA	69.066	Biomasa de fustes	20,27		1.400.040
		Biomasa copas	16,60		1.146.671
		Biomasa total aérea	36,87		2.546.711



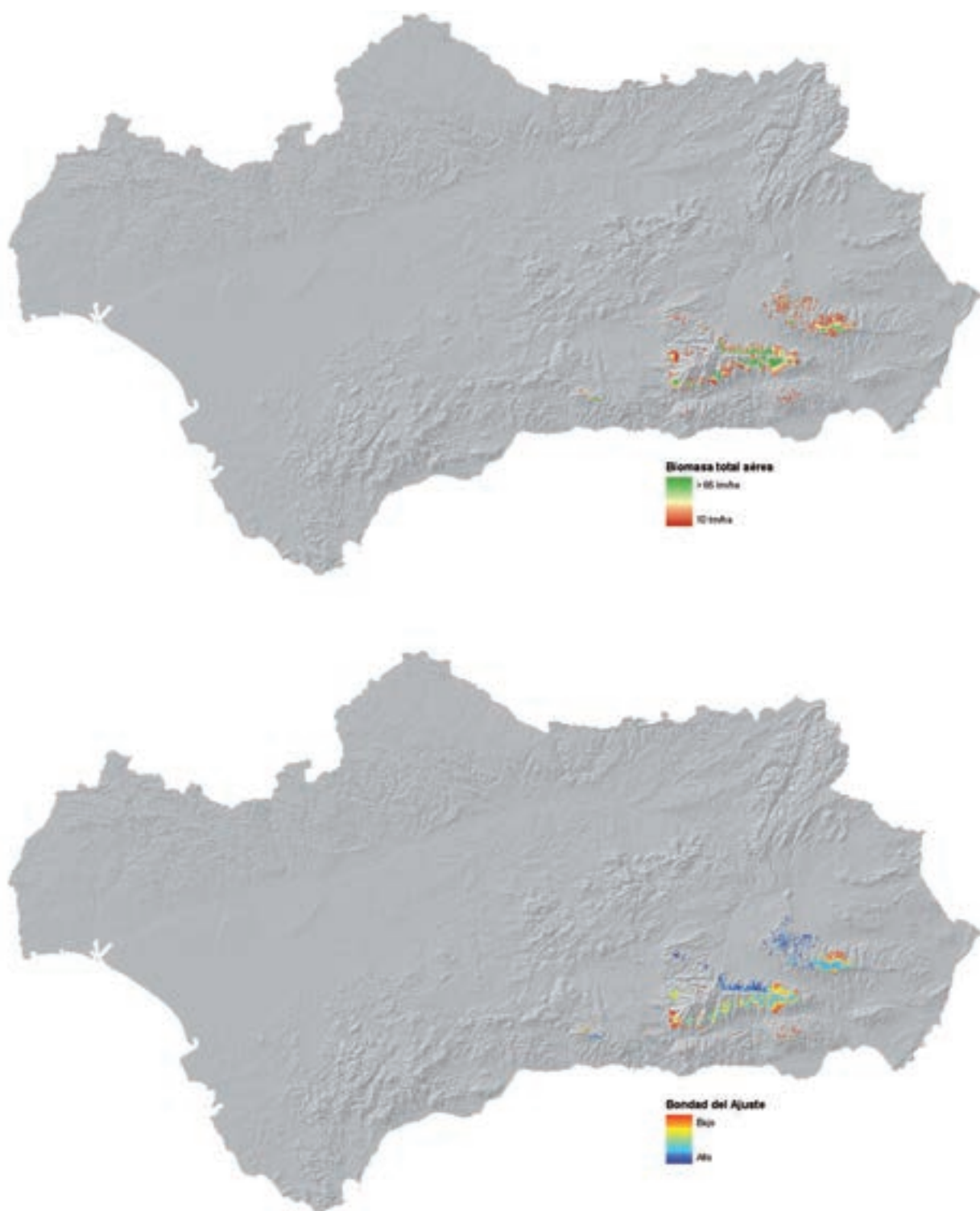


Figura 11.6. Distribución de biomasa total aérea mayor de 10 tm/ha y bondad de ajuste de *Pinus sylvestris*

En la **Tabla 11.12** se presentan los valores agregados de biomasa aérea de las cinco especies de pino por provincias, considerando solamente la superficie de pinar que superan según el modelo aplicado 10 tm/ha. Como se expuso en el apartado metodológico, la superficie de presencia para el conjunto de especies de pinos no es aditiva, dado que una misma celdilla del ráster 100 x 100 m puede incluir una o varias especies

Tabla 11.12. Valores de biomasa total aérea según los modelos de RUIZ-PEINADO *et al.* (2011), para *Pinus* y provincias

PROVINCIA	SUP PRESENCIA (ha)	MODELOS CALCULADOS	MEDIA (tm/ha)	DESVIACIÓN ESTANDAR	BIOMASA TOTAL (tm)
Almería	127.771	Biomasa total aérea	45,05	37,74	5.755.540
Córdoba	93.910		39,17	30,36	3.678.050
Granada	214.434		43,62	33,78	9.354.300
Huelva	161.382		38,95	30,92	6.286.360
Jaén	283.165		63,42	57,00	17.958.900
Málaga	103.968		41,04	35,53	4.267.250
Sevilla	32.634		33,07	25,70	1.079.350
Cádiz	25.967		46,44	34,40	1.205.920
ANDALUCÍA	1.043.231		47,53		49.585.670





12

Marco de referencia para el aprovechamiento de la biomasa de pinares en Andalucía

12.1. Introducción

En este estudio se han evaluado las existencias de biomasa aérea de las cinco especies de pino presentes en Andalucía utilizando de la mejor información de inventario disponible y aplicando métodos de modelización que permiten extrapolar temporal y espacialmente los datos de partida. La síntesis final arroja un total de 49.585.670 t de biomasa aérea de pino carrasco, piñonero, salgareño, silvestre y negral en el conjunto de la Comunidad Autónoma, considerando solamente la superficie de pinar que supera, según el modelo aplicado, 10 tm / ha en la unidad de análisis (celdillas del ráster 100 x 100m).

Esta cifra global es sólo un indicador del orden de magnitud de la biomasa en pie de los pinares andaluces. Es un punto de partida para la aplicación de criterios de gestión forestal sostenible que permita planificar la extracción prudente de biomasa de los sistemas forestales, siempre partiendo de la base de que el aprovechamiento de la biomasa aérea es uno de las posibles servicios y funciones que aportan los pinares. La biomasa, en definitiva, puede ser entendida como un recurso económico, pero su utilización ha de evaluarse teniendo en cuenta que los pinares son también ecosistemas, paisajes y espacios que producen otros bienes (madera, astillas para la industria de la madera, piñón, esparcimiento, protección frente la erosión, belleza, carácter, nodriza de otras especies, etc.).

Este estudio no ha abordado la posibilidad de extracción de estas existencias. Otros estudios, sin embargo, han realizado aproximaciones que conviene contrastar para valorar adecuadamente estos resultados y optimizar la aplicación práctica de la información territorial generada. También es conveniente situar las existencias globales y locales en el contexto del estado actual del aprovechamiento de la biomasa y sus perspectivas futuras: en este sentido, es obligado hacer una recapitulación de las iniciativas de planificación y normativas en los ámbitos europeo, nacional y autonómico.

En este último capítulo se abordará este estudio de contexto. En primer lugar se introducirán los dos vectores principales (el agotamiento de las fuentes de energía fósil y el calentamiento global) que están provocando que estemos viviendo una etapa de transición de cultura y modelo energético.

En segundo lugar, se abordan los instrumentos de planificación y la normativa energética y forestal que determinan la utilización de la biomasa como fuente de energía en la Unión Europea, España y Andalucía.

En tercer lugar se expone una panorámica de la energía en Andalucía y la contribución de la biomasa forestal a la estructura energética de la Comunidad Autónoma, exponiendo los rasgos básicos del uso térmico y eléctrico de la biomasa.

En cuarto lugar se presentan un conjunto de fuentes y estudios de origen diverso que han abordado en los últimos años la cuantificación de la potencialidad de biomasa forestal en Andalucía.

Finalmente, se presentan una serie de reflexiones sobre el aprovechamiento sostenible y racional de la biomasa forestal en Andalucía.



12.2. La biomasa como fuente de energía

La situación energética actual, junto con su previsible evolución futura, es uno de los principales focos de atención social y uno de los ámbitos de conocimiento e información, en sus facetas científica, técnica o divulgativa, que está sujeto a un mayor interés y preocupación. Los análisis coinciden en identificar a dos vectores principales que actúan al mismo tiempo como causa y efecto de esta situación: el agotamiento del modelo energético actual (que puede ejemplificarse en la evolución del precio de barril de petróleo, **Figura 12.1**) y los efectos ambientales derivados de este mismo modelo (cuya ilustración canónica bien puede ser la evolución de los registros de la concentración de CO₂ en la atmósfera en el observatorio de Mauna Loa, (**Figura 12.2**).

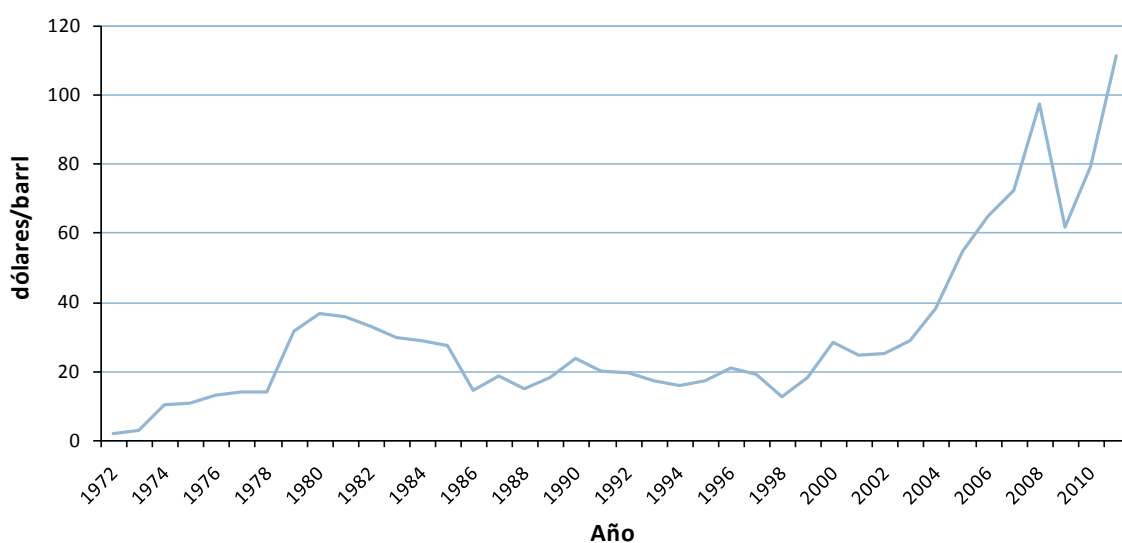


Figura 12.1. Evolución del precio del barril de petróleo 1972-2011. Fuente: BP Statistical Review of World Energy June 2012. Datos para 1972-1975 corresponden al crudo Arabian Light. De 1976 a 2011, crudo Brent. Consultado en <http://www.bp.com/statisticalreview>.

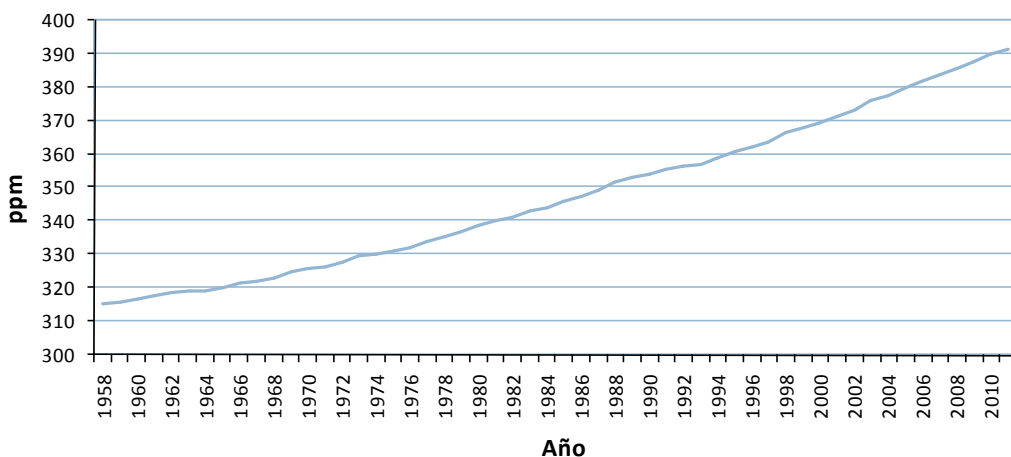


Figura 12.2. Evolución del contenido de CO₂ en la atmósfera terrestre. Fuente: Medición del CO₂ en el observatorio de Mauna Loa. Datos medios anuales a partir de mediciones mensuales. Fuente: http://www.ipcc-data.org/ancillary/ipcc_ddc_co2_mauna_loa.txt

Ambos procesos son convergentes, dirigiendo a la Humanidad en su conjunto a una nueva fase de su evolución histórica. De hecho, estamos inmersos en una etapa de transición energética de una intensidad al menos similar a la de la Revolución Industrial del siglo XIX. Una transformación que, en principio, no será tanto cuantitativa como cualitativa (recordemos que el consumo energético promedio de los cazadores recolectores es de unos 5.000 kilocalorías al día, pasando a 12.000 kcal en las primeras sociedades agrícolas y a 70.000 kcal tras el advenimiento de la Revolución Industrial; en la actualidad, el consumo energético per cápita en Andalucía es de 166.612 kcal, inferior, pero de un orden de magnitud similar al de los EEUU que alcanza las 250.000 kcal¹). Y en esta transición, basada en principios como la eficiencia energética y la renovación de las fuentes de suministro de energía, la biomasa ocupa un lugar destacado.

La interdependencia entre el bienestar humano y la combustión de biomasa fue una constante en nuestra evolución histórica hasta finales del siglo XIX, aunque aún hoy en día una importante proporción de la población mundial depende todavía de esta fuente de energía. En puridad, la Revolución Industrial consistió realmente en una Revolución Energética: el consumo de energía se disparó debido a que en lugar de depender de fuentes de suministro de base solar de corto plazo de renovación (madera, pasto seco, cauces, viento, tracción animal) hicimos uso de radiación solar acumulada y almacenada durante millones de años. Esto supuso variar drásticamente el plazo de renovación de la energía de la que dependemos. En términos económicos, supuso alargar de modo prácticamente infinito (en una escala de cientos de millones de años) la tasa de amortización de la fuente de energía que dinamiza nuestro estilo de vida. El consumo de la biomasa quedó relegado a algunas aplicaciones en el ámbito doméstico (sistemas tradicionales de calefacción y cocina) y a algunos sectores estrechamente ligados con la biomasa como el sector forestal y, en algunos casos, el agroalimentario.

La evolución del calentamiento climático global y su evolución futura bajo diferentes escenarios de actividad humana son objeto de estudios en los sucesivos informes del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). En el cuarto informe, de febrero de 2007, se sitúa el calentamiento medio en este siglo entre 1,8 y 4 grados, con una subida de 0,2 grados por década en los próximos 20 años. El conocimiento actual considera que el calentamiento es inequívoco e irreversible a corto plazo y que es consecuencia, con un 90% de probabilidad, de la acción de la especie humana sobre el planeta.

El calentamiento global y el agotamiento de las reservas constituyen dos límites objetivos que ponen coto al crecimiento ilimitado de un sistema basado en los combustibles fósiles. Lo uno y lo otro están íntimamente ligados: el reto que plantea el cambio climático refuerza la necesidad de cambiar el modelo energético, a la vez que la carestía creciente de las fuentes de energías fósiles actúan a favor de las actuaciones de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La transición ha de ser gradual porque nuestro sistema social y económico está muy bien adaptado a la utilización de la energía fósil: de hecho, ha coevolucionado con el aprendizaje y la destreza que hemos adquirido en explotar estas fuentes de energía. El modelo energético del futuro que hoy en día se está construyendo debe proporcionar, o al menos reemplazar con otras utilidades, las ventajas prácticas que han supuesto el petróleo, el carbón y sus derivados: la capacidad de almacenamiento, la previsibilidad en la disponibilidad de la energía y el coste, que durante el siglo XX ha sido comparativamente más barato que cualquier otra fuente de energía.

La energía obtenida a partir de la biomasa soslaya algunos de estos problemas, dado que su fuente de suministro (procedente de la fijación vegetal del carbono atmosférico) se presenta de modo concentrado, favoreciendo su almacenamiento y, con ello, haciendo predecible la generación de energía. Sin embargo, su utilización también plantea retos y genera incertidumbres que han de ser tenidas en cuenta para lograr un aprovechamiento realmente perdurable en el tiempo.

¹ Estas y otras numerosas cifras de gran interés se recogen en la publicación VVAA (2011). "Andalucía renovable". Agencia Andaluza de la Energía. Sevilla.

12.3. La planificación energética y la planificación forestal: la biomasa como punto de encuentro

La transición energética está recibiendo el impulso de acuerdos políticos tomados en distintos ámbitos de decisión. De los dos vectores que están actuando (encarecimiento y agotamiento de la energía a partir de fuentes fósiles y el calentamiento global), posiblemente sean los acuerdos adoptados para reducir las emisiones de gases de efectos invernadero los que tengan mayor relevancia pública, aunque en ocasiones es difícil separar una u otra motivación.

Un hito decisivo aconteció el 11 de diciembre de 1997, cuando los países industrializados se comprometieron en Kioto, en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, a ejecutar un conjunto de medidas para reducir los gases de efecto invernadero. La Unión Europea fijó como meta reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para el período 2008-2012 en un 8% en relación con los niveles de 1990 (Decisión del Consejo 2002/358/CE). Esta es una cuota promedio resultante de la contribución de cada Estado Miembro: en el caso de España, se permitió alcanzar unos niveles superiores en un 15% a las cifras de referencia. Pero, como decíamos, este compromiso actúa en el mismo sentido que los efectos de la crisis energética actual.

12.3.1. Planificación energética y forestal en la Unión Europea

La energía se ha convertido en uno de los principales focos de actuación para la Unión Europea y así lo ha reconocido el Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea (Tratado de Lisboa) que reconoce de manera específica una política energética que tenga por objetivo garantizar el funcionamiento del mercado de la energía, garantizar la seguridad del abastecimiento energético en la Unión, fomentar la eficiencia energética y el ahorro energético, así como el desarrollo de energías nuevas y renovables, y fomentar la interconexión de las redes energéticas.

Los documentos de análisis y diagnóstico coinciden en la conjunción de los dos elementos que determinan el marco general energético europeo: la elevada dependencia de fuentes de suministro importadas, que dificulta el cumplimiento de los objetivos de la Unión Europea de crecimiento, empleo y sostenibilidad, y la incidencia del modelo energético actual sobre el balance de gases de efecto invernadero y, en consecuencia, sobre el cambio climático. Para revertir esta situación, la Unión Europea ha desarrollado en el último decenio un conjunto de instrumentos legislativos y de planificación.

Desde la década de 1990 la UE está promoviendo actuaciones en pro de las energías renovables como el Libro Blanco “Energía para el futuro: fuentes de energía renovables” (1997) que marca las directrices de una estrategia y un plan de acción comunitarios con el objetivo último de alcanzar en 2010 una penetración mínima del 12% de las fuentes de energía renovables en la Unión Europea, lo que supondría duplicar la producción de energía procedente de fuentes renovables.

Uno de los elementos que reconoce el plan de acción como esencial es la promulgación de una legislación europea que procure un marco normativo estable y común para los estados miembros. Este objetivo se materializó en la Directiva 2001/77/CE, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad, y en la Directiva 2003/30/CE, relativa al fomento del uso de biocarburantes u otros combustibles renovables en el transporte. En estas directivas la Comisión marcó los objetivos de cuota de energía que habrían de alcanzar la electricidad procedente de fuentes renovables y la energía renovable utilizada en el sector del transporte en el horizonte de 2010. En el caso de la Directiva 2001/77 se planteó como meta que el 22,1% del consumo total de electricidad en la Unión Europea en 2010 se cubriera con electricidad generada a partir de fuentes

renovables. Por su parte, la Directiva 2003/30 estableció que el porcentaje de biocarburantes que debería sustituir al petróleo y al gasóleo en el transporte debería suponer el 2% en 2005 y el 5,75% en 2010.

Durante el inicio del siglo XXI la situación energética ha continuado agravándose. Así lo aprecia el Libro Verde de la Comisión “Estrategia europea para una energía sostenible, competitiva y segura”, del año 2006, que reconoce que Europa ha entrado en una nueva era de la energía y que es necesario una respuesta común europea para garantizar que la energía sostenible, competitiva y segura, sea uno de los pilares básicos de la vida cotidiana de los europeos. Este Libro Verde presenta sugerencias y opciones para sentar la base de una nueva política energética europea, fijando las directrices para las metas y objetivos para después de 2010.

Como desarrollo del Libro Verde, la Comisión Europea presentó en 2007 la comunicación “Programa de trabajo de la energía renovable — Las energías renovables en el siglo XXI: construcción de un futuro más sostenible” que fue adoptada como Plan de Acción (2007-2009) por el Consejo Europeo con la orientación de lograr la triple finalidad de luchar contra el cambio climático, limitar la vulnerabilidad exterior de la UE frente a la importación de hidrocarburos y promover el crecimiento y el empleo. En el ámbito de las energías renovables se fija su participación en la combinación energética global de la UE en el 20% en 2020. Este impulso está fundamentado en las bondades de este tipo de energía, ya que si bien su coste de generación es todavía más caro que la utilización de hidrocarburos, la diferencia de precios se está reduciendo, sobre todo si se tienen en cuenta los costes del cambio climático y que las economías de escala podrán reducir los costes de las renovables en un futuro próximo. Como aspectos favorables para su desarrollo se pone de manifiesto que la energía renovable mejora la seguridad de abastecimiento energético porque incrementa la proporción de energía producida internamente, diversifica la combinación energética y las fuentes de importación de energía y aumenta la proporción de energía procedente de regiones estables políticamente, además de contribuir a crear nuevos puestos de trabajo en Europa. Las energías renovables cuentan también con el aliciente de que apenas emiten gases de efecto invernadero y la mayoría de ellas reporta beneficios significativos para la calidad del aire.

En 2005 se aprobó un Plan de Acción sobre la Biomasa (COM/2005/0628) centrado en la necesidad de desarrollar los recursos de biomasa en los Estados miembros, dado su papel esencial en la formulación de un nuevo paradigma energético en Europa (a la fecha de formulación del Plan representaba cerca de la mitad de energía renovable utilizada y el 4 % de las necesidades energéticas globales de la UE). El Plan considera viable duplicar de modo sostenible el uso actual de biomasa para 2010 (de 69 millones de tep en 2003 a cerca de 185 millones de tep en 2010), sin que ello suponga afectar significativamente a la producción de alimentos. Para ello hay que vencer una serie de obstáculos como la carencia de una legislación específica relativa a energía renovable en la producción de calor.

Todas las medidas incluidas en el Plan de Acción sobre la Biomasa de la UE dependen de un factor esencial: la disponibilidad de un suministro adecuado. Para ello se relacionan un conjunto de medidas, destacando la aplicación de las ayudas de una Política Agrícola Común que tenga entre sus orientaciones favorecer a los cultivos energéticos. En cuanto a la silvicultura, se parte de la base de que cerca del 35 % de la madera que crece anualmente en los bosques de la UE no se aprovecha. Una razón importante de ello es que no hay un mercado suficientemente consolidado para producir calor y electricidad que aproveche las maderas pequeñas procedentes de los claros y claras. En relación con esto, el Plan aboga por divulgar las lecciones aprendidas de experiencias exitosas en Europa, como el establecimiento de cadenas de suministro asociadas a las instalaciones existentes y el apoyo a la organización de sistemas logísticos, la cooperación entre propietarios forestales y el transporte.

Entre las acciones concretas, el Plan de Acción sobre la Biomasa incluye la realización de campañas de información a los propietarios forestales sobre las oportunidades de la energía a partir de la biomasa y la puesta en práctica de un Plan de Acción de los Bosques en el cual el uso energético del material forestal cumpla un papel importante. También se promoverá que los Estados Miembros establezcan planes de acción nacionales sobre biomasa.

En el informe de seguimiento de 2009 del Plan de Acción sobre la Biomasa de la UE (COM/2009/0192) se reconoció la desviación del cumplimiento del objetivo 2010 en materia de fuentes de energía renovables debido al aumento del consumo de energía en la Unión Europea y al insuficiente desarrollo de las renovables (el consumo de electricidad procedente de energía renovable podría alcanzar una cuota del 19 % en lugar del 21% previsto, mientras que en el sector del transporte la cuota de biocarburantes se situaría en el 4% en lugar del 5,75%).

Este informe de seguimiento fue objeto de evaluación por el Consejo Económico y Social, entre cuyas conclusiones destacan sus llamadas de atención sobre la necesidad de actuar con prudencia en el uso de la biomasa como fuente de energía renovable. En cuanto a los cultivos energéticos, propone que cada Estado miembro elabore un mapa con las áreas adecuadas para el cultivo energético para evitar el uso de terrenos agrícolas de calidad y de zonas inestimables por su biodiversidad. En particular, muestra su preocupación por las presiones que la extracción de biomasa para la producción de calor y electricidad y para la producción de biocarburantes ejercerá sobre las explotaciones forestales, por lo que recomienda que las medidas y decisiones que haya que adoptar en relación con el empleo de biomasa para la producción de energía esperen a que se ponga en marcha un sistema de supervisión adecuado.

El marco legislativo común para el sector de las energías renovables fue modificado en 2009. La Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, que modifica y deroga las anteriores Directivas 2001/77 y 2003/30, marca como objetivos generales para 2020 conseguir una cuota del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Unión Europea y una cuota del 10% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo de energía en el sector del transporte en cada Estado miembro. Establece, además la obligación de que cada Estado miembro elabore y notifique a la Comisión antes del 30 de junio de 2010 un Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) para el periodo 2011-2020 que garantice el cumplimiento de los objetivos vinculantes que fija la Directiva. Esta Directiva forma parte del Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático, cuyos objetivos para 2020 son lograr un 20% de mejora de la eficiencia energética, una contribución de las energías renovables del 20% y una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del 20%.

En cuanto a la planificación forestal, en 2006 se presentó la Comunicación de la Comisión relativa a un Plan de Acción de la UE para los Bosques (COM/2006/302) como desarrollo de la Estrategia Forestal para la Unión Europea (1998).

El Plan de Acción para los Bosques contempla cuatro objetivos principales para optimizar la gestión sostenible y el papel multifuncional de los bosques de la UE: aumentar la competitividad a largo plazo; mejorar y proteger el medio ambiente; contribuir a una mejor calidad de la vida; y favorecer la comunicación y la coordinación con objeto de incrementar la coherencia y la cooperación a distintos niveles. El fomento del uso de la biomasa forestal para la producción de energía es una de sus acciones clave, centrando la atención en el desarrollo de los mercados de los pellets y menudos de madera y en la información a los propietarios de las explotaciones forestales sobre las posibilidades de producción de materia prima para la generación de energía. También promueve facilitar la investigación y la divulgación de experiencias sobre la utilización de madera de poco valor, de madera de talla reducida y de residuos de la madera para la generación de energía y sobre el desarrollo de tecnologías para la producción de calor, refrigeración, electricidad y combustibles a partir de recursos forestales. De manera específica insta a los Estados miembros a que evalúen la disponibilidad de madera y residuos de la madera y la viabilidad de su uso para la producción de energía a nivel nacional y regional con objeto de considerar nuevas medidas en apoyo del uso de la madera para la generación de energía.



12.3.2. Planificación energética y forestal en España

El Reino de España incorporó en sus instrumentos de planificación (Plan de Fomento de las Energías Renovables 1999, Plan de Energías Renovables 2005-2010, Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012) las directrices y objetivos marcados por la Unión Europea. En concreto, la meta establecida en el PER 2005-2010 fue cubrir el 12% del consumo de energía nacional en el año 2010 con fuentes renovables.

Una vez finalizado el periodo de programación del PER 2005-2010, se elaboró el Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020 que fue aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros de 11 de noviembre de 2011. Este PER es coherente con el contenido e incluye los elementos esenciales del Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER), que España remitió a la Comisión Europea en cumplimiento de la Directiva 2009/208, añadiendo análisis adicionales y estudios sectoriales sobre las perspectivas de evolución tecnológica de los subsectores de la energía renovable. El PANER establece, en consonancia con los requerimientos de la Directiva, que el aporte de las energías renovables para el año 2020 será del 22,7% en referencia al consumo total de energía del 40% y en cuanto a la generación de energía eléctrica.

El mecanismo normativo fundamental en el que se apoya el logro de las metas de la planificación energética nacional es el Real Decreto 661/2007, que establece un sistema de primas para apoyar la producción eléctrica con tecnologías limpias. Este Real Decreto ha sido modificado por el Real Decreto-Ley 1/2012 que ha introducido la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y la supresión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de cogeneración, fuentes de energía renovables y residuos, lo que supone un cambio trascendente en el marco normativo que ha permitido el desarrollo del sector de la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y, en concreto, de biomasa.

También es de destacar la Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible, que tomó en consideración algunos de los elementos de los marcos de apoyo a las energías renovables que deben estar presentes para garantizar su crecimiento futuro.

En relación con la actuaciones encaminadas a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la Estrategia Española de Cambio Climático y Energía Limpia, Horizonte 2012, define el marco de actuación que deben abordar las Administraciones Públicas en España para asegurar el cumplimiento de las obligaciones nacionales en el Protocolo de Kyoto. La Estrategia incluye un Plan de Medidas Urgentes de la Estrategia de Cambio Climático y Energía Limpia. El Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012, fijó como objetivo que las emisiones globales de gases de efecto invernadero no superen en más de un 37% las del año base en el período 2008-2012 (siendo esta cifra igual a la suma del 15% establecido como nivel de emisiones para España en Kyoto, un 2% atribuido a la absorción por los sumideros y un 20% en créditos de carbono procedentes de los mecanismos de flexibilidad).

La planificación forestal estatal tiene su fundamento en la Estrategia Forestal Española, aprobada en 1999, cuya aplicación concreta se formuló en el Plan Forestal Español (2002-2032). En el apartado de aprovechamientos forestales, el Plan Forestal Español aborda un análisis conjunto de la situación de las leñas y la biomasa, estimando su producción en los montes españoles en la década 1987-1996 en unos 3.500.000 estéreos anuales (2.000.000 m³), equivalentes a 1.600.000 t. Si se considera que la producción maderera media ascendió a 15 millones de m³ y que las existencias totales en los montes alcanzan 675 millones de m³ y el crecimiento anual es superior a los 35 millones de m³, el aprovechamiento de madera y leñas y biomasa apenas supera la mitad del crecimiento anual y el 2% de las existencias.

Las leñas proceden en su mayor parte de montes de quercíneas aprovechados como monte bajo. Debido a que en las últimas décadas su uso ha decaído, ante la falta de demanda, permanecen en su mayor parte en el monte, lo que implica un doble riesgo: aumenta el riesgo de incendios y de su propagación, y son un foco de insectos perforadores, hongos y otros agentes perjudiciales. El Plan Forestal propone como alternativa su aprovechamiento energético en las plantas bioenergéticas o en la industria de trituración. No obstante, la Estrategia Forestal Española advierte que existe el riesgo de que una planificación económica desafortunada genere a escala local una demanda de productos forestales superior a la que los montes pueden cubrir de forma sostenible, incentivándose así cortas o claras indeseables desde el punto de vista de otras funciones prevalentes del bosque, por lo que debe imponerse un análisis adecuado del ciclo

de vida total de estas instalaciones, o un estudio de impacto a largo plazo, por si el exceso de demanda pudiera ser significativo.

El Plan Forestal Español plantea una serie de medidas de carácter general para todos los aprovechamientos, entre las que merece la pena reseñar la realización de estudios de potencialidad productiva (oferta) y de mercado (demanda), y de estudios de compatibilidad de aprovechamiento y sus dimensiones mínimas aconsejables; y el inventario, cartografía y delimitación de áreas susceptibles de ser dedicadas a cada aprovechamiento.

En el plano normativo, la Ley 43/2003, de Montes, reconoce el valor de la biomasa al abordar los contenidos de los Planes de Ordenación de los Recursos Forestales, manifestando la necesidad de incorporar, en la caracterización socioeconómica, la presencia de instalaciones dedicadas al aprovechamiento energético de la biomasa forestal. La Disposición Adicional Cuarta prevé la elaboración de una estrategia para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal residual de acuerdo con los objetivos indicados en el Plan de fomento de las energías renovables en España.

El Real Decreto-Ley 11/2005, de 22 de julio de 2005, por el que se aprueban medidas urgentes en materia de incendios forestales establece en su artículo 16 que las Comunidades Autónomas deberán desarrollar planes de aprovechamiento de la biomasa forestal residual existente en sus montes.

En 2010 fue aprobada en la Comisión Estatal para el Patrimonio Natural y la Biodiversidad la “Estrategia Española para el Desarrollo del Uso Energético de la Biomasa Residual” que será ampliada para todos los productos forestales susceptibles de aprovechamiento energético.

12.3.3. Planificación energética y forestal en Andalucía

El instrumento de planificación energética en la Comunidad Autónoma de Andalucía es el Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética 2007-2013 (PASENER), que sucedió al Plan Energético de Andalucía 2003-2006 (PLEAN).

El PASENER aboga por una nueva cultura de la energía, que ha de materializarse en un nuevo modelo energético, que de respuesta al reto del cambio climático, a la vulnerabilidad de un sistema energético vertebrado en los combustibles fósiles y al compromiso de garantizar el suministro energético de calidad a la ciudadanía. Para ello considera clave avanzar en los siguientes aspectos: una adecuada gestión de una demanda creciente de energía, el principio de autosuficiencia, el abandono progresivo de los combustibles fósiles a favor de las energías renovables, la integración de la innovación y las nuevas tecnologías en materia energética, la transversalidad de las estrategias energéticas en todos los órdenes, con especial consideración en la ordenación del territorio, e introducir en la sociedad el valor del uso racional de la energía.

El PASENER cifra como objetivo de aporte de las fuentes de energía renovable a la estructura de energía primaria en 2013 del 18,3% y en el 39,1% la relación de potencia eléctrica instalada con tecnología renovable frente a potencia eléctrica total. Junto con otras medidas, esto significará que durante el período de vigencia del Plan las emisiones de CO₂ evitadas se elevarán a 11 millones de toneladas y las emisiones de CO₂ por unidad de generación eléctrica se reducirán en torno a un 20%. Todo ello teniendo como meta alcanzar un ahorro equivalente al 8% de energía primaria respecto a 2006.

Entre los aspectos positivos del uso de las energías renovables, el PASENER destaca su efecto sobre el tejido socioeconómico y, particularmente, sobre el tejido industrial, al ser un subsector caracterizado por su dinamismo, su alto desarrollo tecnológico, su capacidad de expansión, su demanda de empleo estable, su alta cualificación y su reconocimiento social. Estos elementos convierten a las energías renovables en un paradigma de actividad innovadora, en consonancia con una de las líneas directrices emanadas del Consejo Europeo de Lisboa para estimular la productividad y competitividad y para lograr un crecimiento sostenible.

Para conseguir las metas propuestas, se relaciona un elenco de medidas como el apoyo a la utilización de la biomasa como fuente de energía, especialmente para uso térmico, a través de programas orientados a incentivar la instalación de tecnologías renovables en el ámbito doméstico particular y comunitario para producción de agua caliente, calefacción y climatización, y a fomentar las energías renovables en la industria agroalimentaria. Se contempla específicamente llevar a cabo un programa de promoción de los cultivos energéticos.

El Plan Andaluz de Acción por el Clima 2007-2012, que desarrolla la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático, recoge entre las medidas del Plan de Mitigación fomentar el aprovechamiento energético de la biomasa para favorecer el cumplimiento de los objetivos del protocolo de Kyoto. Entre las actuaciones propone desarrollar un Plan de Acción para el Impulso de la Producción y Uso de la Biomasa y Biocarburantes en Andalucía con la incorporación de un Programa específico de Fomento de los Cultivos Energéticos y un Programa de Aprovechamiento de Biomasa Forestal.

El Plan Forestal Andaluz es el instrumento que desde 1989, y con una vigencia de 60 años, establece las directrices y orientaciones de las actuaciones forestales en la Comunidad Autónoma. Hasta la fecha ha sido objeto de tres actualizaciones. La última de estas actualizaciones, la Adecuación del Plan Forestal Andaluz, Horizonte 2015, reconoce como principios orientadores la multifuncionalidad y sostenibilidad de los montes, su papel fundamental en el desarrollo rural, la aplicación de la gobernanza en la toma de decisiones y extender las iniciativas de responsabilidad social corporativa. Estos principios actualizan la filosofía de la formulación inicial del PFA y su reconocimiento de que el mantenimiento de la multifuncionalidad está directamente ligado a una gestión sostenible de los recursos forestales que permita una actividad económica racional, buscando espacios de colaboración más que de confrontación entre el binomio conservación y producción. Esta búsqueda de consenso era puesta de manifiesto en el análisis del PFA 1989 al llamar la atención sobre la necesidad de revisar los fines tradicionales de los montes (el carácter productor o protector) como consecuencia de la aparición de nuevos usos como el ocio y el esparcimiento, de la creciente importancia de las consideraciones ecológicas sobre la gestión del territorio y la utilización de los recursos naturales.

Como guía para no desviarse del necesario equilibrio, a veces delicado, entre las funcionalidades productivas y las ligadas a la conservación, el PFA 1989 recordaba que la base de la actuación forestal debe estar en conseguir que la utilización racional de los recursos naturales permita su persistencia manteniendo la capacidad de renovación de los mismos, aceptando, por tanto, que la conservación no supone forzosamente un cese de actividades sobre el medio natural y, por otra parte, que la producción no tiene por qué llevar al agotamiento de los recursos. Esta línea maestra, de hondas raíces históricas, se formula en la actualidad a través de conceptos como la gestión forestal sostenible o, como propone la Adecuación del PFA Horizonte 2015, tomando en cuenta los beneficios indirectos, difusos o intangibles, a través de una adecuada valorización de las externalidades positivas del monte y de los servicios ambientales y ecosistémicos que presta, lo que permitiría reforzar lazos de responsabilidad compartida entre los titulares de los terrenos forestales que llevan a cabo una gestión forestal sostenible y todos los beneficiarios de la misma.

En el diagnóstico de la Adecuación del Plan Forestal Horizonte 2015 se pone de manifiesto que el aprovechamiento de la madera en Andalucía constituye un sector escasamente competitivo con respecto al mercado nacional o internacional. Con la excepción del chopo y el eucalipto, principales especies de interés maderero, el resto de frondosas y coníferas mantienen las funciones de protección que dieron origen a su implantación como medida de restauración de ecosistemas. Las repoblaciones de coníferas, en concreto, que tuvieron su origen a mediados del siglo XX, exigen para su correcto desarrollo actuaciones de clareos y primeras claras que suponen una importante inversión y que dan lugar a un escaso retorno económico. No obstante, el potencial de las cortas que se deriven de una planificación apropiada podría dar lugar a la extracción de fustes de calidad para aserrío o fabricación de tableros. En este contexto, la biomasa forestal como recurso energético representa una oportunidad para la realización de una gestión forestal sostenible que contribuya al desarrollo rural mediante la mejora de las masas, la diversificación económica, la generación de empleo y el aumento de la rentabilidad económica de los montes, además de favorecer la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Tanto el PFA como la legislación forestal de aplicación en la Comunidad Autónoma (Ley nacional 43/2003, de Montes, y Ley 2/89, Forestal de Andalucía) consideran fundamental la planificación forestal para una adecuada gestión. En este aspecto, la Adecuación plantea como directriz basar la planificación en una zonificación en la que se definan los objetivos y funciones de las formaciones forestales teniendo en

cuenta el aprovechamiento integrado de los recursos forestales. Como caso concreto, propone apoyar el aprovechamiento integrado de la biomasa forestal en coordinación con el aprovechamiento de la biomasa procedente de otros sectores, especialmente el agrícola y el ganadero. Para ello, la Adecuación incluye como línea de actuación específica del programa “Aprovechamiento sostenible de los recursos forestales renovables y transformación y comercialización de los productos forestales” el uso de la biomasa forestal como recurso energético.

En el campo de la regulación energética, la Ley 2/2007, de Fomento de las Energías Renovables y del Ahorro Energético y Eficiencia Energética de Andalucía, establece el principio de la primacía en la producción de las energías renovables sobre el resto de las energías primarias y contempla la promoción de su uso mediante el establecimiento de medidas incentivadoras.

Por Orden de 29 de diciembre de 2011, la Consejería de Medio Ambiente ha establecido la regulación del aprovechamiento de la biomasa forestal con destino energético como recurso natural renovable procedente de los montes de Andalucía. Como aprovechamiento expresamente contemplado en el artículo 6 de la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, la obtención de biomasa deberá estar incluida en la planificación de la producción a obtener de los terrenos forestales y se hará bajo las condiciones de una gestión forestal sostenible. A tal fin, la Orden distingue entre dos tipos de superficie forestal: aquella cuyo aprovechamiento principal sea la biomasa con destino energético y aquella otra cuyo aprovechamiento principal no sea la biomasa con destino energético. La regulación también contempla el establecimiento de repoblaciones con especies forestales de crecimiento rápido tratadas, en general, a turnos cortos, con el fin de que el aprovechamiento principal de estas superficies sea la biomasa con destino energético.

Esta Orden prevé que para una determinada unidad dasocrática en la que se divida el monte (sección, cuartel, cantón, rodal u otra) pueda ser considerada como superficie forestal cuyo aprovechamiento principal sea la biomasa con destino energético se ha de cumplir que su aprovechamiento principal sea la obtención de biomasa, que el destino de esta biomasa sea en su totalidad la generación de energía y que así figure en los instrumentos de gestión forestal recogidos en la normativa sectorial (proyecto de ordenación o plan técnico) aprobados por la Consejería competente en materia forestal. Si tal es el caso, la biomasa obtenida tendrá la consideración de biomasa forestal procedente de cultivos energéticos forestales a efectos del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, no pudiéndose extraer más producción de biomasa de la que se especifique como posibilidad para cada unidad dasocrática en el correspondiente proyecto o plan técnico de ordenación del monte, de acuerdo con las normas selvícolas y los criterios de ordenación de los recursos naturales. Si la biomasa procede de superficies forestales que no tengan como aprovechamiento principal la biomasa con destino energético, podrá tener la consideración de biomasa procedente de aprovechamiento secundario o biomasa residual.



12.4. La energía en Andalucía

12.4.1. Contexto energético

Andalucía consume en torno al 1,0% de la energía primaria de la Unión Europea y al 14,3% de la de España (**Tabla 12.1**). En el año 2010 el consumo de energía primaria ascendió en Andalucía a 18.913,8 ktep y a 132.123 ktep en España. La evolución del consumo energético en Andalucía en la primera década del siglo XXI manifiesta una primera fase de aumento hasta el año 2007, a partir del cual la tendencia ha sido decreciente (**Figura 12.3**). El consumo de energía primaria per cápita es de 2,26 tep/habitante en Andalucía y de 2,81 tep/habitante en España.

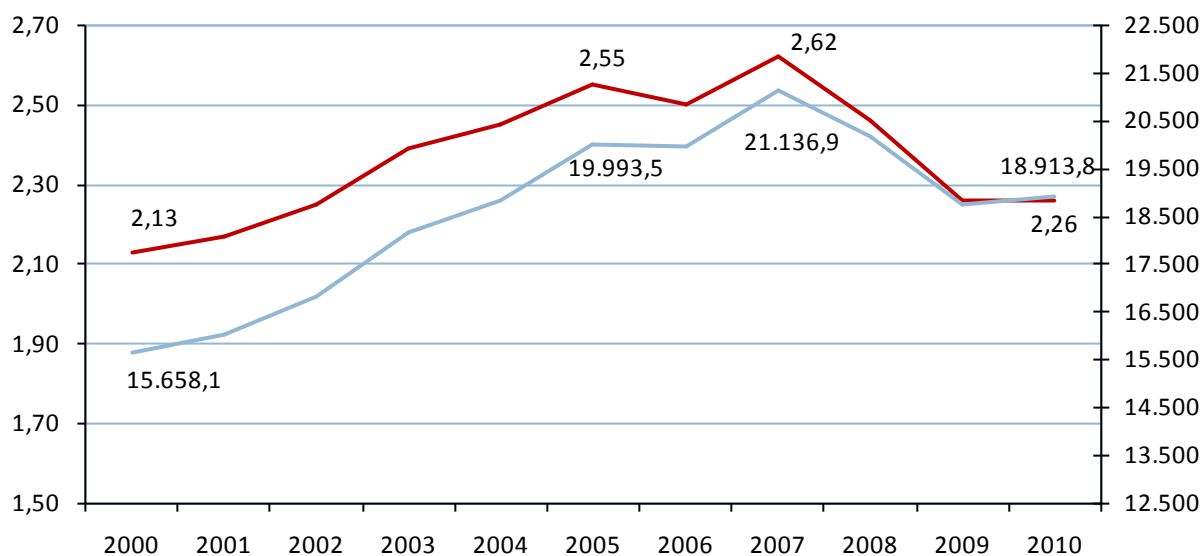


Figura 12.3. Consumo total de energía primaria (serie azul, valores en ktep) y consumo total de energía primaria por habitante (serie roja, valores en ktep/habitante) durante el periodo 2000-2010. Se señalan los valores alcanzados en 2000, 2005, 2007 y 2010. Fuente: Datos energéticos de Andalucía, 2010. Agencia Andaluza de la Energía.

La principal fuente de suministro de energía es el petróleo (**Tabla 12.1 y Figura 12.4**), que aporta el 47,8% de la energía primaria consumida, una cifra similar a la media española (47,1%) y superior a la de la UE (36,6%). En la estructura del consumo de energía primaria de Andalucía (2010) destaca la inexistencia de generación de energía nuclear (frente al 16,2% del conjunto de España y el 13,6% de la UE), el mayor peso del gas natural (29,8% frente a 23,3% y 24,5% en España y la UE) y, particularmente, de las energías renovables, cuyo consumo ascendió a 2.427,8 ktep, lo que significó un 12,8% del consumo de energía primaria (11,0% en España y 9,0% en la UE). El uso de las energías renovables manifiesta una tendencia ascendente tanto en Andalucía como en el conjunto de España (en 2010 se consumió un 33,1% más en Andalucía en relación con el año anterior, y un 20,8% en España, en donde se consumieron 14.678 ktep de este tipo de energía).

Tabla 12.1. Consumo de energía primaria por fuentes. Unidad Mtep (ktep x 1.000)

	Unión Europea (2009)	España (2010)	Andalucía (2010)
Carbón	267,9	8,5	1,7
Petróleo	622,9	62,5	9
Gas natural	416,7	31	5,6
Nuclear	230,8	16,2	0
Energías renovables	152,6	14,7	2,4
	1.702,8	132,1	18,9

Fuente: Datos energéticos de Andalucía, 2010. Agencia Andaluza de la Energía

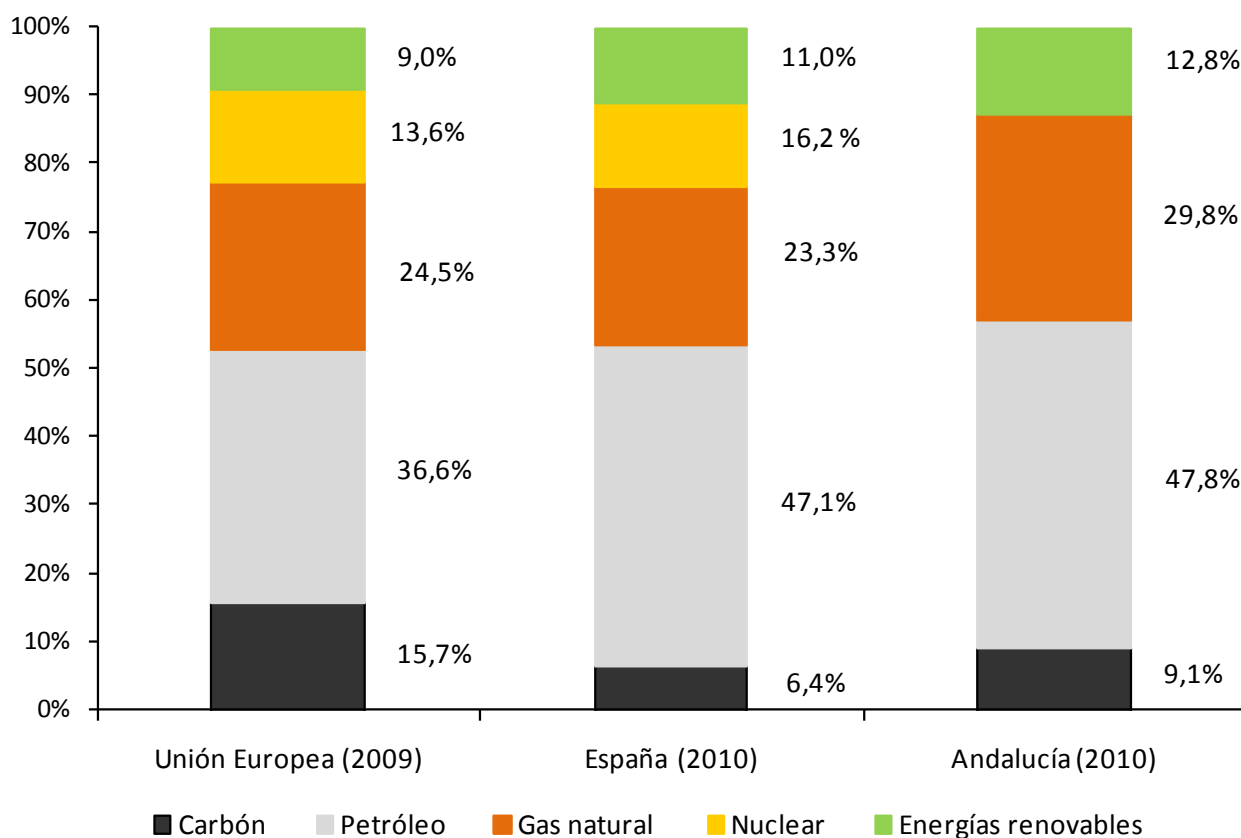


Figura 12.4: Estructura del consumo de energía primaria por fuentes. Carbón (negro), petróleo (gris), gas natural (naranja), nuclear (amarillo) y renovables (verde). Fuente: Datos energéticos de Andalucía, 2010. Agencia Andaluza de la Energía

En el primer decenio del siglo XXI la estructura energética de Andalucía ha experimentado cambios relevantes (**Tabla 12.2**). El aumento de la demanda en relación con el año 2000 ha sido cubierto fundamentalmente por la generación a través de ciclos combinados mediante gas natural y el aumento de las energías renovables: la participación de las renovables producidas en la región sobre el total de energía primaria consumida ha pasado de suponer un 5,6% en 2000 (880,6 ktep) al 11% en 2010 (2.076 ktep); como consecuencia de ello, ha aumentado el grado de autoabastecimiento energético, situándose en el 12,7% (2,4 Mtep producidos), multiplicándose por dos entre 2006 y 2010, aunque todavía está por debajo de la media nacional (26,15%) y europea (48,0%).

Este crecimiento ha sido principalmente debido al auge experimentado por las energías eólica, solar fotovoltaica y termosolar a partir de 2007, habiéndose multiplicado la producción de estas modalidades durante el periodo 2007-2010 por 4,87, 21,7 y 52,6, respectivamente. La producción total de energía primaria a partir de biomasa, aunque ha pasado de 789,4 ktep en 2000 a 1.058 ktep en 2010, muestra un crecimiento menor ($\times 1,24$), por lo que su fracción de participación sobre el conjunto de energía primaria consumida se ha mantenido relativamente constante (de 5,0% en 2000 a 5,6% en 2010). También es de destacar que el porcentaje de producción de energía a partir de biomasa en relación con la energía consumida a partir de esta misma fuente ha pasado de ser del 100% en 2000 al 75% en 2010, haciendo patente que en el crecimiento del consumo de energía primaria a partir de biomasa ha desempeñado un papel importante la adquisición de biomasa producida fuera de la región (la diferencia entre el consumo de energía a partir de biomasa y la producción de energía primaria para consumo interior en 2010 fue de 351,8 ktep, que corresponde al 56,7% del incremento del consumo de energía primaria procedente de biomasa entre 2000 y 2010). Lo anterior, no obstante, coincide con un cierto grado de exportaciones de biomasa producida en Andalucía a países de la Unión Europea que cuentan con un marco retributivo que hace interesante este tipo de operaciones comerciales.

Tabla 12.2 Síntesis de la estructura de la energía en Andalucía. Valores en ktep

Unidad ktep	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Consumo total de energía primaria	15.658,1	16.035,3	16.826,5	18.158,9	18.834,9	19.993,5	19.957,9	21.136,9	20.154,2	18.746,4	18.913,8
<i>De los cuales:</i>											
Petróleo	8.841,0	9.127,2	9.222,8	10.032,5	10.215,8	10.162,4	10.054,9	10.380,7	9.982,5	9.193,5	9.044,3
Gas natural	1.962,0	2.105,1	2.688,1	3.095,3	3.828,1	5.597,5	6.249,2	6.420,8	6.524,9	5.601,3	5.638,0
Carbón	3.193,5	3.005,1	3.216,2	3.178,9	3.177,3	3.303,6	2.792,9	3.291,5	1.750,6	2.175,6	1.727,6
Consumo de energía a partir de renovables	880,6	918,0	1.017,5	5.994,3	3.993,2	1.023,8	828,3	1.081,9	1.610,0	1.824,6	2.427,8
<i>De los cuales:</i>											
Consumo de energía a partir de biomasa	789,4	794,0	900,3	846,4	849,0	867,2	670,9	901,6	1.266,7	1.155,8	1.409,8
<i>Finalidad:</i>											
Biomasa térmica	638,7	629,8	664,9	578,1	551,4	563,7	367,5	564,1	613,5	471,5	629,7
Biocombustibles	0	0	0	21	21	17,5	36,1	47,8	98	166,7	228,7
Consumo eléctrico y pérdidas	150,7	164,2	235,4	247,3	276,6	286,0	267,3	289,7	555,2	517,6	551,4
Producción total de energía primaria para consumo interior	1.504,7	1.779,5	1.883,4	1.588,7	1.674,6	1.548,6	1.150,6	1.376,7	1.832,1	1.957,8	2.395,2
<i>De los cuales:</i>											
Producción total de energía primaria para consumo interior a partir de renovables	880,6	918,0	1.017,6	973,2	972,1	1.006,3	784,6	1.031,5	1.543,3	1.702,4	2.076,0
<i>De los cuales:</i>											
Biomasa	789,4	794,0	900,3	825,4	828,0	849,7	627,2	851,1	1.200,0	1.033,7	1.058,0
Hidráulica	49,7	79,8	65,9	87,9	78,3	54,5	39,6	34,4	41,6	70,1	126,7
Eólica	30,8	31,1	35,3	41,5	44,5	78,0	89,7	104,6	214,4	375,7	510,1
Solar térmica	10,2	12,5	15,4	17,4	19,8	22,5	27,1	32,4	39,0	44,2	52,2
Solar fotovoltaica	0,5	0,6	0,7	1,0	1,5	1,6	1,0	4,6	36,0	122,6	97,4
Termosolar	0	0	0	0	0	0	0	4,4	12,3	56,1	231,6
%PT biomasa/ PT renovables	89,6%	86,5%	88,5%	84,8%	85,2%	84,4%	79,9%	82,5%	77,8%	60,7%	51,0%
%PTrenovables/Consumo total	5,6%	5,7%	6,0%	5,4%	5,2%	5,0%	3,9%	4,9%	7,7%	9,1%	11,0%
%PTbiomasa/Consumo total	5,0%	5,0%	5,4%	4,5%	4,4%	4,2%	3,1%	4,0%	6,0%	5,5%	5,6%
Grado de autoabastecimiento	9,6%	11,1%	11,2%	8,7%	8,9%	7,7%	5,8%	6,5%	9,1%	10,4%	12,7%
%Producción energía a partir de biomasa/Consumo de energía a partir de biomasa	100%	100%	100%	97,5%	97,5%	98,0%	93,5%	94,4%	94,7%	89,4%	75,0%

Fuente: Datos energéticos de Andalucía, 2010. Agencia Andaluza de la Energía

12.4.2. La aportación de la biomasa a la estructura energética de Andalucía

La biomasa es utilizada tanto para usos térmicos como para generación eléctrica. Para fines térmicos se destinaron en 2010 629,7 ktep, el 44,7% del consumo de energía primaria a partir de biomasa, habiéndose mantenido un rango similar cuantía durante el periodo 2000-2010 (**Tabla 12.3**).

La biomasa para generación eléctrica ha aumentado considerablemente en el periodo 2000-2010. De hecho, en este periodo se ha producido un trasvase del uso de la biomasa desde los usos térmicos hacia las plantas de generación eléctrica.

De acuerdo con el Plan Andaluz de Sostenibilidad Energética (PASENER), la potencia instalada en el año 2000 era de 51,3 MW, siendo en 2010 de 210,4 MW, a lo que hay que añadir 23,5 MW adicionales a partir de biogás (**Tabla 12.3**). Estas cifras se aproximan al objetivo del PASENER para 2013, establecido en 256 MW de potencia a partir de biomasa y 20,10 MW a partir de biogás.

Tabla 12.3. Evolución de la potencia y capacidad instalada en biomasa eléctrica, térmica y biocarburantes, 2003-2010

		2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Biomasa y biogás uso térmico	ktep	578,1	551,4	563,7	367,5	564,1	613,5	471,5	629,7
Biomasa generación eléctrica	MW	115,57	127,31	129	164,71	171,88	178,43	189,4	210,4
Biogás generación eléctrica	MW							19,83	23,5
Biocarburantes	ktep						64,69	235,39	306,33

Fuente: La biomasa en Andalucía. Informe técnico. Septiembre 2011. Agencia Andaluza de la Energía

La aportación de la potencia eléctrica instalada por medio de biomasa en relación con la potencia total supone el 1,43% de la potencia total instalada y el 4,7% de la potencia instalada a partir de fuentes renovables (**Tabla 12.4**). En cuanto a la producción de electricidad, la obtenida a partir de biomasa se ha multiplicado por 6,4 en el periodo 2000-2010, en tanto que la producción total en la Comunidad Autónoma se ha multiplicado por 1,9 (**Tabla 12.5**).

Tabla 12.4. Potencia eléctrica instalada en Andalucía, 2010. Datos en MW

Potencia eléctrica total	14.681,5
Régimen ordinario	9.161,6
Régimen especial	5.511,9
Mediante cogeneración	1.030,5
Mediante renovables	4.481,4
Hidráulica	151,7
Eólica	3.008,7
Solar fotovoltaica	724,5
Termosolar	330,9
Biomasa	210,4
Biogás	23,5
Residuos	31,7
Generación aislada	7,9

Fuente: Datos energéticos de Andalucía, 2010. Agencia Andaluza de la Energía

Tabla 12.5. Producción bruta de energía eléctrica en Andalucía, 2000-2010. Datos en MW

Unidad GWh	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Renovables											
Eólica	361,6	365,7	414,1	487,3	522,2	916,2	1.053,0	1.216,2	2.493,5	4.369,0	5.931,7
Hidráulica	103,0	231,3	191,9	258,6	206,1	148,2	104,3	111,1	163,6	251,3	304,5
Solar fotovoltaica	5,2	5,6	6,2	6,9	8,4	7,3	11,6	45,9	410,0	1.416,8	1.123,6
Termosolar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,6	21,4	97,9	444,4
Biomasa	186,5	490,1	697,9	814,6	883,8	958,9	809,4	957,8	978,2	915,8	1.197,8
Total renovables	656,3	1.092,7	1.310,1	1.567,4	1.620,5	2.030,6	1.978,3	2.338,6	4.066,7	7.050,8	9.002,0
%biomasa/ renovables	28,4%	44,9%	53,3%	52,0%	54,5%	47,2%	40,9%	41,0%	24,1%	13,0%	13,3%
Producción bruta total	21.158,4	21.743,9	25.216,7	26.665,4	31.353,0	42.467,4	41.396,0	42.751,1	38.716,7	40.329,5	39.501,4
% renovables/total	3,1%	5,0%	5,2%	5,9%	5,2%	4,8%	4,8%	5,5%	10,5%	17,5%	22,8%
% biomasa/total	0,9%	2,3%	2,8%	3,1%	2,8%	2,3%	2,0%	2,2%	2,5%	2,3%	3,0%

Fuente: Datos energéticos de Andalucía, 2010. Agencia Andaluza de la Energía

Dentro del sector biomasa, se engloba toda materia orgánica susceptible de aprovechamiento energético. En concreto, la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), utiliza la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 para catalogar la “biomasa” como “todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”. Este hecho implica que los recursos de biomasa provengan de fuentes diversas y heterogéneas. En el sector forestal en concreto, la biomasa se genera en los tratamientos y en los aprovechamientos de la vegetación y como residuo de las industrias forestales. La Orden de 29 de diciembre de 2011, por la que se regula el aprovechamiento de la biomasa forestal con destino energético, define biomasa forestal como la fracción biodegradable de los productos, subproductos y residuos procedentes de la silvicultura aplicada a la vegetación que cubre los montes o terrenos forestales.



12.4.2.1. Biomasa para uso eléctrico

La biomasa para uso eléctrico reúne las aplicaciones para generación de energía eléctrica tanto de forma exclusiva como mediante sistemas de cogeneración o sistemas de co-combustión.

Si bien es un sistema de producción más oneroso y menos eficiente desde el punto de vista energético que el aprovechamiento térmico directo, la obtención de electricidad mediante biomasa reúne una serie de características (capacidad de almacenamiento, previsibilidad, posibilidad de regulación de la potencia obtenida) que la hacen atractiva desde el punto de vista de su participación en el conjunto de energías renovables. Como el resto de las energías renovables, ofrece ventajas en relación con el uso de energía fósil: cada MW de biomasa producido equivale, aproximadamente, a la reducción de 2.500 toneladas equivalentes de petróleo y evita la emisión de 2.700 t de CO₂ al año.

No obstante, la producción de electricidad con biomasa tiene que hacer frente a unas limitaciones que tal y como destaca el Plan de Energías Renovables de España 2011-2020, en comparación con otras fuentes de suministro han añadido dificultades a su desarrollo. Son necesarias centrales térmicas específicas con calderas adecuadas al bajo poder calorífico de la biomasa, a su alto porcentaje de humedad, a la heterogeneidad de la materia prima y al gran contenido en volátiles. Comparativamente, el rendimiento es menor y las inversiones son mayores que si se utilizara combustible convencional. Además, se ha de resolver también la mayor complejidad en la logística del aprovisionamiento de la biomasa. La gran demanda de combustible obliga a asegurar un abastecimiento continuo, que se encarece conforme aumenta la distancia de procedencia; en este aspecto, los promotores deben hacer un balance entre las elevadas inversiones que requieren las centrales de pequeña potencia (por debajo de 10 MW) y las dificultades de operación y de logística de las centrales mayores, que exigen un abastecimiento mayor. La instalación de centrales de pequeña potencia también ha tenido el freno de la tecnología disponible: las tecnologías tradicionales de generación o cogeneración para biomasa con turbinas de vapor están indicadas para grandes potencias ya que la economía de escala tiene una gran incidencia; nuevos sistemas basados en la gasificación permiten nuevos planteamientos de producción en régimen de generación o cogeneración para pequeñas potencias y consumos. En este sentido, la Comunicación COM/848/2006, "Renewable energy road Map" plantea entre los retos futuros del sector desarrollar tecnologías eficientes económica y medioambientalmente para la conversión de la biomasa en energía eléctrica, calor, productos y combustibles como aumentar el rendimiento de los sistemas de co-combustión hasta el 40%, desarrollar sistemas de gasificación de biomasa competitivos a nivel comercial o implantar instalaciones autónomas de generación eléctrica de entre 5 y 50 MWe a partir de cultivos energéticos con costes medios de 0,05 €/kWh o menores.

Los países de la Unión Europea han introducido distintos mecanismos para incentivar la producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables. Uno de los procedimientos es mediante el establecimiento de bonificaciones en la tarificación de la electricidad. En el caso español, el marco regulatorio para la generación eléctrica con energías renovables se basa en garantizar el cobro de una remuneración por tecnología superior al precio del mercado mayorista. Este sobre coste se financia a través de la propia tarifa eléctrica al ser repartido entre los productores con energías convencionales (como resultado del sistema de fijación de precios en el mercado de producción eléctrica, que prioriza a la electricidad de origen renovable) y los consumidores.

En España, la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial está regulada por el Real Decreto 661/2007. Uno de los fundamentos del modelo español es reconocer el derecho de los productores de energía en régimen especial a percibir una tarifa regulada al vender la energía eléctrica producida. En algunas modalidades de energía renovable (entre ellas la producida a partir de biomasa), los productores también tienen derecho a una prima consistente en una cantidad adicional al precio que resulte en el mercado organizado o el precio libremente negociado por el titular o el representante de la instalación. Este complemento de retribución varía en función del recurso utilizado para producir la energía renovable y su cuantía está determinada en base a factores como la contribución a la mejora del medio ambiente, el ahorro de energía primaria, la eficiencia energética y los costes de inversión necesarios para poner en marcha la tecnología. En resumen: el incentivo recae sobre las instalaciones productoras de electricidad mediante energía renovable, que tienen asegurada las condiciones favorables por un plazo de 25 años.

La tarifa regulada y la prima de referencia dependen de la potencia de la central productora de energía, del tipo de recurso energético empleado y del plazo de tiempo en funcionamiento. La biomasa forestal primaria queda incluida dentro de dos de las categorías que prevé el Real Decreto en función del tipo de combustible principal empleado en la planta de producción eléctrica: como cultivo energético (categoría b.6.1) y como residuos de aprovechamientos forestales y otras operaciones selvícolas en las masas forestales y espacios verdes (categoría b.6.3). La biomasa procedente de industrias forestales queda incluida en la categoría b.8.2. El hecho de pertenecer a una de estas categorías implica una retribución de la tarifa regulada y de la prima diferente (**Tabla 12.6**) con la consecuente repercusión sobre el precio de adquisición de la materia prima. La diferencia de retribución es considerable, de manera que para una instalación con el mismo rango de potencia y plazo, la tarifa regulada empleando cultivos energéticos forestales supone en torno a un 24% más que si empleara biomasa forestal residual.

Tabla 12.6. Condiciones de la tarifa regulada y de la prima de referencia para las plantas de generación de energía eléctrica cuyo aprovisionamiento sea biomasa forestal

Categoría	Recurso energético	Potencia	Plazo	Tarifa regulada (c€/kWh)	Prima (c€/kWh)
b.6.1.	Cultivos energéticos	Menor de 2 MW	primeros 15 años	16,0113	11,6608
			a partir del año 15	11,8839	0
		Mayor de 2 MW	primeros 15 años	14,659	10,0964
			a partir del año 15	12,347	0
b.6.3.	Residuos de aprovechamientos forestales y otras operaciones selvícolas en las masas forestales y espacios verdes	Menor de 2 MW	primeros 15 años	12,7998	8,4643
			a partir del año 15	8,6294	0
		Mayor de 2 MW	primeros 15 años	8,6294	7,2674
			a partir del año 15	8,066	0

Fuente: Real Decreto 661/2007

La tarifa regulada para las centrales que utilicen biomasa forestal se sitúa próxima al valor promedio para el conjunto de modalidades de energía en régimen especial (media de 10,45 c€/kWh, con un máximo de 44,0381 para la solar fotovoltaica); la prima de referencia alcanza un valor comparativamente superior a la media (media de 5,53 c€/kw con un máximo de 25,4 c€/kWh para la solar térmica).

El Real Decreto-Ley 1/2012 ha introducido la suspensión de los procedimientos de preasignación de retribución y ha suprimido los incentivos económicos para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables. Con ello, el régimen de retribución preferente (tarifas reguladas y primas) queda limitado a las instalaciones en funcionamiento previamente a la entrada en vigor del Real Decreto-Ley y a aquellas que hubieran resultado inscritas en el Registro de preasignación de retribución.

Un aspecto relevante del Real Decreto 661/2007 es la definición de los conceptos relacionados con la biomasa forestal. La biomasa de cultivos energéticos forestales (b.6.1.) es definida como aquella de origen forestal procedente del aprovechamiento principal de masas forestales originadas mediante actividades de cultivo, cosecha y en caso necesario, procesado de las materias primas recolectadas y cuyo destino final sea el energético. Por su parte, la biomasa procedente de residuos de aprovechamientos forestales y otras operaciones selvícolas en las masas forestales y espacios verdes (b.6.3.) se define como la biomasa residual producida durante la realización de cualquier tipo de tratamiento o aprovechamiento selvícola en masas forestales, incluidas cortezas, así como la generada en el mantenimiento y limpieza de los espacios verdes.

La definición de cultivos energéticos forestales fue objeto de una aclaración posterior, en 2008, por parte del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, que fue asumida por el Comité Forestal Nacional. En esta aclaración se considera como forma de determinar si una biomasa forestal procede de cultivo energético la existencia de un documento de planificación técnico a largo plazo (proyecto de ordenación, plan técnico de gestión forestal a un mínimo de 10 años, etc.) en el que, entre otras cosas, se fije que el objetivo principal de la masa forestal sea la producción energética y que especifique de manera clara la vigencia del propio documento de planificación y la articulación en el tiempo y en el espacio de las operaciones de aprovechamiento, cultivo, mantenimiento, desarrollo y defensa de dicha masa forestal para la consecución

de dicho objetivo. En contraposición, podrá tener la consideración de biomasa procedente de residuo la biomasa de los árboles u otro material vegetal obtenida de cortas intermedias de mejora, dosificación de la competencia, saneamiento, etc. (clareos, claras, cortas de carácter fitosanitario; en cualquier caso siempre antes del turno o edad de madurez o antes del aprovechamiento final) en masas forestales cuyo destino final no sea la producción energética. Las definiciones incluidas en la Orden de la Consejería de Medio Ambiente de 29 de diciembre de 2010 incorporan el sentido de estas aclaraciones a las definiciones del Real Decreto 661/2007.

A finales de 2010 existían en Andalucía 18 centrales de biomasa eléctrica y cogeneraciones con biomasa con una potencia total instalada de 208,70 MW (**Tabla 12.7**). España cuenta con una potencia instalada en plantas de biomasa de 519,4 MW, por lo que la potencia instalada de biomasa en Andalucía representa el 40,18% del total.

Tabla 12.7. Plantas de generación eléctrica con biomasa en funcionamiento

Municipio	Provincia	MW	Tipo de biomasa
Níjar	Almería	1,7	Residuos de invernadero
Baena	Córdoba	25	Productos del olivar
Cabra	Córdoba	8	Productos del olivar
Cañete de las Torres	Córdoba	0,1	Productos del olivar
Lucena	Córdoba	14,3	Productos del olivar
Lucena	Córdoba	1,72	Productos del olivar
Palenciana	Córdoba	5,37	Productos del olivar
Palenciana	Córdoba	5,65	Productos del olivar
Palenciana	Córdoba	12,9	Productos del olivar
Puente Genil	Córdoba	9,82	Mixto (derivados olivar, cultivos energéticos, forestal)
Villanueva del Arzobispo	Jaén	16	Productos del olivar
Fuente de Piedra	Málaga	8,04	Productos del olivar
Villanueva de Algaidas	Málaga	9,15	Mixto (derivados olivar, cultivos energéticos, forestal)
San Juan del Puerto	Huelva	40,95	Biomasa forestal
San Juan del Puerto	Huelva	27	Biomasa forestal
Linares	Jaén	2	Biomasa forestal
Andújar	Jaén	6	Mixto (derivados olivar, cultivos energéticos, forestal)
Linares	Jaén	15	Mixto (derivados olivar, cultivos energéticos, forestal)

Fuente: La biomasa en Andalucía. Septiembre 2011. Agencia Andaluza de la Energía

El suministro de la mayor parte de las centrales de biomasa se basa en productos derivados del cultivo del olivo (orujo, orujillo, hojas y podas de olivar). Ello explica la distribución territorial de las centrales, coincidente con la mayor densidad de cultivo olivarero. Las centrales del norte de la provincia de Jaén (Linares y Andújar) tienen una vocación mixta, orientando su suministro hacia una mezcla de biomasa agrícola-forestal. Las ubicadas en la provincia de Huelva, en San Juan del Puerto, tienen una orientación básicamente forestal.

De acuerdo con información de la Agencia Andaluza de la energía, el suministro teórico aproximado de biomasa que requieren los 208,7 MW de potencia instalada es de aproximadamente 660 ktep/año (equivalentes a unos 3,1 ktep/año por MW), que se aportaron en 2010 a partir de un 29% de orujillo, un 37% de orujo y un 34% de otro tipo de biomasa, que incluye restos de poda y jardinería, hoja de olivo, residuos de industrias forestales y biomasa forestal (madera y leñas). Esta última categoría supone en torno a un 6,5% de la biomasa total consumida, unas 43.500 tep/año que tomando como factor de conversión 1 tonelada de biomasa forestal = 0,29 tep (válida para biomasa con el 35% de humedad), son equivalentes a unas 150.000 toneladas de biomasa forestal al año.

Las previsiones del PASENER para 2013 suponen alcanzar 256 MW de potencia eléctrica con biomasa, lo que puede alcanzarse con las centrales en construcción. Es previsible que las nuevas centrales demanden mayor cantidad de biomasa forestal: según las previsiones de la Agencia Andaluza de la Energía, la demanda total de las centrales eléctricas que usen biomasa será de en torno a 800 ktep/año, de las cuales aproximadamente el 25% (200 ktep/año) podría proceder de biomasa forestal, lo que supondría del orden de 700.000 toneladas de biomasa al año.

El precio que los productores de energía están dispuestos a pagar depende de muchos factores. Está sujeto a las fluctuaciones de los precios de las energías convencionales con los que tienen que competir. En relación con otras tecnologías, el precio debe internalizar los mayores costes de inversión de las centrales de biomasa debido a su menor rendimiento y las características especiales requeridas por los equipos para poder utilizar biomasa de forma eficiente.

De acuerdo con los estudios realizados para el Plan de Energías Renovables 2001-2020, la principal componente de los costes de explotación en este tipo de instalaciones es la compra de la biomasa. Los costes debidos al suministro de la biomasa varían según la cantidad demandada, la distancia de transporte (que en general no suele superar los 130 km) y los posibles tratamientos para mejorar su calidad, como el secado, el astillado o la peletización, a lo que hay que añadir la disponibilidad del combustible y su estacionalidad. En todo caso, es esperable una reducción en los costes para el año 2020 debido a la mejora de la eficiencia (**Tabla 12.8**).

Tabla 12.8. Costes de generación de energía eléctrica con biomasa (unidad c€/kWh) en 2010 y previsión para 2020

Potencia de la planta	Categoría de combustible	2010	2020
10 a 20 MW	b.6.1.	17,7 - 20,0	16,8 - 18,7
10 a 20 MW	b.6.3.	13,6 - 15,5	12,9 - 14,6
2 MW	b.6.1.	25,2 - 27,6	22,0 - 25,7
2 MW	b.6.3.	20,8 - 21,9	18,0 - 20,6

Fuente: Plan de Energías Renovables 2011-2020. IDAE

De acuerdo con las estimaciones del IDAE, los precios a los que se podría comprar biomasa según el tipo de central de generación varían de forma muy apreciable en función de la potencia de la central de generación (**Tabla 12.9**).

Tabla 12.9. Estimación de precios de compra de biomasa según tipo de central de generación. Biomasa con un PCI de 3.000 kcal/kg puesta en planta con una humedad en torno al 20%

	€/t
2 MW caldera más turbina	
b.6.1. (16,8096 c€/kWh)	35,52
b.6.3 (13,2994 c€/kWh)	13,74
10 MW caldera más turbina	
b.6.1. (15,5084 c€/kWh)	64,45
b.6.3 (12,5148 c€/kWh)	41,02
20 MW caldera más turbina	
b.6.1. (15,5084 c€/kWh)	79,85
b.6.3 (12,5148 c€/kWh)	52,68

Fuente: Plan de Energías Renovables 2011-2020. IDAE

Considerando los márgenes de beneficio de los agentes intermedios y la traducción de estos precios al 45% de humedad, el estudio del IDAE concluye que, bajo las condiciones actuales, la movilización de la biomasa forestal sólo sería rentable desde el punto de vista del balance coste / ingresos para las plantas a partir de mediana potencia (10 MW) y, en este último caso, únicamente sería posible movilizar una pequeña parte de la biomasa potencial disponible, dado que los costes de extracción superarían en general el umbral de precios que las plantas estarían dispuestas a pagar.

12.4.2.2. Biomasa para uso térmico

La biomasa térmica reúne al conjunto de aplicaciones tecnológicas dedicadas al suministro de calor para calefacción, climatización o procesos industriales.

La extracción de biomasa en forma de madera, leñas y otros productos ha sido uno de los principales aprovechamientos que históricamente se han llevado a cabo en los montes. Su destino era servir como fuente de energía básica en los hogares, alimentando hornos, hornillas, calderas, chimeneas y estufas. Constituía, en definitiva, el suministro esencial para el desenvolvimiento humano. La biomasa todavía se emplea en el ámbito doméstico para usos térmicos, utilizando como fuente de suministro las maderas y leñas forestales, ya sea de modo directo o convertidas en carbón vegetal. La extracción de maderas y leñas del monte es un aprovechamiento reglado que está incluido en la legislación forestal y que todavía está extendido por el territorio.

Aunque este aprovechamiento está recogido en las estadísticas forestales, los valores consignados son sólo orientativos puesto que su cuantificación es difícil. A menudo, por otra parte, las leñas se ofrecen sin contrapartida económica, sin que ello signifique desmerecer su importancia. En cualquier caso, se trata de un aprovechamiento importante que ha de ser considerado en la planificación de los usos de la biomasa existente en los terrenos forestales y que seguirá desempeñando un papel relevante a escala local y comarcal, vinculado en general a una explotación a pequeña escala, poco normalizada y difícil de sistematizar.

El desarrollo de la energía térmica de corte moderno está ligado, como es usual en el contexto socioeconómico contemporáneo, a procesos de normalización y homogeneización de la materia prima y a la estandarización de los dispositivos de combustión. Se sustenta en la instalación de calderas que demandan un combustible que mantenga la uniformidad en sus características. Su finalidad principal es la calefacción; sin embargo, también es posible su empleo para refrigeración (aire acondicionado) o con un doble uso para cubrir la climatización en un sentido amplio, lo que acrecienta las posibilidades de la biomasa térmica para territorios en donde las necesidades de calefacción tengan a priori menos relevancia, como es el caso de gran parte de Andalucía.

Adicionalmente al uso doméstico, la biomasa para uso térmico cubre un amplio abanico de demandas: en el ámbito residencial comunitario, en equipamientos de uso público y en el sector industrial. De modo particular, Andalucía cuenta con una significativa tradición de uso térmico de la biomasa en el sector industrial, siendo la fuente de suministro en las últimas décadas a los productos derivados de la industria oleícola como los huesos de aceituna, orujillo y hojas (de hecho, el factor de mayor influencia en el consumo andaluz de biomasa es el comportamiento de la campaña de la aceituna), pero también se hace uso de restos originados en otras industrias agroalimentarias (cáscaras de frutos secos), forestales (astillas, virutas) o derivados de las podas y leñas de los cultivos agrícolas leñosos y la actividad selvícola.

Estos materiales pueden ser transformados en pelets y briquetas, astillas molturadas y compactadas que facilitan su transporte, almacenamiento y manipulación, convirtiéndolos en material más apropiado para nuevos usos térmicos que se están desarrollando recientemente ligados al uso residencial (doméstico o comunitario) y de servicios. La biomasa vegetal estandarizada reemplaza hoy en día como fuente energética al carbón, derivados del petróleo o gas natural, del mismo modo que estas fuentes de suministro sustituyeron en el pasado reciente a la biomasa no estandarizada (leñas). Su potencial de crecimiento es muy importante en tanto en cuanto se acentúe la tendencia alcista del precio de los combustibles fósiles, lo que impulsará la instalación de calderas alimentadas con biomasa. Es notable destacar que la demanda internacional de biomasa térmica ha dado lugar a la existencia de un mercado europeo, caracterizado porque las necesidades de los países demandantes de pelets es cubierta por la oferta de países excedentarios en la producción de este tipo de biomasa.

Las aplicaciones térmicas para producción de calefacción y agua caliente sanitaria son las más frecuentes en el sector de la biomasa. Las posibilidades de utilización son numerosas: usos térmicos a pequeña y mediana escala, en calderas o estufas individuales en los hogares y en calderas para edificios públicos o bloques de viviendas; o usos a gran escala en redes de climatización. En Andalucía la demanda doméstica para calefacción es inferior a otros territorios españoles y europeos, aunque esta apreciación general debe ser matizada por la gran diversidad de situaciones climáticas que se dan cita en la región, existiendo comarcas y municipios con grandes exigencias de demanda de calefacción. Por el contrario, se parte de una

tradición de uso térmico de la biomasa en el sector industrial muy consolidada a partir de subproductos y residuos del sector industrial agroalimentario (orujillo, hueso de aceituna, cáscara de frutos secos), que sirven de combustible para la producción de calor en las mismas instalaciones en donde se genera o es empleado en otros establecimientos (industrias cerámicas, cementeras, mataderos e industrias cárnicas, granjas avícolas y porcinas, industrias de la madera, etc.).

La biomasa térmica moderna se ha desarrollado con retraso en España en relación con otros países; esto es achacable, entre otras razones, a que durante años el interés se centró en la introducción de mejoras en las calderas y en la sustitución del tipo de combustible fósil empleado. Esto ha originado una pérdida de competitividad tecnológica de los sistemas térmicos basados en biomasa, aunque esta situación está cambiando en los últimos años, habiendo experimentado en los últimos años un gran impulso la instalación de calderas para uso doméstico en hogares o edificios (incluyendo instalaciones modélicas en hoteles, colegios, instalaciones municipales, etc) y las redes de climatización centralizada que proveen a los usuarios de calefacción en invierno y de frío en forma de aire acondicionado en verano.

El uso térmico, al contrario que el eléctrico, no dispone de un régimen tarifario especial que determine el precio percibido por la energía generada, ni existen primas al consumo. En este sector el combustible renovable compite directamente con los combustibles tradicionales. No obstante, la instalación de equipos que empleen biomasa para usos térmicos está recogida en los programas de incentivos públicos, contemplando aspectos logísticos (como el programa BIOMCASA del IDAE que apoya a las empresas de servicios que provean una oferta de calidad adaptada a las necesidades de los usuarios de agua caliente y climatización en edificios) o la mejora de la eficiencia energética en los edificios y la implantación de fuentes renovables en todos los ámbitos (como las órdenes de incentivos gestionadas por la Agencia Andaluza de la Energía destinada al fomento de actuaciones como la instalación de equipos de biomasa para usos térmicos, sustitución o mejora de equipos e instalaciones térmicas para aumentar la eficiencia energética y la sustitución de energías tradicionales como el gasóleo o la electricidad por otras menos contaminantes).

El consumo de biomasa térmica en Andalucía en 2010 alcanzó 629,69 ktep (**Tabla 12.10**), teniendo como objetivo para 2013, según el PASENER, un consumo de 664 Ktep.

Tabla 12.10. Consumos anuales por tipo de biomasa en Andalucía, 2010

Tipo de biomasa	Consumo 2010 ktep
Orujillo	216,4
Hueso	173,83
Leña forestal	54,35
Leña cultivos arbóreos	148,92
Residuos agro-industriales	8,77
Pellets, briquetas, astilla	16,22
Biogás	6
Carbón vegetal	5,2
TOTAL	629,69

Fuente: La biomasa en Andalucía. Septiembre 2011. Agencia Andaluza de la Energía

Las instalaciones basadas en la biomasa térmica requieren de una logística de aprovisionamiento a la que pueden hacer frente empresas de servicios que incorporen a la leña como materia prima en bruto las utilidades precisas para su utilización (densidad, tamaño, porcentaje de humedad, contenido de cenizas, etc).

Las astillas procedentes de la trituración de madera reducen la densidad de las leñas y aportan un biocombustible de dimensiones regulares, con un tamaño de entre 30 y 50 mm. Los pellets, obtenidos de la compactación de material lignocelulósico en estado natural, suponen un paso más en la normalización del biocombustible como suministro para las calderas. Entre sus ventajas destaca su fácil almacenamiento

dado que al ser un producto comprimido ocupa unas 4,3 veces menos del espacio que ocupan las virutas que los originan. La peletización y el astillado incorporan la biomasa al mercado doméstico ofreciendo productos de calidad cuya manipulación es cómoda y limpia, equiparable a la de los combustibles fósiles (carbón, derivados del petróleo, gas). Idealmente, los procesos de elaboración deben adicionar las utilidades precisas incurriendo en el mínimo coste económico y energético.

La materia prima para los pellets puede proceder de residuos de la industria de la madera o de restos agrícolas o forestales. La capacidad de producción de pellets en España se ha incrementado en los últimos años, aunque es un mercado caracterizado por su escaso grado de madurez. Según datos de la iniciativa “Infobiomasa” (<http://infobio.ctfc.cat/>) se estima que existen unas treinta plantas productoras con una capacidad superior a 10.000 t/año de pellets, junto con un número indeterminado de instalaciones de menor tamaño ligadas a aserraderos o carpinterías, que tendrían una capacidad potencial de producción de unas 800.000 t/año. Sin embargo, la producción real se sitúa en el 30% de esta capacidad potencial (unas 240.000 t/año) que, además, se destinan principalmente a la exportación dado que no hay suficientes calderas y estufas instaladas para absorber la producción (el consumo actual estimulado de pellets de madera en España en 2010 se situó entre 60.000 y 95.000 t). El precio de los pellets se sitúa, dependiendo de factores como su calidad o la forma de dispensación, entre 0,15 a 0,50 €/kg, con valores usuales rondando los 0,3 €/kg. Pese a que la evolución de los costes de producción en relación con el precio de venta ha sido desfavorable y a que varias plantas cerraron durante 2012, el sector productor de pellets mantiene las expectativas de crecimiento de la demanda en los próximos años.

Andalucía cuenta con una capacidad instalada para la fabricación de pellets de 41,2 ktep distribuida en 7 instalaciones (**Tabla 12.11**). El precio pagado por la planta de producción de pellet por la biomasa es variable, aunque la horquilla entre 30 y 45 €/t es representativa. La distancia de transporte para esta materia prima no suele superar los 50 km.

Tabla 12.11. Plantas de fabricación de pellets en Andalucía, 2010

NOMBRE	MUNICIPIO	PROVINCIA	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN (ktep/año)
MARCHENA ENERGÍA RENOVABLE	Alcolea	Córdoba	0,8
RECICLADOS LUCENA	Lucena	Córdoba	3,20
ENERGÍA ORIENTAL	Moclín	Granada	8,00
MÁGINA ENERGÍA	Mancha Real	Jaén	8,80
RENOVABLES BIOCAZORLA	Cazorla	Jaén	12,00
SCA NTRO PADRE JESUS	Jabalquinto	Jaén	2,40
APROVECHAMIENTOS ENERGÉTICOS DEL CAMPO	Aldeaquemada	Jaén	6,00
TOTAL			41,20

Fuente: La biomasa en Andalucía. Septiembre 2011. Agencia Andaluza de la Energía



12.5. Potencial de biomasa en los montes de Andalucía

12.5.1. Autorizaciones para aprovechamientos forestales en montes públicos de Andalucía

Las estadísticas de aprovechamientos forestales en Andalucía, recogidas en las memorias de seguimiento del Plan Forestal Andaluz, reflejan la evolución de las extracciones de madera y leña en los montes públicos de Andalucía (**Tablas 12.12, 12.13 y 12.14**). A partir del año 2009 las extracciones de biomasa se recogen de modo diferenciado, habida cuenta de la consolidación de un mercado específico para este tipo de materia prima.

Estos datos tienen su origen en las memorias de autorizaciones concedidas anualmente para los aprovechamientos de los terrenos forestales públicos. Son estimaciones obtenidas a partir de los Planes de Aprovechamiento anuales, por lo que puede existir una cierta desviación en relación con lo realmente extraído de los montes. Hay que resaltar, igualmente, que los datos se refieren exclusivamente a aprovechamientos en monte público.

La media de extracción de madera de pinos en el período 2006-2010 es de 254.430 m³, equivalentes a 152.658 toneladas (tomando un factor de conversión de 1 m³ = 0,6 t). La media de leñas durante ese mismo periodo ascendió a 152.248 m³ o 60.899 t. Si a lo anterior le añadimos 177.927 t de biomasa extraída como media en 2009-2010, se obtiene un valor medio de extracciones totales de 391.484 t, con un máximo de 474.203 t en 2009 y un mínimo de 131.914 t en 2006.

Tabla 12.12. Autorizaciones para aprovechamiento forestal de madera en montes públicos de Andalucía. Años 2006-2010

Año	Pinus		Eucalipto		Populus y otras	
	m ³	t	m ³	t	m ³	t
2010	170.260	102.156	9.360	5.616	200	120
2009	405.893	243.536	39.598	23.759	825	495
2008	240.937	144.562	18.534	11.120	625	375
2007	261.012	156.607	54.609	32.765	872	523
2006	194.050	116.430	37.258	22.355	175	105

Fuente: Memorias de seguimiento del Plan Forestal Andaluz, Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente

Tabla 12.13. Autorizaciones para aprovechamiento forestal de leñas en montes públicos de Andalucía. Años 2006-2010

Año	Pinus		Frondosas		Otras	
	Estéreos	t	kg	t	estéreos	t
2010	142.603	57.041	2.185.125	874.050	123.663	49465,2
2009	284.254	113.702	10.385.688	4.154.275	260.513	104205,2
2008	61.598	24.639	6.182.996	2.473.198	138.980	55592
2007	234.074	93.630	6.935.920	2.774.368		
2006	38.711	15.484	2.903.000	1.161.200		

Fuente: Memorias de seguimiento del Plan Forestal Andaluz, Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente

Tabla 12.14. Autorizaciones para aprovechamiento forestal de biomasa en montes públicos de Andalucía. Años 2009-2010

Año	Tm
2010	238.890
2009	116.965

Fuente: Memorias de seguimiento del Plan Forestal Andaluz, Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente

12.5.2. Potencial de biomasa en Andalucía de acuerdo con el Plan de Energías Renovables de España 2011-2020

De acuerdo con el Plan de Energías Renovables de España 2011-2020, las existencias de las 18,2 millones de hectáreas arboladas de España (incluidas las formaciones abiertas) sumaron en 2008 la cantidad de 927,7 millones de m³ con corteza, siendo el crecimiento anual aproximadamente de 46,5 millones de m³. Dado que el volumen de cortas en ese mismo año fue de 17 millones de m³ con corteza, la tasa de extracción en España se sitúa en el 36,5% del crecimiento anual. A ello hay que sumar 987.997 de toneladas de leñas, valor que hay que tomar con cautela dada la dificultad de recoger información al respecto.

Esta tasa de extracción muestra que la demanda global de los tres grandes sectores de productos forestales, papel, tablero y sierra, se sitúa por debajo del crecimiento anual, indicador de que sería posible, bajo criterios de gestión racional, aumentar la obtención de productos lignocelulósicos de los montes sin comprometer su perdurabilidad (siempre hablando en términos generales, y con la necesidad de estudiar las condiciones locales de cada aprovechamiento).

Los diagnósticos de la situación forestal española coinciden en poner de manifiesto la ausencia de gestión y el abandono de restos procedentes de los tratamientos selvícolas en gran parte de la superficie forestal, lo que produce la acumulación de biomasa en el monte. El uso de leñas, en particular, que en su mayor parte procedían históricamente de montes con especies del género *Quercus*, ha decaído radicalmente en las últimas décadas debido al abandono rural y a la difusión de los sistemas de calefacción mediante combustible fósil.

Esta situación coincide con la madurez de las repoblaciones forestales llevadas a cabo en España a partir de 1940, que requieren de tratamientos para su desarrollo y evolución. Solamente entre 1940 y 1970 se repoblaron 2.395.822 ha en toda España (**Figura 12.5**), de las cuales 556.777 ha se ubicaron en Andalucía (ARAQUE, 2009), correspondiendo la mayor parte de ellas a coníferas. A menudo son formaciones forestales con una cantidad considerable de biomasa en pie, pero que debido a la ausencia de las intervenciones precisas se encuentran estancadas, cuando no en franco decaimiento. La escasa calidad de los fustes que se obtendrían si se hicieran los claros y claras recomendables, hace situar a estos productos fuera del mercado de la madera, lo que reduce la posibilidad de llevar a cabo tratamientos selvícolas. En este sentido, el PER concluye que la extracción de parte de esta biomasa y su aprovechamiento como combustible supondría un aliciente económico para los montes, además de tener repercusiones positivas sobre la reducción del riesgo de incendios y su virulencia.



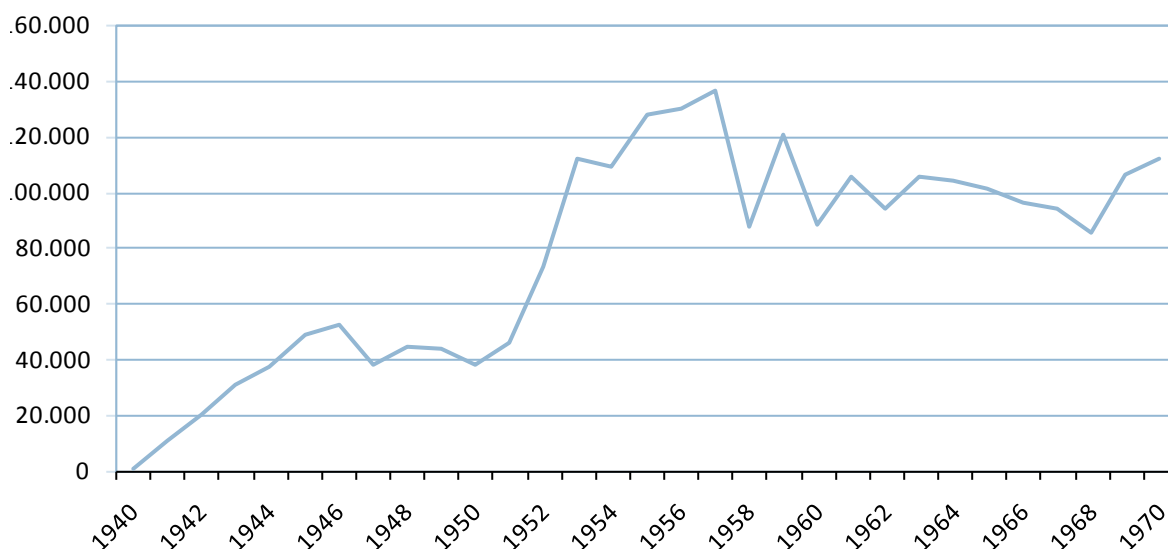


Figura 12.5. Evolución de la superficie repoblada en España. Fuente: PEMÁN y NAVARRO (1998)

Dentro de los trabajos complementarios al Plan de Energías Renovables 2011-2020, el IDAE, junto con la Escuela de Ingeniería de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIM), el Instituto Técnico y de Gestión Agrícola de Navarra (ITGA), Argongra y Aranzada Gestión Forestal, S.L., han elaborado en 2011 el estudio “Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio técnico PER 2011-2020”.

Este estudio ha cuantificado el potencial de biomasa que podría ser aprovechado anualmente en España de acuerdo con sus distintos orígenes y posibilidades de introducción en el mercado energético en función de los costes estimados para su producción y puesta a disposición. El estudio está basado en una completa base metodológica que implementa el conocimiento y la práctica acumulados durante los últimos años sobre el aprovechamiento de la biomasa en sus diferentes modalidades. Los resultados se han integrado en una herramienta informática en formato de Sistema de Información Geográfica que permite realizar consultas con una escala de aproximación óptima comarcal sobre las disponibilidades anuales de biomasa.

Para el ámbito forestal se han diferenciado tres tipos de biomasa: la procedente de restos de aprovechamientos forestales, la que se deriva de la extracción de árbol completo de masas forestales existentes y la que se podría obtener de masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal. No se ha incluido la biomasa procedente de la limpieza de matorral por estimar que en la actualidad su aprovechamiento no es rentable.

Los restos de aprovechamientos forestales se originan en clareos y primeras claras; este tipo de biomasa se ha subdividido a su vez en una clase correspondiente a los restos con punta delgada de 7-7,5 cm (en la cual se incluyen raberones, ramas y ramillas procedentes de los distintos tratamientos y árboles completos con diámetro inferior a 7,5 cm) y otra compuesta por raberones, ramas y ramillas procedentes de distintos tratamientos y árboles completos con diámetro inferior a 20 cm. Estos restos proceden de los tratamientos y aprovechamientos de masas forestales existentes (ramas, raberones, etc.) y su aprovechamiento está caracterizado por la complicada mecanización de los terrenos forestales, la necesidad de operaciones de astillado o compactación en monte con el fin de abaratar los costes de transporte a partir de una determinada distancia o la existencia en algunos casos de usos alternativos, entre otros rasgos.

Por árbol completo de masas forestales existentes se entiende el aprovechamiento de aquellos árboles enteros procedentes de masas naturales o implantadas en el pasado con otros fines diferentes a los energéticos, cuyo aprovechamiento actual se destina enteramente al fin energético porque cuentan con nulo aprovechamiento maderero o de otros usos alternativos.

Las masas forestales o leñosas susceptibles de implantación son aquellas cuyo único fin es el energético para lo que se lleva a cabo una silvicultura específica; por tanto, la metodología identifica como masas forestales o leñosas susceptibles de implantación a aquellas repoblaciones (llevadas a cabo en terreno forestal) cuyo fin último es la valorización energética.

Se ha considerado que los tratamientos que no suponen la corta de árboles, como las podas o los clareos (cuyo fin es la formación y mejora de la vegetación, la protección frente a plagas y enfermedades o la reducción del riesgo de incendios), no tienen un fin comercial y, por tanto, no entran en competencia con otros usos como el maderero; este tipo de tratamientos selvícolas se asocia en la metodología a la obtención de biomasa de restos.

Los demás tratamientos (claras, cortas intermedias o de mejora, cortas finales) originan, por un lado, fustes, los cuales, según la metodología, tienen un posible y casi seguro uso maderero (dependiendo del diámetro de los árboles) y, por otro, rabeones (punta de corta de copas) y ramas y ramillas, que se identifica como biomasa de restos forestales. En general, se entiende que los árboles alcanzarán dimensiones para un inconfundible uso maderero en el caso de cortas finales y segundas claras.

La estimación de la biomasa existente en los diversos ecosistemas forestales se lleva a cabo a tres niveles denominados biomasa total potencial, biomasa accesible y biomasa disponible. La biomasa potencial total es aquella resultante de considerar el aprovechamiento de toda la superficie forestal arbolada en la que las especies consideradas de interés forestal se encuentren presentes (superficie potencial total). La biomasa potencial accesible resulta de aminorar la biomasa total tomando en consideración restricciones de índole ecológica, económica o de mecanización, así como de aplicar un coeficiente reductor (coeficiente de recogida) debido a la eficiencia en la recogida, ya que es recomendable dejar restos en el terreno por razones ecológicas, además de la evidente imposibilidad de recoger el 100% del material. La biomasa potencial disponible es la derivada de aminorar la accesible teniendo en cuenta el uso alternativo de obtención de madera. Finalmente, la metodología permite definir la biomasa total, accesible y disponible a un coste, es decir, aquella biomasa cuyo coste de obtención sea inferior a un coste dado en las superficies susceptibles de aprovechamiento.

El modelo parte de la información del Mapa Forestal de España (escala 1:50.000) e incluye como superficie susceptible de aprovechamiento los sistemas forestales arbolados formados por especies de interés forestal, que son aquellas cuya producción mínima sea, para el conjunto de España, de 50.000 m³/año de madera o que la superficie forestal que ocupan supere las 10.000 ha. Los sistemas forestales arbolados deben ser formaciones definidas como bosques naturales, procedentes de plantaciones o sistemas adhesados cuya cabida cubierta arbórea sea igual o mayor al 50%, excepto en el caso de las dehesas con especies pertenecientes al género *Quercus*, en cuyo caso la fracción de cabida cubierta arbolada será mayor al 5%.

La estimación del potencial de biomasa responde al concepto de la posibilidad de los tratamientos y extracciones a llevar a cabo de acuerdo con los itinerarios selvícolas de cada especie y lugar a lo largo del turno correspondiente. Para su cálculo se han seguido las tablas de itinerarios selvícolas propuestas para cada especie en las que se definen los tratamientos y la producción de restos y pies con diámetro inferior a 7-7,5 cm, de restos y pies con diámetro inferior a 20 cm y de árboles completos. Para ello se han adoptado valores promedio de mediciones de aprovechamiento de biomasa en diversas experiencias en distintos ámbitos del territorio español.

La biomasa potencial total de cada tesela de vegetación del Mapa Forestal de España se calcula seleccionado en primer lugar las teselas de vegetación del Mapa Forestal de España que contengan masas forestales arboladas de media a alta densidad (fcc > 50%) y las masas forestales ralas de tipo dehesas > 5%. La superficie de cada tesela ha sido multiplicada por su fracción de cabida cubierta arbórea y por el factor de ocupación relativa de cada una de las especies analizadas que componen su vegetación. Esta superficie se multiplica por la posibilidad de biomasa definida para la especie e itinerario silvícola correspondiente (productividad media a lo largo del turno referida a toneladas anuales para toda España, ya sea de restos y pies de diámetro inferior a 7 cm, de restos y pies con diámetro inferior a 20 cm o de árbol completo), ponderada por un coeficiente de productividad que depende de la calidad de estación de cada zona, que mayorará o minorará la posibilidad media.

La biomasa accesible resulta de aplicar a la biomasa potencial total restricciones ecológicas, económicas y de mecanización eliminando de la superficie potencial total aquellas superficies con limitaciones en su aprovechamiento (por pertenecer a Parque Nacional), por altitud (se ha adoptado el umbral de explotación en 1.700 m, salvo excepciones en el noreste peninsular) o por pendiente (con el límite del 30%, salvo para algunas excepciones en la Cornisa Cantábrica). También se ha aplicado un coeficiente de recogida de la biomasa del 65% (porcentaje final de restos que se extrae de las masas tras cada tratamiento, dejando el resto en el monte por motivos ecológicos y operativos).

La biomasa disponible queda definida como aquella biomasa accesible que no tiene un uso maderero, es decir, que no entra en competencia con las cortas madereras que se llevan a cabo en la actualidad. Para su cálculo se aminora la biomasa disponible con un coeficiente de cortas actuales de madera, único para toda España para la estimación global, pero que puede ser variado en la herramienta informática. Este coeficiente se ha aplicado a la superficie forestal que está siendo gestionada por sus propietarios y sus productos están siendo vendidos a industrias forestales, considerándose que sólo serán aprovechados como biomasa los restos de los aprovechamientos forestales con fines maderables o los productos no maderables obtenidos en las distintas operaciones dentro del itinerario selvícola. Para las superficies forestales que actualmente no se encuentran en producción, se ha evaluado la cantidad de biomasa extraíble a través de una correcta silvicultura y aprovechamiento por árbol completo.

También se ha evaluado el potencial de biomasa a implantar en terreno forestal a través de la implantación de especies adecuadas (*Quercus*, chopo, eucalipto y algunos pinos) en ciertos terrenos forestales actualmente improductivos y desarbolados (terrenos con calidad de estación de media a alta II o III, pendientes < 30%, fuera de Parque Nacional).

Los distintos itinerarios selvícolas llevan asociados una serie de tratamientos o intervenciones. Los tratamientos propuestos en los itinerarios son entresaca, clareo, primera clara, segunda clara, aclareo, corta final y resalveo. Cada tratamiento lleva aparejado distintos trabajos (apeo, reunión, saca, adecuación del material y transporte) hasta la obtención de un producto homogéneo a pie de central o centro de almacenamiento. Estos trabajos o procesos presentan distintas posibilidades de ser realizados: cada alternativa de proceso con la maquinaria o técnica de trabajo manual utilizada conforma un sistema logístico al que se le asocia un coste que permite su comparación. Se ha adoptado un coste medio de transporte idéntico en todos los casos (60 m) y no se han tenido en cuenta los márgenes de los productores y operadores de biomasa, que junto con las variaciones en humedad o la distancia de transporte, podría elevar entre 1,5 y 2,2 veces los costes.

De acuerdo con el estudio del IDAE (**Tabla 12.15**), el potencial de biomasa disponible en Andalucía procedente de todas las fuentes de suministro estudiadas, agrícolas y forestales, ascendería a 14.655.121 t/año, de las cuales el 11,25% corresponden a aprovechamiento de árbol completo (1.649.219 t/año), 8,4% a masas leñosas susceptibles de implantación en terrenos forestales (1.231.669 t/año) y 1,43% a restos de aprovechamientos madereros (209.375 t/año). Esta biomasa tendría un coste medio de extracción de 24,01 €/t en el caso de los aprovechamientos madereros de 43,59 €/ha en el caso de árbol completo y de 43,22 €/t en el caso de implantación de cultivos forestales.

Tabla 12.15. Biomasa potencial disponible, biomasa potencial accesible y biomasa potencial total a partir de aprovechamientos forestales para España y Andalucía

		Restos de aprovechamientos madereros	Árbol completo	Total masas existentes	Masas leñosas susceptibles de implantación en terrenos forestales	Total de todas las fuentes de suministro forestales y agrícolas
Andalucía						
Biomasa potencial disponible	t/año	209.375	1.649.219	1.858.594	1.231.669	14.655.121
	tep/año	45.985	347.799	393.784	142.770	2.963.134
	€/t	24,01	43,59		43,22	
Biomasa potencial accesible	t/año	483.100				
Biomasa potencial total	t/año	909.994				
España						
Biomasa potencial disponible	t/año	2.984.243	15.731.116	18.715.358	15.072.320	88.677.193
	tep/año	636.273	3.414.158	4.050.432	1.782.467	17.286.851
	€/t	26,59	43,16		42,14	
Biomasa potencial accesible	t/año	6.252.274				
Biomasa potencial total	t/año	11.526.177				

Fuente: Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio técnico PER 2011-2020. IDAE

12.5.3. Fijación de carbono de los sistemas forestales andaluces

En el marco de la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía elaboró en 2007 el I Inventario de Sumideros de CO₂ en Andalucía (AGUDO *et al.*, 2007). El Inventario se realizó siguiendo la metodología GPG LULUCF (“Guía de Buenas Prácticas para el Sector de Uso de la Tierra, Cambio del Uso de la Tierra y Silvicultura”) y trabajos previos del INIA, en especial “Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles” (MONTERO *et al.*, 2005). La base cartográfica fueron los Mapas de Usos del Suelo de Andalucía a escala 1:50.000 (1991, 1995 y 1999) y se adoptaron los valores modulares procedentes del II Inventario Forestal Nacional.

Entre sus resultados, el Inventario ofrece el balance de CO₂ fijado por las distintas especies de pinos de Andalucía en 1990 y 1999 y las extrapolaciones a 2008 y 2012. Para efectos comparativos con la metodología seguida en este estudio, se ofrece en la **Tabla 12.16** los valores correspondientes a la proyección de 2012 (CO₂ y biomasa fijada, tomando un factor de conversión de 1,63).

Tabla 12.16. Balance de fijación neta de CO₂ y biomasa (factor de conversión 1,63). por las cinco especies de pinos en Andalucía. Proyección 2012

		Biomasa aérea	Biomasa radical	Biomasa total
<i>Pinus sylvestris</i>	t CO ₂	4.342.594	1.058.480	5.401.074
	t biomasa	2.664.168	649.374	3.313.542
<i>Pinus pinaster</i>	t CO ₂	18.033.985	5.160.001	23.193.985
	t biomasa	11.063.794	3.165.645	14.229.439
<i>Pinus nigra</i>	t CO ₂	16.717.390	4.086.082	20.803.472
	t biomasa	10.256.067	2.506.799	12.762.866
<i>Pinus pinea</i>	t CO ₂	26.969.560	4.992.762	31.962.322
	t biomasa	16.545.742	3.063.044	19.608.787
<i>Pinus halepensis</i>	t CO ₂	14.226.474	3.857.426	18.083.900
	t biomasa	8.727.898	2.366.519	11.094.417

Fuente: I Inventario de Sumideros de CO₂ en Andalucía (AGUDO *et al.*, 2007)



12.5.4. Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal

En 2006, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía elaboró el documento “Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal de Andalucía” (PIBFA) en el cual se proponen una serie de objetivos y acciones para impulsar su uso como recurso energético, considerando los beneficios económicos y medioambientales que se deriva de ello bajo los principios de favorecer el cumplimiento de los objetivos Protocolo de Kyoto, aprovechar los residuos forestales, fomentar los tratamientos selvícolas en las zonas forestales y mejorar la logística de los aprovechamientos forestales.

El PIBFA estimó la posibilidad de extracción de biomasa en la Comunidad Autónoma de todas las especies forestales en 2.108.091 toneladas al año (equivalentes a 737.832 tep anuales), tanto en monte público como privado (**Tabla 12.17**).

Tabla 12.17.- Posibilidad anual de extracción de biomasa forestal. Humedad de la biomasa 22,2%. Con esta humedad la conversión energética equivale a 1 tonelada=0,35 tep

PROVINCIA	Biomasa forestal (t/año)			Tep/año
	Pública	Privada	Total	
Almería	40.988	39.107	80.095	228.843
Cádiz	33.730	105.410	139.140	48.699
Córdoba	31.057	345.394	376.451	131.758
Granada	76.590	158.009	234.599	82.110
Huelva	178.110	456.884	634.994	222.248
Jaén	142063	165.092	307.155	107.504
Málaga	38.288	81.032	119.320	41.762
Sevilla	21.335	195.002	216.337	75.718
Andalucía	562.161	1.545.930	2.108.091	737.832

Fuente: Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal. Consejería de Medio Ambiente. 2006

El método seguido para obtener esta estimación tomó como punto de partida el Mapa de Usos del Suelo de 2003, aplicando los valores modulares e indicaciones metodológicas del estudio “Cuantificación del CO₂ Fijado por las Principales Especies Forestales Arbóreas en Andalucía” y del II Inventario Forestal Nacional. A cada tesela del territorio se le asignó la especie más abundante y los datos relativos a la densidad total y diámetro medio. Mediante los valores modulares se obtuvo el valor de la biomasa total y el incremento de biomasa total. Para obtener la biomasa teóricamente aprovechable (ya que no toda la biomasa se extrae del monte y existen usos alternativos que pueden ser más rentables), en el caso de las coníferas se consideró que hasta la clase diamétrica de 15 cm (12,5 cm a 17,5 cm) todo se dedica a biomasa; a partir de esa clase, el fuste tiene otras aplicaciones más rentables, por lo que sólo las copas se dedican a este aprovechamiento. De este modo se obtuvo el valor de biomasa y el incremento de biomasa de las fracciones correspondientes y aplicando el turno teórico a cada especie resultó el valor de la biomasa residual anual aprovechable.

El PIBFA también incluye un estudio de detalle de opciones logísticas orientadas a la explotación racional de la biomasa forestal, proponiendo una red básica compuesta por tres tipos de parques forestales: de carácter temporal (en donde se lleva a cabo la clasificación, las tareas previas de compactado, pretriturado, etc. y la carga), centros de clasificación y transferencia (CETIA, en donde se recibirían, clasificarían y elaborarían los productos con anterioridad a su envío a otros centros de transformación o mercados de consumo) y centros de clasificación y transformación (CETON, que recibirían los productos generados en los CETIA, constituyéndose en centrales de valorización). Las zonas que el Plan identifica como a priori más indicadas para ubicar los centros de clasificación y transferencias se sitúan en el entorno de los Parques Naturales de Los Alcornocales, Sierra Norte de Sevilla y Sierras de Grazalema y Andújar, además de la comarca forestal de Antequera y la Serranía de Ronda. Para los centros de transformación, los enclaves identificados como más adecuados son la campiña de Jaén y Córdoba, Sierra Nevada, Huelva, Sierra de los Filabres, Sierra de Cazorla, Segura y Las Villas y algunos puntos de Sierra Morena.

12.5.5. Potencial de biomasa de Andalucía 2010. Estimación de la Agencia Andaluza de la Energía

La Agencia Andaluza de la Energía cuantificó en 2011 los recursos de los distintos tipos de biomasa existentes en Andalucía ("Potencial de biomasa en Andalucía").

Los recursos forestales que se han evaluado como biomasa forestal han sido los residuos forestales potencialmente aprovechables, entendiendo por éstos los procedentes del mantenimiento de las masas forestales de encinas, alcornoques, pino, chopo y eucalipto. Para ello se ha utilizado como base cartográfica de referencia el II Inventario Forestal Nacional y la cobertura de Usos y Coberturas Vegetales del Suelo de Andalucía.

El proceso metodológico ha partido de las 1.859.836 ha catalogadas como forestales en el II Inventario Forestal Nacional, de las cuales se han descontado un 30% para eliminar las posibles zonas de escasa o nula vegetación arbórea. También se ha descartado la superficie arbórea localizada en pendiente superior al 50% debido a la dificultad de trabajo para la maquinaria, así como a la necesidad de aportar la biomasa al suelo para evitar la erosión.

El potencial energético se ha estimado en base a la gestión que se realiza en las masas existentes, es decir, identificando como aprovechamiento para biomasa los restos generados por necesidades forestales no energéticas al ser materiales que no tienen calidad suficiente para otras aplicaciones que no sean las energéticas. Se ha diferenciado entre dos tipos de superficie forestal. En primer lugar, la de monte mediterráneo de especies del género *Quercus*, en donde se ha aplicado un modelo de producción de leñas basado en la distribución diamétrica de los pies existentes y los tratamientos selvícolas requeridos para el mantenimiento y mejora de la superficie forestal. En segundo lugar, la de las formaciones forestales de las especies de pinos, para las cuales la biomasa se derivaría de las labores selvícolas que implican corta de árboles (claras, cortas de regeneración, etc), evaluando la fracción para biomasa en una tercera parte del material de corta.

De acuerdo con esta metodología, el potencial de biomasa detectado en Andalucía asciende a 3.958 ktep/año. Dicho potencial se reparte de la siguiente manera: residuos agrícolas (33%), residuos industriales (26%), cultivos energéticos (16%), residuos urbanos (15%), biomasa forestal (8%) y residuos ganaderos (2%). El potencial de biomasa forestal (322 ktep) procede principalmente de los pinares y eucaliptales, que podrían aportar al año 564.994 t y 488.706 t de biomasa al año respectivamente (**Tabla 12.18**). Estas cifras proceden de la aplicación de una herramienta SIG que permite calcular la biomasa potencial existente en el ámbito municipal.

Tabla 12.18. Potencial de biomasa en Andalucía 2010

Tipo de biomasa	t de biomasa	ktep
Residuos agrícolas	4.606.473	1.321
Olivar	2.524.419	803
Otros	2.082.054	518
Residuos industriales	5.070.029	1.025
Orujo	3.011.462	422
Huesos de aceituna	552.434	215
Otros	1.506.133	388
Cultivos energéticos	1.864.600	620
Residuos urbanos	2.929.782	591
Forestales	1.345.840	322
Pinos	564.994	161
Eucaliptos	488.706	83
<i>Quercus</i>	283.237	76
<i>Populus</i>	9.087	2
Residuos ganaderos	4.342.525	77
Total	20.159.249	3.958

Fuente: Potencial de biomasa en Andalucía. Mayo 2011. Agencia Andaluza de la Energía

12.6. Un modelo para la biomasa forestal de Andalucía

12.6.1. Recapitulación de la biomasa forestal como fuente de energía

A partir de la información expuesta, es posible trazar una panorámica general del consumo de biomasa forestal en Andalucía y de su potencialidad.

El consumo total de energía a partir de biomasa forestal procedente directamente del monte ascendió en 2010 aproximadamente a 97,85 ktep (**Tabla 12.19**), lo que equivale a unas 337.415 toneladas (35% de humedad), con una participación similar de los dos destinos energéticos de la biomasa, el térmico (54,35 ktep, 187.415 t) y eléctrico (43,5 ktep, 150.000 t).

Tabla 12.19. Consumo total de energía a partir de todas las fuentes de biomasa y a partir de material forestal obtenido directamente en monte en 2010 (sin tener en cuenta los restos de industrias forestales)

Biomasa consumida	Consumo total de energía a partir de todas las fuentes de biomasa ktep	Consumo total de energía procedente de material forestal (excluyendo residuos industriales)	
		ktep	toneladas
Eléctrica	660	43,5	150.000
Térmica	629,7	54,35	187.415
Total	1.289,7	97,85	337.415

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

Sobre el balance total de la energía primaria consumida en Andalucía en 2010, la biomasa forestal supone en torno al 0,5 % y un 9,2% sobre el total de la energía derivada de biomasa (**Tabla 12.20**).

Tabla 12.20. Estructura energética de Andalucía, 2010. Participación del consumo de biomasa con destino energético (total térmico y eléctrico) a partir de material forestal obtenido directamente en monte (sin tener en cuenta los restos de industrias forestales)

Consumo total de energía primaria (tep)	Producción total a partir de energía renovable (tep)	%Producción total a partir de energía renovable / consumo total de energía primaria	Producción total a partir de biomasa (tep)	%Producción total a partir de biomasa / consumo total de energía primaria	Producción total a partir de biomasa forestal	%Producción total a partir de biomasa forestal / producción total a partir de biomasa	%Producción total a partir de biomasa forestal / consumo total de energía primaria
18.914	2.076	11,0%	1.058	5,6%	97,85	9,2%	0,5%

Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

Para realizar una evaluación desde la oferta, se cuentan con las cifras derivadas de los aprovechamientos forestales en montes públicos (**Tabla 12.21**). De acuerdo con las memorias del Plan Forestal Andaluz, en 2010 se incluyeron en los Planes de Aprovechamiento un total de 238.860 toneladas (equivalentes a unos 68,79 ktep) de biomasa, que hay que sumar a las 60.899 toneladas de leñas anuales (17,66 ktep) que como promedio se derivaron de los aprovechamientos entre 2006 y 2010. Estos son sólo cifras

aproximativas (dado que se refieren solamente a aprovechamientos en montes públicos, y a que se basan en la programación de los Planes Anuales de Aprovechamiento y a los factores de conversión utilizados), pero ponen de manifiesto que la cantidad de biomasa extraída (unas 300.000 toneladas) es de un orden de magnitud similar al de la biomasa consumida.

Tabla 12.21. Biomasa y leña producida según las autorizaciones para aprovechamiento forestal de madera en montes públicos de Andalucía

Biomasa producida en montes públicos	ktep	Toneladas
Biomasa procedente de autorizaciones en montes públicos 2010	69,72	238.890
Leñas procedentes de autorizaciones en montes públicos, media 2006/2010	17,66	60.899
Total	87,38	299.789

Fuente: Memorias de seguimiento del Plan Forestal Andaluz, Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente

Evaluated el consumo actual de biomasa procedente de los montes de Andalucía (en torno a 337.415 t), y habida cuenta de la importancia cuantitativa de este tipo de fuente de energía sobre la estructura energética regional (que, potencialmente, ofrece posibilidades de expansión), el contraste con los estudios de oferta potencial de biomasa forestal en Andalucía permite valorar las posibilidades de la oferta disponible (**Tabla 12.22**).

Tabla 12.22. Biomasa potencial procedente de los montes de Andalucía

Biomasa potencial	ktep	toneladas
IDAE 2011 ¹ , total potencial biomasa anual disponible en los montes de Andalucía	393,8	1.858.594
AAE 2011 ² , total potencial anual procedente del total de la superficie forestal	322	1.345.840
<i>AAE 2011, total potencial anual procedente de superficie forestal de especies de pinos</i>	<i>161</i>	<i>594.994</i>
Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal de Andalucía 2006 ³	737,8	2.108.098

Fuente: ¹Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio técnico PER 2011-2020. IDAE. ²Potencial de biomasa en Andalucía. Mayo 2011. Agencia Andaluza de la Energía. ³Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente. 2006

Los tres trabajos que han evaluado el potencial de biomasa forestal en Andalucía a partir de metodologías distintas, aportan unas cifras de biomasa potencial anual que se sitúan entre 1.345.840 t (AAE, 2011) y 2.108.098 t (PIBFA, 2006). Estas cifras corresponden a todos los tipos de formaciones forestales, estimando el estudio de la AAE 2011 la aportación de la superficie de pinar en un 45%.

Las metodologías seguidas en cada uno de estos tres estudios hacen que sus resultados no sean estrictamente comparables, aunque sí admiten un contraste relativo. El enfoque de los estudios de la Agencia Andaluza de la Energía y del PIBFA, por ejemplo, se basa en la biomasa forestal residual en su sentido clásico (restos de cortas considerando otros aprovechamientos como prioritarios), mientras que en el del IDAE se utiliza la doble aproximación de residuos de cortas y extracción de árbol completo. Las bases cartográficas, por otro lado, han sido distintas, aunque existe coincidencia en la utilización de la información del Inventario Forestal Nacional. En todo caso, el orden de magnitud de las cifras obtenidas es similar, lo que permite contar con una base de partida sólida para llevar a cabo estimaciones con un mayor

grado de detalle, siempre en el contexto de los supuestos de partida y criterios utilizados en cada estudio. De las cifras de potencialidad de biomasa forestal (asimilable al concepto de posibilidad) de los tres trabajos se deduce, en definitiva, que existe un importante margen de maniobra para el aprovechamiento de la biomasa forestal, en torno a multiplicar por cinco o seis veces la explotación actual.

A la vista de estas cifras orientadoras, el estudio de modelos de existencia de biomasa de las cinco especies de pinar presentes en Andalucía aporta una base actualizada de conocimiento para mejorar las decisiones enfocadas a aprovechar de modo planificado y racional este potencial. La estimación de existencias a diferentes niveles (partiendo de la cifra global de 49,5 millones de toneladas de biomasa aérea de las cinco especies de pinos en la superficie forestal regional con una media de más de 10 t/ha) marcan la referencia del tapiz conjunto sobre el que entretejer las propuestas de gestión forestal que incluyan la extracción de parte de esta materia viva para su destino energético.

La incorporación de la mejor información de partida disponible (inventarios procedentes de proyectos de ordenación y del III Inventario Forestal Nacional), la actualización temporal de existencias a 2010 y la interpolación espacial a todo el territorio andaluz a una unidad de análisis 100 x 100 m ofrecen una imagen mejorada de la cuantificación de la biomasa aérea sobre la que incorporar modelos de explotación que se basen en la aplicación de los principios de la gestión forestal sostenible. Esta imagen, por otro lado, se ofrece en un formato espacial de detalle (con un grado de adecuación óptimo para la escala comarcal) que permitirá aplicar los criterios que conjuguen las necesidades selvícolas y ecológicas con la oportunidad económica y ambiental que supone la biomasa como fuente de energía.



12.6.2. Algunas lecciones aprendidas y retos para el futuro próximo

El cálculo de las existencias de biomasa en las formaciones forestales de las cinco especies de pinos de Andalucía presentado en este trabajo supone una contribución a la información de partida disponible para llevar a cabo una planificación racional y sostenible de las extracciones posibles y razonables (posibilidad), planificación que puede ser planteada a diversas escalas (regional, comarcal, monte). Del conocimiento y experiencia acumulada durante el desarrollo de los trabajos se derivan algunas reflexiones que pueden ser tomadas en consideración en la fase de planificación.

1. El aprovechamiento de la biomasa de los pinares debe tener en cuenta su carácter multifuncional y, especialmente, los servicios ambientales y ecosistémicos que aportan las formaciones forestales de coníferas

Los pinares andaluces son muy diversos. Es difícil generalizar teniendo presentes en el territorio formaciones forestales con orígenes diferentes. Los pinares procedentes de las repoblaciones del siglo XX conviven con pinares naturalizados con un origen anterior o con pinares propiamente naturales, de tal manera que se hace difícil en ocasiones distinguir unos de otros.

Pinares son los retazos de bosques relícticos de pino silvestre del cerro del Trevenque o de los calares de la Sierra de Baza, como también lo son los pinares de pino salgareño de las serranías del noreste en Jaén y Granada. Los pinares de pino negral sobre las peridotitas de Sierra Bermeja son una singularidad ecológica, y causan admiración por su frugalidad los pinares abiertos de pino carrasco que ocupan las áreas áridas y del litoral. El pino piñonero ha formado parte de nuestro territorio al menos desde la más remota antigüedad, entretejiendo una relación de utilidad con el ser humano que todavía perdura.

Los pinares naturales y naturalizados requieren de actuaciones de manejo. Tareas selvícolas específicas orientadas a protegerlos de grandes incendios, o para favorecer su regeneración bajo condiciones limitantes, agravadas por los efectos del cambio global. Pero aquellos pinares que indudablemente exigen un grado de gestión activa mayor son los pinares procedentes de repoblaciones: masas forestales de origen artificial, que surgieron en un momento histórico distinto, pero que hoy en día suponen un gran capital natural que necesita atención.

El fin protector justificó en gran medida muchas de las repoblaciones del siglo XX; en la actualidad hemos desarrollado y ampliado este concepto bajo los términos de servicios ambientales y ecológicos o externalidades ambientales. Los pinares, en este sentido, están cumpliendo muchas funciones más allá de la faceta productiva que puedan tener.

En ocasiones se están regenerando adecuadamente bajo su dosel otras especies vegetales arbóreas, un germen que, con la buena guía de actuaciones selvícolas apropiadas, es capaz de madurar en formaciones vegetales más maduras como los encinares o alcornocales. En estos casos, los pinares actúan como una etapa de regeneración de la vegetación mediterránea, como se había previsto en la base conceptual del Plan Nacional de Repoblaciones.

La apertura de claros en el pinar favorece la vegetación herbácea que desde otra óptica es pasto para conejos, ciervos u ovejas. De este modo se mejora el potencial cinegético o ganadero, pero también se genera un hábitat más propicio para especies que exigen nuestra atención como el lince o el águila imperial. En los pinares nidifican a menudo especies emblemáticas como las rapaces forestales o el buitre negro. La madera almacena carbono; las raíces, el dosel y la pinaza son freno ante la erosión. Hay pinares en fin, evocadores y bellos, discretos o majestuosos, que forman parte de nuestros paisajes del alma.

A todo ello hay que añadir los beneficios productivos que pueden obtenerse de los pinares, bajo la forma de piñones, madera, astilla para tableros y aglomerados, celulosa, carbón vegetal, setas o caza.

La gestión forestal ofrece herramientas para mejorar el balance de las funcionalidades de los pinares. Una gestión basada en la planificación, que es la fase previa que permite identificar los objetivos y las funcionalidades de cada área de vegetación.

La extracción de biomasa formaría parte del puzzle de elementos disponibles para gestionar los pinares de modo sostenible. Una herramienta que permite un retorno económico, pero que también puede contribuir a mejorar la funcionalidad y el estado de los pinares entendidos como ecosistemas.

Este marco de objetivos múltiples no supone que siempre se tengan que tener en cuenta del mismo modo todas las posibles finalidades, sino que exige una priorización llevada a cabo de modo respetuoso.

Esto se traduce en aplicar criterios técnicos que den lugar a soluciones sensatas en un contexto de uso múltiple. Perdería sentido, por ejemplo, aprovechar energéticamente la biomasa si se incurren en sobrecostos energéticos, es decir, si el balance energético final es negativo; lo mismo podría decirse del balance conjunto de carbono. O implantar cultivos energéticos con especies que puedan tener potencial invasor en los ecosistemas y, por tanto, generar graves problemas futuros.

Siendo positivas, por ejemplo, las claras para favorecer el desenvolvimiento de los pies restantes, la intensidad y la cantidad de biomasa retirada no debe depender solamente de criterios económicos, sino que se ha de prestar atención a las limitaciones selvícolas y ecológicas. Aplicar recetas como dejar parte de la biomasa sobre el terreno para no descapitalizar al sistema forestal de nutrientes o porque la madera muerta es importante para el desarrollo de la biocinesis. Con el conocimiento actual ya contamos con algunas recomendaciones: dejar en torno a la tercera parte de la biomasa aérea, por ejemplo, especialmente ramillas y hojas, porque se acumulan en mayor medida los micronutrientes, e incrementar este porcentaje en suelos poco fértiles como los arenosos o en áreas de gran pendiente. Soluciones de compromiso que posiblemente significarán mermas económicas, pero que redundarán en la sostenibilidad ambiental.

En definitiva: en el escenario andaluz es clave considerar que si bien la baja rentabilidad económica de los pinares convierten el potencial de aprovechamiento de la biomasa forestal en un recurso de gran interés, la fragilidad de nuestros ecosistemas obliga a incorporar un plus de prudencia en las actuaciones. Por otro lado, de las actuaciones que se lleven a cabo se pueden derivar beneficios para otras facetas del sistema forestal si se parte de un adecuado diseño: de este modo, se puede compatibilizar la extracción de biomasa con la mejora en los aprovechamientos forestales futuros, la defensa ante los incendios forestales, la mejora del hábitat, etc.



2. La extracción de biomasa: una oportunidad integradora que debe evitar efectos indeseados

Para el adecuado estado ecológico y productivo de muchas formaciones forestales, especialmente las de origen artificial, es preciso llevar a cabo tratamientos selvícolas; caso contrario se originan riesgos indeseados que amenazan su continuidad (estancamiento, decaimiento, acumulación de combustible, etc) y que se agudizan con el paso del tiempo.

Estos tratamientos (podas, clareos, claras, cortas de regeneración) dan lugar a material vegetal cuyo destino puede ser producir energía. De esta manera, mediante la combustión controlada que supone la obtención de energía eléctrica o térmica se contribuye a evitar riesgos que, en caso contrario, podrían llegar a suponer peligros descontrolados (grandes incendios, procesos de decaimiento masivo, etc).

Esta oportunidad selvícola, sin embargo, ha de ser puesta en práctica con sabiduría para evitar la consecuencia futura indeseable de convertir a los sistemas forestales en rehenes de las necesidades energéticas. En esto, como en otros aspectos relacionados con la utilización de la biomasa como fuente de energía, es preciso solventar los dilemas a los que puede conducir una gestión inadecuada. En definitiva, es preciso buscar modelos de aprovechamiento de la biomasa forestal extraíble que no dañan el sistema en su conjunto ni su potencial futuro.

Sólo una correcta planificación estratégica coordinada que imbrique las necesidades derivadas de la instalación de plantas de generación eléctrica o instalaciones térmicas a partir de biomasa con la disponibilidad presente y futura bajo criterios de perdurabilidad ambiental podrá evitar este dilema. Actualizando, en definitiva, los principios forestales de garantizar la persistencia y estabilidad del sistema forestal en un contexto ecológico evolutivo esta planificación, a nivel de cada instalación demandante de biomasa, debería contar con las diferentes modalidades de recursos biomásicos (forestales, industriales forestales, agrícolas, agroindustriales, urbanos, etc), incluyendo en la planificación fuentes de producción con un alto grado de predecibilidad que amortigüen los desajustes temporales entre oferta y demanda (como los cultivos energéticos). Para ello también será preciso avanzar en la coordinación entre las distintas administraciones que tienen que ver con la utilización de la biomasa para uso energético. Si no fuera así, el aprovechamiento de la biomasa extraíble existente (derivada, por ejemplo, de los tratamientos selvícolas que exigen las formaciones de pinos de repoblación) en lugar de constituir un aliciente para mejorar su estado selvícola y ecológico puede convertirse en una onerosa carga que comprometa su futuro.



3. Hacer compatible la explotación del recurso de la biomasa con otros usos alternativos, especialmente la madera y sus derivados

La biomasa es un subsector dentro de las energías renovables caracterizado porque existe o puede existir competencia entre diversos usos de la materia prima y, en consecuencia, porque pueden concurrir diferentes agentes, energéticos o no, por conseguir el recurso (aserradoras, empresas de tableros, empresas de celulosa, etc.).

Si bien en la actualidad el mercado de la madera (ya sea en aserrío, en rollo o como astillas para hacer tablero) no absorbe todas las cortas que se realizan en Andalucía (ya sea por el tipo de trozas y material en general producido, por desajustes entre las ofertas y demandas a nivel local u otros motivos) existe un importante tejido socioeconómico basado en este aprovechamiento (**Figura 12.6**). La evolución del precio de la madera en las últimas décadas, por otra parte, no ha sido favorable para la dinamización del sector, como consecuencia de la fijación de precios a partir de mercados internacionales más competitivos. Si a ello se le añade el gran incremento que han experimentado los costes de extracción, el panorama final es de unos aprovechamientos de madera que frecuentemente no alcanzan un balance de costes y beneficios positivo. Sin embargo, el tejido agroindustrial de la madera y derivados mantiene una importancia estratégica por su contribución al empleo y a la economía local y su efecto de arrastre sobre la posibilidad de realizar actuaciones selvícolas adecuadas en los montes.

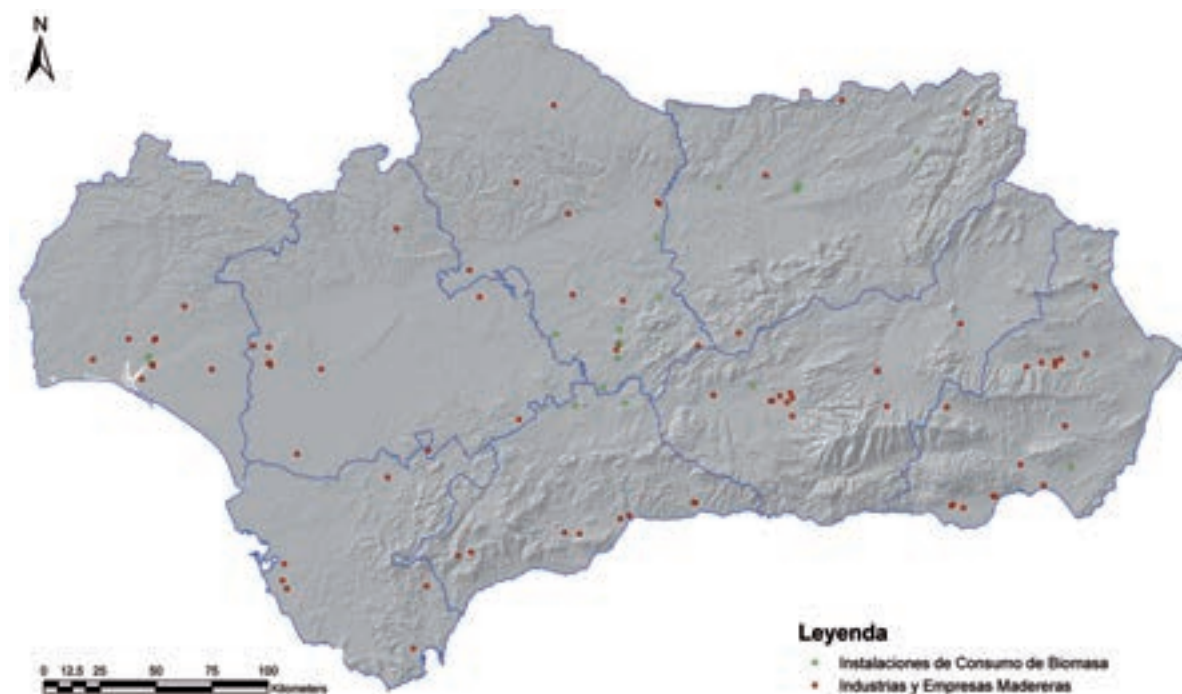


Figura 12.6. Distribución territorial de industrias - empresas madereras e instalaciones de consumo de biomasa. Año 2011

Hay que tener en consideración, además, los aspectos favorables del uso de la madera en relación con el estado del medio ambiente. Comparte ventajas similares al uso de la biomasa, siendo más favorable su utilización en algunos aspectos como el balance de carbono: se estima, por ejemplo, que por cada metro cúbico de madera usado como sustituto de otros materiales de la construcción, las emisiones de CO₂ a la atmósfera se reducen en una media de 1,1 t, a lo que hay que añadir las 0,9 t de CO₂ almacenadas en la madera durante una vida media de entre 2 meses (si su destino es el papel para periódico) y 75 años (para la madera estructural). Por otro lado, el uso de la madera local frente al de madera importada puede tener efectos positivos en la medida que se potencian mercados cortos de comercialización y producción. La madera, en fin, da lugar a productos finales que apreciamos por su belleza y utilidad.

Bajo estas circunstancias, la consolidación del destino energético como una fuente de demanda alternativa puede tener efectos perjudiciales indeseados sobre el sector de la madera, que pueden ser evitados con una adecuada planificación forestal, especialmente teniendo en cuenta la importancia de los aprovechamientos forestales públicos, haciendo compatible estos usos alternativos y permitiendo la continuidad del tejido agroforestal que utiliza como recurso la madera.

4. Mejorar el conocimiento y la técnica

La extracción de biomasa forestal se lleva a cabo a través de procesos de trabajo que implican un coste. Al contrario que en otras modalidades de obtención de biomasa, como los cultivos energéticos en terrenos agrícolas, las condiciones del medio físico son muy heterogéneas y, en muchos casos, ofrecen graves dificultades técnicas y operativas que impiden realizar los trabajos bajo criterios estrictos de eficiencia económica. A menudo no es posible modificar las condiciones del contexto para hacer el aprovechamiento más productivo, sino que usualmente será el aprovechamiento el que deba adaptarse a las condiciones del medio físico. Esto, en definitiva, introduce grandes limitaciones operativas, máxime cuando, debido a la heterogeneidad del medio forestal, con frecuencia será imposible aplicar soluciones técnicas eficientes a gran escala.

En la aplicación de la ingeniería forestal, al contrario que otras ingenierías, es difícil lograr el máximo control de las condiciones de producción y la uniformidad del material producido; sin embargo, esto no quiere decir que se carezca de un amplio abanico de alternativas técnicas, cuyo mejor conocimiento permite, en definitiva, ofrecer mejores soluciones de conjunto. En este sentido, profundizar en el conocimiento de los procesos operativos y los costes derivados es una condición importante para mejorar el balance económico y ecológico del aprovechamiento de la biomasa forestal.

En el aspecto tecnológico, el Plan de Energías Renovables identifica como frenos que están dificultando la consolidación del sector energético a partir de la biomasa la falta de desarrollo tecnológico, implantación y madurez para determinadas tecnologías y proyectos como la carencia de tecnologías comerciales para la producción eléctrica (en el campo, por ejemplo, de la co-combustión o la cogeneración).

Además de mejorar el conocimiento sobre los aspectos operativos aplicados (por ejemplo, sobre cómo afectan los condicionantes forestales a los procesos logísticos, especialmente factores como la pendiente o el viario forestal en las soluciones técnicas que amplíen la capacidad de respuesta), es preciso prestar atención a los aspectos selvícolas básicos relacionados con la extracción de biomasa. Ante un nuevo destino productivo del monte (aunque realmente se trata de una actualización de un uso tradicional), es conveniente reflexionar sobre la pertinencia de los modelos de ordenación actuales y la selvicultura aplicada, que en ocasiones se basan en unas orientaciones (como la obtención de fustes de calidad para fines madereros) de las que se derivan unas pautas y recomendaciones de intervención que no es posible cumplir bajo las condiciones socioeconómicas actuales.

Las repoblaciones de alta densidad que no han sido objeto de las actuaciones selvícolas planificadas en las ordenaciones (turnos de corta, periodización de las claras, etc.) se convierten en masas desequilibradas sujetas a la incidencia de riesgos indeseables como incendios forestales o decaimientos súbitos. Evidentemente, lo deseable sería contar con los recursos económicos necesarios para acometer las actuaciones planificadas en tiempo y forma. Pero la práctica de las últimas décadas demuestra que esto raramente es posible. Bajo estas condiciones, la extracción de biomasa puede suponer un aliciente para concentrar intensidades de corta de claras no realizadas a su tiempo o para adaptar el esquema de ordenación, acortando el turno o redefiniendo el objetivo hacia nuevas formas de masa (formaciones adehesadas, naturalización de pinares, etc.). En el marco de la gestión forestal sostenible, y sin perder de vista principios básicos como la perdurabilidad del sistema forestal, la oportunidad de aplicar un mayor esfuerzo de corta no debe suponer daños indeseados (como el riesgo de caída de árboles excesivamente ahilados, la descapitalización en nutrientes, etc.) si las actuaciones son producto de la correcta decisión técnica.

Pero la decisión técnica puntual requiere de marcos de referencia que refuercen el conocimiento empírico, actualizándolo con las lecciones aprendidas y los avances en el conocimiento académico.

En este sentido, es importante renovar parcialmente la selvicultura mediterránea, la ordenación y otras disciplinas forestales para tener en cuenta este uso productivo que, además, coincide en el tiempo con una etapa especialmente delicada de las repoblaciones de coníferas realizadas en el siglo XX, que frecuentemente han alcanzado su máximo de productividad biológica y que se ven abocadas a un incierto futuro si no se producen intervenciones orientadas a favorecer su evolución futura.

5. Promover sistemas plurianuales de aprovechamiento de la biomasa forestal que permitan una adecuada planificación

Un elemento necesario para lograr una adecuada planificación del uso de la biomasa forestal como fuente de energía es promover sistemas plurianuales de aprovechamiento que permitan prever el suministro de manera estable y garantizada. En la práctica forestal esto es posible a través del desarrollo de planes plurianuales de aprovechamientos en el marco de una adecuada ordenación que también incidan en la dotación de infraestructura adecuada (viario forestal, cargaderos, parques, etc.).

Esta planificación plurianual se puede ver a su vez reforzada por la integración con modalidades de aprovisionamiento con un mayor grado de predecibilidad a medio y largo plazo como los cultivos energéticos agrícolas y forestales.

6. Potenciar el uso de la biomasa térmica

En comparación con la biomasa para fines eléctricos, la biomasa térmica se puede distribuir de un modo más difuso (y, por tanto, buscando más equilibrios territoriales) y basarse en modelos de aprovisionamiento de menor magnitud y, en términos generales, con mayor capacidad dinamizadora de crear tejido productivo. Tiene además la ventaja de su mayor eficiencia energética, aunque, como contrapartida, no se ve favorecida por un régimen especial de primas.

Si bien en Andalucía la biomasa térmica cuenta con un gran desarrollo, esto es especialmente cierto para las instalaciones agroindustriales, detectándose un amplio campo de posibilidades en la biomasa para uso residencial (doméstico y comunitario) e instalaciones públicas y sociales. En un futuro inmediato, además de mejorar cuestiones relacionadas con la logística (creación de empresas integrales de servicios), la adecuación normativa y la difusión e innovación tecnológica tendrá una gran importancia con objeto de extender este tipo de energía a ámbitos como la climatización, más allá de los usos exclusivos para calefacción.

7. Desarrollar sistemas de aprovechamiento de la biomasa eléctrica que incluyan sistemas de poca potencia

El desarrollo de proyectos de pequeña potencia con biomasa es clave para impulsar la generación eléctrica con esta fuente renovable y permitiría hacer un aprovechamiento más eficiente desde el punto de vista económico, energético y del balance de carbono. Pequeñas instalaciones próximas a la fuente de suministro, que incluso podrán ser móviles para un aprovechamiento más eficiente, tendrían además una gran capacidad de arrastre en el tejido socioeconómico rural.

Para ello hay que superar escollos técnicos relacionados con la eficiencia de este tipo de instalaciones (<1MW en el caso de la generación eléctrica), pero también normativos, dando prioridad a la conexión a la red eléctrica de estas instalaciones de baja potencia.

8. La extracción de biomasa puede no ser rentable económicamente por sí sola, pero puede reforzar la gestión conjunta

Los costes de extracción de la biomasa forestal procedente de masas de coníferas en pie a menudo exceden el precio pagado por los demandantes de biomasa. Ante un panorama tan heterogéneo es difícil aportar promedios, aunque de la experiencia desarrollada en el Proyecto demostrativo para el aprovechamiento de la biomasa en Andalucía se han obtenido valores de extracción (sin tener en consideración los costes de transporte desde cargadero de astilla hasta el centro de consumo y sin imputar beneficio al propietario del monte) de entre 25 y 150 €/t. Los precios de compra son también variados, con una horquilla que puede situarse entre 20 y 110 €/t para fines térmicos y entre 40 y 60 €/t para astillas entre un 30 y un 50% de humedad para la biomasa b.6.1. y entre 20 y 35€/t para la b.6.3.

En definitiva: si bien en ocasiones será posible llevar a cabo aprovechamientos de biomasa en pie cuyo balance económico sea favorable, con frecuencia este balance será negativo.

No obstante, esta astilla es a menudo el resultado de actuaciones selvícolas que han de llevarse a cabo en el monte para cumplir otros de sus fines (prevención de incendios, garantizar la evolución de las masas, obtener otros aprovechamientos como la madera, dinamización socioeconómica, etc.). Bajo estas circunstancias, la biomasa ofrece un resultado económico suplementario al beneficio o beneficios que justifican la intervención. Aliciente que en ocasiones podrá determinar la viabilidad económica de la actuación, al suponer un ahorro importante en el coste de los trabajos forestales.

En resumen: el aprovechamiento de la biomasa para fines energéticos forma parte de las alternativas de gestión forestal sostenible que pueden efectuarse teniendo en cuenta la compatibilidad con otros usos económicos y sociales y servicios ambientales de los montes. Esta consideración económica refuerza la necesidad de concebir la extracción de biomasa para aprovechamiento energético de manera integrada en el conjunto de los usos y aprovechamientos forestales, de las necesidades selvícolas de los montes y de las funcionalidades ecológicas y externalidades ambientales que cumplen.

9. Una oportunidad para crear y mantener tejido socioeconómico en el medio rural

La biomasa como fuente energética tiene una gran capacidad para generar empleo, especialmente en las zonas rurales. El sector forestal permite la existencia de un importante entramado empresarial y laboral difícilmente reemplazable por otra actividad.

Un correcto desarrollo del aprovechamiento de la biomasa forestal implica robustecer el tejido socioeconómico, consolidando los vínculos entre los diferentes actores socioeconómicos: propietarios forestales, empresas de servicios forestales y productores de energía.

Para hacer más eficiente un aprovechamiento que pierde valor con la incorporación de procesos innecesarios, es especialmente obligado depurar todos los aspectos logísticos, integrando las etapas del proceso productivo, reduciendo la estacionalidad del suministro o mejorando el plazo de almacenamiento.

También es necesaria la integración y coordinación con los subsectores que suministran otro tipo de biomasa (agrícola, agroindustrial, industrial forestal, residuos sólidos urbanos) para dar pie a una oferta más predecible y pautaada que reduzca las tensiones en la fijación de los precios. Finalmente, cada vez será más importante recabar en la calidad final del producto ofertado, adecuándose a las necesidades de los centros de consumo, refinando el difícil equilibrio entre la aportación de utilidades y el coste final.

10. La biomasa como medio de mitigación del cambio climático

La biomasa constituye una fuente de energía que se complementa adecuadamente con otras renovables de generación irregular como son la eólica y la solar, de tal forma que aporta seguridad energética y adaptación a los ciclos de demanda, contribuyendo a diversificar y garantizar el suministro de energía, así como a reducir la dependencia energética. Ello, en definitiva, también repercute en la reducción de emisiones de CO₂ derivadas del uso de combustibles fósiles. Se estima que por cada MW de biomasa producido se evita el uso de 2.500 toneladas equivalentes de petróleo y se evita la emisión de 2.700 t de CO₂ al año.

Este aspecto favorable de la biomasa energética ha de ser, no obstante, evaluada en el marco de otras posibles funcionalidades de cada superficie de pinar en concreto para no generar efectos perversos. En este sentido, la recapitulación de los puntos anteriores identifica puntos de interés a tener en cuenta (balance energético y de carbono, mantenimiento de nutrientes, capacidad de almacenamiento de carbono por otros usos de la biomasa, etc.) en los estudios concretos.



13

Referencias bibliográficas

- AAE, 2011. Potencial de biomasa en Andalucía. Mayo 2011. Agencia Andaluza de la Energía.
- ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I.A., eds. 1972. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. *New York: Dover Publications*.
- AGUDO ROMERO, R., MUÑOZ MARTÍNEZ, M., DEL PINO DEL CASTILLO, O. 2007. Primer Inventario de sumideros de CO₂ en Andalucía. Dirección General de Gestión del Medio Natural. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- AITCHISON, J. 1986. The Statistical Analysis of Compositional Data. *Chapman and Hall*. London.
- ALONSO PONCE, R., SÁNCHEZ PALOMARES, O., ROIG, S., LÓPEZ SENESPLEDA, E., GANDULLO, J.M. 2010. Las estaciones ecológicas actuales y potenciales de los sabinars albares españoles, 19. *Monografías INIA. Serie Forestal nº19*. Madrid.
- ALONSO PONCE, R. 2008. Autoecología paramétrica de *Juniperus thurifera* L. en Castilla y León. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G., BARRIO ANTA, M., DIÉGUEZ ARANDA, U., ROJO ALBORECA, A. 2004. Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 18: 303-309.
- ARAQUE JIMÉNEZ, E. 2009. Repoblación forestal en Andalucía. Intervenciones históricas y situación actual. Universidad de Jaén y Junta de Andalucía.
- BAUTISTA, R., ALONSO, A., GRAU, J. M., GÓMEZ, J. A. 2001. Tablas de producción de Selvicultura media para las masas de *Pinus nigra* Arn. en la Sierra de Cazorla, Segura y Las Villas. *III Congreso Forestal Español*. Tomo III. Pp 854-859.
- BEAULIEU, J., RAULIER, F., PRÉSENT, G. BOUSQUET, J. 2011. Predicting site index from climatic, edaphic, and stand structural properties for seven plantationgrown conifer species in Quebec. *Can. J. For. Res.*, 41: 682–693.
- BERGÈSA, L., CHEVALIERA, R., DUMASA, Y., FRANCB, A, GILBERTC, J.M. 2005. Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Ann. For. Sci.*, 62: 391–402.
- BISHOP, T.F.A., MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B. 2006. Uncertainty analysis for soil-terrain models. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2): 117–134.
- BRAVO OVIEDO, A., MONTERO, G., RÍO, M. 2004. Site index curves and growth model for Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. *Forest Ecology and Management*, 201: 187-197.
- BRAVO OVIEDO, A., MONTERO, G., RÍO, M. 2007. Geographic variation and parameter assessment in generalized algebraic difference site index modeling. *Forest Ecology and Management*, 247: 107-119.
- BRAVO, F., ÁLVAREZ, J. G., DEL RÍO, M. 2012. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectives. *INIA- Universidad de Valladolid- Universidad de Santiago de Compostela*.
- BRAVO, F., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G., RÍO, M., BARRIO, M., BONET, J.A., BRAVO-OVIEDO, A., CALAMA, R., CASTEDO-DORADO, F., CRECENTE-CAMPO, F., CONDES, S., DIÉGUEZ-ARANDA, U., GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S.C., LIZARRALDE, I., NANOS, N., MADRIGAL, A., MÁRTINEZ-MILLÁN, F.J., MONTERO, G., ORDÓÑEZ, C., PALAHI, M., PIQUÉ, M., RODRÍGUEZ, F., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., ROJO, A., RUIZ-PEINADO, R., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., TRASOBARES, A. y VÁZQUEZ-PIQUÉ, J. 2011. Growth and yield models in Spain: historical overview, contemporary examples and perspectives. *Forest Systems*, 20(2): 315-328.
- BUENO, S., BEVILACQUA, E. 2010. Modeling stem increment in individual *Pinus occidentalis* Sw. trees in La Sierra, Dominican Republic. *Forest Systems*, 19(2): 170-183.

- BUONGIORNO, J., MICHIE, B. R. 1980. A Matrix Model of Uneven-Aged Forest Management. *Forest Science*, 26(4): 609-625.
- BURROUGH, P.A. 1989. Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *J. Soil Sci.*, 40: 477-492.
- CALAMA, R., CAÑADAS, N., MONTERO, G. 2003. Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Anales Forestal Sciencia*, 60: 259-269.
- CEBALLOS, L., MARTÍN BOLAÑOS, M. 1930. Estudio sobre la vegetación forestal de la provincia de Cádiz. *Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias*. Madrid (Reimpresión en 2000 por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Mapa, escala 1:100.000. Sevilla).
- CEBALLOS, L., VICIOSO, C. 1933. Estudio sobre la vegetación y la flora forestal de la provincia de Málaga. Mapa en escala 1:100.000, *Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias*. Madrid.
- CEI-BOIS (Confederación europea de Industrias de la Madera). 2009. Frente al cambio climático: utiliza madera. <http://www.cei-bois.org/files/b03400-p01-84-SP.pdf>
- CIESZEWSKI, C. J. 2000. Analytical solution to the generalized log-logistic equation. *Forest Science*, 46: 291-296.
- CMA. 2004a. Manual de Ordenación de Montes de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- CMA. 2004b. Árboles y Arboledas Singulares de Andalucía. Provincias: Almería, Cádiz, Córdoba, Granada, Huelva, Jaén, Málaga y Sevilla. Junta de Andalucía.
- CMA. 2006. Plan de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- COBLE, D.W., YOUNG-JIN, L. 2006. Use of a generalized sigmoid growth function to predict site index for unmanaged loblolly and slash pine plantations in East Texas. Proceedings of the 13th biennial southern silvicultural research conference. *Gen. Tech. Rep. SRS-92*. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.
- CSIC-IARA. 1989. Mapa de suelos de Andalucía. Sevilla.
- DEUTSCH, C.V., JOURNEL, A.G. 1998. GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide. *Oxford University Press*, New York.
- DIÉGUEZ-ARANDA, U., ROJO ALBORECA, A., CASTEDO DORADO, F., ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G., BARRIO ANTA, M., CRECENTE CAMPO, F., GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J. M., PÉREZ CRUZADO, C., RODRÍGUEZ SALLEIRO, R., LÓPEZ SÁNCHEZ, C. A., BALBOA MURIAS, M. A., GORGOSO VARELA, J. J., SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, F. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. *Universidad de Santiago de Compostela*. Lugo.
- DOMINGO SANTOS, J.M., FERNÁNDEZ DE VILLARÁN, SAN JUAN, R., CORRAL PAZOS DE PROVENS, E., RAPP ARRARÁS, I. 2006. Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA. *Invest. Agrar: Sist. Recur. For.*, 15 (1): 14-23.
- EGMASA. 2003. Aplicación de los Sistemas de Información Geográficos en la evaluación de la calidad de la estación forestal, volumen de existencias, producción y posibilidad de madera. Caso aplicado a la región oriental de Andalucía. Empresa de Gestión Medioambiental. Consejería de Medio Ambiente. Sevilla.
- ELENA ROSSELLÓ, R., SÁNCHEZ PALOMARES, O. 1991. Los pinares españoles de *Pinus nigra* Arn.: síntesis ecológica. *Monografías INIA*, 81. Madrid.

- ELENA ROSSELLÓ, R., SÁNCHEZ PALOMARES, O., CARRETERO CARRERO, M. P. 1985. Estudio fisiográfico y climático de los pinares españoles de *Pinus nigra* Arn. *Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales*, 36. Madrid.
- ELITH, J., PHILLIPS, S. J., HASTIE, T., DUDIK, M., CHEE, Y. E., YATES, C.E. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17: 43–57.
- ESRI, 2008. ArcGIS 9.3 (ArcMap, ArcCatalog, ArcINFO Workstation). Environmental Systems Research Institute, Inc. Los Ángeles, Estados Unidos.
- ESRI, 2010. ArcGIS 10.0 (ArcMap, ArcCatalog). Environmental Systems Research Institute, Inc. Los Ángeles, Estados Unidos.
- FERNÁNDEZ CANCIO, A., NAVARRO CERRILLO, R.M., SÁNCHEZ SALGUERO, R., FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, R., MANRIQUE MENÉNDEZ, E. 2011. Variabilidad fitoclimática de las repoblaciones de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) en la Sierra de Los Filabres (Almería). *Ecosistemas*. AEET 20 (1): 124-144.
- FREEMAN, E. A., MOISEN, G. G. 2008. A comparison of the performance of threshold criteria for binary classification in terms of predicted prevalence and kappa. *Ecological Modelling*, 217: 48-58.
- GANDULLO, J.M. 1972. Ecología de los pinares españoles. III. *Pinus halepensis* Mill. *Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias*. Madrid.
- GANDULLO, J.M. 1974. Ensayo de evaluación cuantitativa de la insolación en función de la orientación y de la pendiente del terreno. *Anales I.N.I.A. Serie Recursos Naturales, I*. Madrid.
- GANDULLO, J.M. 1985. Ecología vegetal. *Fundación Conde del Valle de Salazar*. Madrid
- GANDULLO, J.M. y SÁNCHEZ PALOMARES, O. 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. ICONA. *Colección Técnica*.
- GANDULLO, J.M., GONZÁLEZ ALONSO, S., SÁNCHEZ PALOMARES, O. 1974. Ecología de los pinares españoles. IV. *Pinus radiata* D. Don. *Monografía INIA. Serie Forestal nº 13*. Madrid.
- GANDULLO, J.M., GONZÁLEZ ALONSO, S., SÁNCHEZ PALOMARES, O. 2000. Programa Pinares. *Montes*, 60: 5-9.
- GANDULLO, J.M., BLANCO, A., SÁNCHEZ-PALOMARES, O., RUBIO, A., ELENA, R. y GÓMEZ, V. 2004a. Las estaciones ecológicas de los hayedos españoles. *Monografías INIA. Serie Forestal nº8*. Madrid.
- GANDULLO, J.M., BLANCO, A., SÁNCHEZ PALOMARES, O., RUBIO, A., ELENA, R. y GÓMEZ, V. 2004b. Las estaciones ecológicas de los castaños españoles. *Monografías INIA. Serie Forestal nº7*. Madrid.
- GARCÍA PÉREZ, A. 2005. Métodos Avanzados de Estadística Aplicada. Técnicas Avanzadas. *Editorial UNED*. Madrid.
- GARCÍA, O. 2007. Dimensionalidad en los modelos de crecimiento. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 23: 19-25.
- GÓMEZ, V., BLANCO, A., SÁNCHEZ PALOMARES, O., RUBIO, A., ELENA, R., GRAÑA, D. 2002. Autoecología de los castaños andaluces. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For.*, 11(1): 205-226.
- GOOVAERTS, P. 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. *Oxford University Press*, New York.
- GUEVARA DÍAZ, J.M. 2006. La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETO. *Terra Nueva Etapa*, año/vol XXII, nº 031. Universidad Central de Venezuela. Venezuela. pp.31-72.
- HENGL, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computer and Geosciences*, 32: 1238-1298.

- HENGL, T. 2007. A Practical Guide to Geostatistical mapping of environmental variables. EUR 22904 *Scientific and Technical Research series*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg.
- HENGL, T., HEUVELINK, G.B.M. y ROSSITER, D.G. 2007. About regression-kriging: from equations to case studies. *Computers and Geosciences*, 33(10): 1301-1315.
- IDAE, 2011. Evaluación del potencial de energía de la biomasa. Estudio técnico PER 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- IGLEWICZ, B., HOAGLIN, D. How to detect and handle outliers. ASQC Quality Press, 1993.
- JOURNEL, A.G. 1980. The lognormal approach to predicting local distributions of selective mining unit grades. *Math. Geol.* 12,285–303.
- JOURNEL, A.G., Deutsch, C.V. 1997. Rank order geostatistics: a proposal for a unique coding and common processing of diverse data. In: Schofield, E.Y.B.a.N.A. (Ed.), *Geostatistics Wollongong '96. Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, The Netherlands, pp. 174–187.
- KIVISTE, A., ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G., ROJO, A., RUIZ GONZÁLEZ, A.D. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. *Monografías INIA: Forestal nº 4*. Madrid.
- LEONE, V., KOUTSIAS, N., MARTÍNEZ, J., VEGA-GARCÍA, C., ALLGÖWER, B., LOVREGLIO, R. 2003. The human factor in fire danger assessment, en Chuvieco, E. (Ed): *Wildland fire Danger estimation and mapping. The role of remote sensing data. Series in Remote Sensing. World scientific Publishing Co.* Pp. 143-194
- LEVINE, N. 2004. Kernel density interpolation. *Crimestat 3.0*, Capítulo 8.
- LIU, C., BERRY, P. M., DAWSON, T. P., PEARSON, R. G. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28: 385 – 393.
- MACKAY, E. 1944. Fundamentos y Métodos de la Ordenación de Montes. Tomo I. *Escuela Especial de Ingenieros de Montes*. Madrid.
- MADRIGAL, G., ALONSO, R., CALAMA, R., MONTERO, G., MORO, J. 2007. Patrón de crecimiento en altura dominante en masas naturales y artificiales de *Pinus pinea* L.: comparación a través de modelos dinámicos. *Cuadernos de la SECF*, 23: 207-214.
- MARGALEF, R. 1974. Ecología. *Ediciones Omega*. Barcelona.
- MARM. 2008. Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) 1997-2007. Andalucía. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MARM. 2009. Estrategia española para el desarrollo del uso energético de la biomasa forestal residual. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MARTÍNEZ, J., ARA, P., GONZÁLEZ, I. 1993. Ecuaciones alométricas de tres variables: Estimación del volumen, crecimiento y porcentaje de corteza de las principales especies maderables Españolas. *Invest. Agrar. Sist. Recur. For.* Vol., 2(2): 211-228.
- McBRATNEY, A., MENDOC-A SANTOS, M., MINASNY, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3–52.
- McIVER, J. D., STARR, L. 2000. Environmental effects of postfire logging: literature review and annotated bibliography. *USADA Technica report*. GTR-PNW-486
- McKAY, M.D., BECKMAN, R.J., CONOVER, W.J. 1979. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21, pp. 239–245.

- MERINO, A., BALBOA, M.A., RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R., ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantation in southern Europe. *Forest Ecology and Management*, 207: 325-339.
- MICROSOFT OFFICE, 2007. Microsoft Office Access, Excel, 2007. Microsoft Corporation.
- MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B., WHELAN, B.M. 2005. VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. <http://www.usyd.edu.au/agriculture/acpa>.
- MINASNY, B., MCBRATNEY, A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*, 2(9):1378-1388.
- MMA. 1996. Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2) 1986-1995. Andalucía. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MONSERUD, R., HUANG, S., YANG, Y. 2006. Prediction lodgepole pine site index from climatic parameters in Alberta. *The Forestry Chronicle*, Vol., 82 (4): 562-571.
- MONTERO G., RUIZ-PEINADO, R., MUÑOZ, M. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. *Monografías INIA, Serie Forestal*; 13. Madrid.
- MONTERO, G., CAÑELLAS, I. RUIZ PEINADO, R. 2001. Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 10: 179-201.
- NAMAALWA, J., EID, T., SANKHAYAN, P. 2005. A multi-species density-dependent matrix growth model for the dry woodlands of Uganda. *For. Ecol. Manage*, 213(1-3): 312-327.
- NAVARRO-CERRILLO, R. M., HERNÁNDEZ-BERMEJO, J. E., HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R. 2011. Evaluating models to assess the distribution of *Buxus balearica* in southern Spain. *Applied Vegetation Science*, 14: 256 -267.
- NEMES, A., RAWLS, W.J. y PACHEPSKY, Y.A. 2006. Use of the non-parametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 327-336.
- NEMES, A., ROBERTS, R.T., RAWLS, W.J., PACHEPSKY, Y.A., VAN GENUCHTEN, M.T. 2008. Software to estimate -33 and -1500 kPa soil water retention using the nonparametric k-Nearest Neighbor technique. *Environmental Modelling & Software*, 23: 254-255.
- NICOLÁS, A., GANDULLO, J.M. 1967. Ecología de los pinares españoles: *Pinus pinaster* Ait. *Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias*. Madrid.
- NICOLÁS, A., GANDULLO, J.M. 1969. Ecología de los pinares españoles: *Pinus sylvestris* L. *Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias*. Madrid.
- PACHEPSKY, Y.A. y RAWLS, W.J. 2005. Development of pedotransfer functions in Soil Hydrology. *Developments in Soil Science* 30. Elsevier, Amsterdam-New York.
- PEMÁN GARCÍA, J., NAVARRO CERRILLO, R.M. 1998. Repoblaciones Forestales. Universitat de Lleida. Lleida.
- PHILLIPS, S. J., ANDERSON, R. P., SCHAPIRE, R. E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231-259.
- PHILLIPS, S. J., DUDIK, M., SCHAPIRE, R. R. R. 2004. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning, pages 655-662.
- PHILLIPS, S. J., DUDIK, M. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31: 161-175.

- PHILLIPS, S., ANDERSON, R., SCHAPIRE, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190 (3-4): 231-259.
- PIBFA, 2006. Plan Integrado de Aprovechamiento de la Biomasa Forestal de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente.
- PIENAAR, L.V., TURNBULL, K.J. 1973. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *Forest Science*, 19 (1): 2-22.
- PITA-CARPENTER, P.A. 1964. La calidad de estación de las masas de *P. sylvestris* de la península Ibérica. *Análes I.F.I.E*, Madrid.
- PITA-CARPENTER, P.A. 1965. Clasificación provisional de las calidades de la estación en las masas de Pino laricio y de Pino carrasco de la península Ibérica. *Anales I.F.I.E*, Madrid.
- PITA-CARPENTER, P.A. 1966. Clasificación provisional de las calidades de la estación en las masas de Pino piñonero. *Anales I.F.I.E*, Madrid.
- PITA-CARPENTER, P. A. 1967. Clasificación provisional de las calidades de la estación en las masas de *Pinus pinaster* (continental) y *P. uncinata*. Ram. de la Península Ibérica. *Anales IFIE*, 20: 125-138.
- RICHARDS, F. J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10: 290-300.
- RÍO M., LÓPEZ-SENEPLEDA E., MONTERO G. 2006. Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arn. en Castilla y León. *Serie Técnica*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Castilla y León.
- RODRÍGUEZ, F., CALAMA, R., BRAVO, F., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. 2009. Revisión y normalización de los modelos forestales en España. Quinto Congreso Forestal Español. Junta de Castilla y León, Ávila.
- RODRÍGUEZ, J.A. 2008. Sistema de Inferencia Espacial de Propiedades Físico-Químicas e Hidráulicas de los Suelos de Andalucía. Herramienta de Apoyo a la Simulación de Procesos Agro-Hidrológicos a Escala Regional. Informe Final. Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero. Subdirección de Infraestructura y Desarrollo. Área de Modernización y Regadíos. Consejería de Agricultura y Pesca. Sevilla.
- RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R., BALBOA, M.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G., MERINO, A., SANCHEZ, F. 2004. Efecto de la silvicultura en la extracción de nutrientes a lo largo del turno en plantaciones de tres especies de crecimiento rápido en el norte de España. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 114-126.
- RUIZ DE LA TORRE J. (Dir.), 1986-2002. Mapa forestal de España. Escala 1:200.000. Consta de 92 Hojas con sus correspondientes Memorias. Ministerio de Agricultura y Universidad Politécnica, Madrid.
- RUIZ DE LA TORRE, J. 1990. Mapa Forestal de España. Escala 1:200.000, Memoria General, ICONA, Madrid.
- RUIZ PEINADO, R., BRAVO OVIEDO, A., CAÑELLAS, I., RÍO, M. 2010. Modelling dominant height growth in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) forests. IUFRO meeting Global Change and Mediterranean Pines: Alternatives for Management.
- RUIZ-PEINADO, R., RÍO, M, y MONTERO, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems*, 20(1), 176-188.
- SAITO, H., GOOVAERTS, P. 2000. Geostatistical interpolation of positively skewed and censored data in a dioxin-contaminated site. *Environ. Sci. Technol.*, 34, 4228– 4235.
- SÁNCHEZ PALOMARES, O., ELENA ROSSELLÓ, R., CARRETERO CARRERO, M.P. 1990. Caracterización edáfica de los pinares autóctonos españoles de *Pinus nigra* Arn. *Comunicaciones INIA. Serie Recursos Naturales*, 55. Madrid.

- SÁNCHEZ PALOMARES, O., JOVELLAR, L.C., SARMIENTO, L.A., RUBIO, A., GANDULLO, J.M. 2007. Las estaciones ecológicas de los alcornocales españoles. *Monografías INIA. Serie Forestal nº14*. Madrid.
- SÁNCHEZ PALOMARES, O., ROIG GÓMEZ, S., DEL RÍO GAZTELURRUTIA, RUBIO SÁNCHEZ, A., GANDULLO, J.M. 2007. Las estaciones autoecológicas actuales y potenciales de los rebollares españoles. *Monografía INIA: Serie Forestal nº17*. Madrid.
- SÁNCHEZ PALOMARES, O., RUBIO, A., BLANCO, A. 2004. Definición y cartografía de las áreas potenciales fisiográfico-climáticas de hayedo en España. *Inv. Agrar.: Sist. Recur. For.* Fuera de serie: 13-62.
- SÁNCHEZ-PALOMARES, O., ROIG, S., RÍO, M., RUBIO, A., GANDULLO, J.M. 2008. Las estaciones ecológicas actuales y potenciales de los rebollares españoles. *Monografías INIA: Serie Forestal, nº 17*. Madrid.
- SÁNCHEZ SALGUERO, R., NAVARRO CERRILLO, R. M., SWETNAM, T.W., ZAVALA, M.A. 2012. Is drought the only factor of decline in the rear species edge of Europe? The case of southern Iberian pine plantations. *Forest Ecology and Management* 271, 158-169.
- SEAMAN, D.E., POWELL R.A. 1996. An Evaluation of the accuracy of kernel density estimators for home range analysis. *Ecology*, Vol 77, No. 7, pp. 2075-2085. Ecology Society of A, Erica Stable. <http://www.jstor.org/stable/2265701>.
- SECF. 2005. Diccionario forestal. *Ediciones Mundi Prensa*. Madrid.
- SERRADA, R. 2002. Apuntes de Selvicultura. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. UPM, Madrid.
- SERRADA, R., MONTERO, M., REQUE, J. 2008. Compendio de Selvicultura Aplicada en España. *INIA y FUCOVASA*. Madrid.
- SHARY, P. 1995, Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology*, 27(3), 373–390.
- TÍSCAR, P.A. 2007. Dinámica de regeneración de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* al sur de su área de distribución: etapas, procesos y factores implicados. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16(2), 124-135
- TÍSCAR, P.A., LINARES, J.C. 2011. Structure and Regeneration Patterns of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* Natural Forests: A Basic Knowledge for Adaptive Management in a Changing Climate. *Forests* 2: 1013-1030.
- THOMPSON, J., BELL, J., BUTLER, C. 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. *Geoderma*, 100: 67– 89.
- VALSTA, L.T. 1993. Stand Management optimization based on growth simulators. *The Finnish Forest Research Institute*, Research Papers 453.51, 81 pp.
- VANCLAY, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. *CAB International*, Wallingford.
- VON BERTALANFFY, L. 1949. Problems of organic growth. *Nature*, 163: 156-158.
- VON BERTALANFFY, L. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *Quarterly Review of Biology*, 32: 217-231.
- WARREN, D. L., SEIFERT. S. N. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21: 335–342.
- WILEY, E.O., McNYSET, K.M., PETERSON, A.T., ROBINS, C.R., STEWART, A.M. 2003. Niche modeling and geographic range predictions in the marine environment using a machine-learning algorithm. *Oceanography*, 16 (3): 120–127.

ZEIDE, B. 1993. Analysis of growth equations. *Forest Science*. 39 (3), 594–616.





Anejos

1. Radiación terrestre y número máximo de horas de Sol
2. Sistema de inferencia espacial de propiedades físico-químicas e hidráulicas de los suelos de Andalucía. Resumen
3. Variables edáficas derivadas. Funciones de predicción y parámetros de los variogramas
4. Resumen estadístico de las variables ambientales
5. Curvas de respuestas de las variables ambientales

Radiación terrestre y número máximo de horas de Sol

Información obtenida de GUEVARA, (2006)



Radiación Extraterrestre en función de la latitud y mes del año

Northern Hemisphere												Lat. Deg.	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0,0	2,6	10,4	23,0	35,2	42,5	39,4	28,0	14,9	4,9	0,1	0,0	70	41,4	28,6	15,8	4,9	0,2	0,0	0,0	2,2	10,7	23,5	37,3	45,3
0,1	3,7	11,7	23,9	35,3	42,0	38,9	28,6	16,1	6,0	0,7	0,0	68	41,0	29,3	16,9	6,0	0,8	0,0	0,0	3,2	11,9	24,4	37,4	44,7
0,6	4,8	12,9	24,8	35,6	41,4	38,8	29,3	17,3	7,2	1,5	0,1	66	40,9	30,0	18,1	7,2	1,5	0,1	0,5	4,2	13,1	25,4	37,6	44,1
1,4	5,9	14,1	25,8	35,9	41,2	38,8	30,0	18,4	8,5	2,4	0,6	64	41,0	30,8	19,3	8,4	2,4	0,6	1,2	5,3	14,4	26,3	38,0	43,9
2,3	7,1	15,4	26,6	36,3	41,2	39,0	30,6	19,5	9,7	3,4	1,3	62	41,2	31,5	20,4	9,6	3,4	1,2	2,0	6,4	15,5	27,2	38,3	43,9
3,3	8,3	16,6	27,5	36,6	41,2	39,2	31,3	20,6	10,9	4,4	2,2	60	41,5	32,3	21,5	10,8	4,4	2,0	2,9	7,6	16,7	28,1	38,7	43,9
4,3	9,6	17,7	28,4	37,0	41,3	39,4	32,0	21,7	12,1	5,5	3,1	58	41,7	33,0	22,6	12,0	5,5	2,9	3,9	8,7	17,9	28,9	39,1	44,0
5,4	10,8	18,9	29,2	37,4	41,4	39,6	32,6	22,7	13,3	6,7	4,2	56	42,0	33,7	23,6	13,2	6,6	3,9	4,9	9,9	19,0	29,8	39,5	44,1
6,5	12,0	20,0	30,0	37,8	41,5	39,8	33,2	23,7	14,5	7,8	5,2	54	42,2	34,3	24,6	14,4	7,7	4,9	6,0	11,1	20,1	30,6	39,9	44,3
7,7	13,2	21,1	30,8	38,2	41,6	40,1	33,8	24,7	15,7	9,0	6,4	52	42,5	35,0	25,6	15,6	8,8	6,0	7,1	12,2	21,2	31,4	40,2	44,4
8,9	14,4	22,2	31,5	38,5	41,7	40,2	34,4	25,7	16,9	10,2	7,5	50	42,7	35,6	26,6	16,8	10,0	7,1	8,2	13,4	22,2	32,1	40,6	44,5
10,1	15,7	23,3	32,2	38,8	41,8	40,4	34,9	26,6	18,1	11,4	8,7	48	42,9	36,2	27,5	17,9	11,1	8,2	9,3	14,6	23,3	32,8	40,9	44,5
11,3	16,9	24,3	32,9	39,1	41,9	40,6	35,4	27,5	19,2	12,6	9,9	46	43,0	36,7	28,4	19,0	12,3	9,3	10,4	15,7	24,3	33,5	41,1	44,6
12,5	18,0	25,3	33,5	39,3	41,9	40,7	35,9	28,4	20,3	13,9	11,1	44	43,2	37,2	29,3	20,1	13,5	10,5	11,6	16,8	25,2	34,1	41,4	44,6
13,8	19,2	26,3	34,1	39,5	41,9	40,8	36,3	29,2	21,4	15,1	12,4	42	43,3	37,7	30,1	21,2	14,6	11,6	12,8	18,0	26,2	34,7	41,6	44,6
15,0	20,4	27,2	34,7	39,7	41,9	40,8	36,7	30,0	22,5	16,3	13,6	40	43,4	38,0	30,9	22,3	15,8	12,8	13,9	19,1	27,1	35,3	41,8	44,6
16,2	21,5	28,1	35,2	39,9	41,8	40,8	37,0	30,7	23,6	17,5	14,8	38	43,4	38,5	31,7	23,3	16,9	13,9	15,1	20,2	28,0	35,8	41,9	44,5
17,5	22,6	29,0	35,7	40,0	41,7	40,8	37,4	31,5	24,6	18,7	16,1	36	43,4	38,9	32,4	24,3	18,1	15,1	16,2	21,2	28,8	36,3	42,0	44,4
18,7	23,7	29,9	36,1	40,0	41,6	40,8	37,6	32,1	25,6	19,9	17,3	34	43,4	39,2	33,0	25,3	19,2	16,2	17,4	22,3	29,6	36,7	42,0	44,3
19,9	24,8	30,7	36,5	40,0	41,4	40,7	37,9	32,8	26,6	21,1	18,5	32	43,3	39,4	33,7	26,3	20,3	17,4	18,5	23,3	30,4	37,1	42,0	44,1
21,1	25,8	31,4	36,8	40,0	41,2	40,6	38,0	33,4	27,6	22,2	19,8	30	43,1	39,6	34,3	27,2	21,4	18,5	19,6	24,3	31,1	37,5	42,0	43,9
22,3	26,8	32,2	37,1	40,0	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21,0	28	43,0	39,8	34,8	28,1	22,5	19,7	20,7	25,3	31,8	37,8	41,9	43,6
23,4	27,8	32,8	37,4	39,9	40,6	40,2	38,3	34,5	29,3	24,5	22,2	26	42,8	39,9	35,3	29,0	23,5	20,8	21,8	26,3	32,5	38,0	41,8	43,3
24,6	28,8	33,5	37,6	39,7	40,3	39,9	38,3	34,9	30,2	25,5	23,3	24	42,5	40,0	35,8	29,8	24,6	21,9	22,9	27,2	33,1	38,3	41,7	43,0
25,7	29,7	34,1	37,8	39,5	40,0	39,6	38,4	35,4	31,0	26,6	24,5	22	42,2	40,1	36,2	30,6	25,6	23,0	24,0	28,1	33,7	38,4	41,4	42,6
26,8	30,6	34,7	37,9	39,3	39,5	39,3	38,3	35,8	31,8	27,7	25,6	20	41,9	40,0	36,6	31,3	26,6	24,1	25,0	28,9	34,2	38,6	41,2	42,1
27,9	31,5	35,2	38,0	39,0	39,1	38,9	38,2	36,1	32,5	28,7	26,8	18	41,5	40,0	37,0	32,1	27,5	25,1	26,0	29,8	34,7	38,7	40,9	41,7
28,9	32,3	35,7	38,1	38,7	38,6	38,5	38,1	36,4	33,2	29,6	27,9	16	41,1	39,9	37,2	32,8	28,5	26,2	27,0	30,6	35,2	38,7	40,6	41,2
29,9	33,1	36,1	38,1	38,4	38,1	38,1	38,0	36,7	33,9	30,6	28,9	14	40,6	39,7	37,5	33,4	29,4	27,2	27,9	31,3	35,6	38,7	40,2	40,6
30,9	33,8	36,5	38,0	38,0	37,6	37,6	37,8	36,9	34,5	31,5	30,0	12	40,1	39,6	37,7	34,0	30,2	28,1	28,9	32,1	36,0	38,6	39,8	40,0
31,9	34,5	36,9	37,9	37,6	37,0	37,1	37,5	37,1	35,1	32,4	31,0	10	39,5	39,3	37,8	34,6	31,1	29,1	29,8	32,8	36,3	38,5	39,9	39,4
32,8	35,2	37,2	37,8	37,1	36,3	36,5	37,2	37,2	35,6	33,3	32,0	8	38,9	39,0	37,9	35,1	31,9	30,0	30,7	33,4	36,6	38,4	38,8	38,7
33,7	35,8	37,4	37,6	36,6	35,7	35,9	36,9	37,3	36,1	34,1	32,9	6	38,3	38,7	38,0	35,6	32,7	30,9	31,5	34,0	36,8	38,2	38,2	38,0
34,6	36,4	37,6	37,4	36,0	35,0	35,3	36,5	37,3	36,6	34,9	33,9	4	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	37,0	38,0	37,6	37,2
35,4	37,0	37,8	37,1	35,4	34,2	34,6	36,1	37,3	37,0	35,6	34,8	2	36,9	37,9	38,0	36,4	34,1	32,6	33,1	35,2	37,1	37,7	37,0	36,4
36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6	0	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6

ANEjOS

Sistema de inferencia espacial de propiedades físico- químicas e hidráulicas de los Suelos de Andalucía. Resumen

José Antonio Rodríguez Álvarez
Empresa Pública Desarrollo Agrario y Pesquero
Área de Modernización y Regadíos. Subdirección de Infraestructura y Desarrollo
Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía
Calle Bergantín, 39. 41012. Sevilla
e-mail: jarodriguez@dap.es

Palabras clave: Inferencia espacial, regresión-kriging, edafo-transferencia, propiedades de suelos

RESUMEN. En este trabajo se recopilaron, depuraron y homogeneizaron 2.422 perfiles de suelos estudiados en Andalucía y varios mapas temáticos que describen los principales factores de formación edáfica, con el objeto de inferir las propiedades físico-químicas e hidráulicas de los suelos de la región. Para ello se utilizaron técnicas edafométricas de predicción espacial (regresión-kriging) y funciones de edafo-transferencias localmente calibradas. Como resultado del trabajo, se generaron mapas temáticos para dos horizontes homogéneos (superficial y sub-superficial) de las siguientes propiedades: (i) textura, (ii) densidad aparente, (iii) porcentaje de materia orgánica, (iv) pH (H₂O), (v) profundidad del suelo, (vi) capacidad de campo, (vii) punto de marchitez permanente, (viii) conductividad hidráulica saturada, (ix) parámetros de retención del modelo de van Genuchten y (x) parámetros de conductividad hidráulica no saturada del modelo de Mualem. La cartografía digital generada abarca la totalidad de la región andaluza con una resolución espacial uniforme de 250 m.

ABSTRACT. In this work we collected 2422 soil profiles studied in Andalusia and several thematic maps describing the main factors of soil formation, in order to infer some physical-chemical and hydraulic soil properties of the region. To do this, we used pedometric techniques (regression-kriging) combined with locally calibrated pedotransfer functions. As a result of the work, thematic maps were generated for two soil horizons (surface and sub-surface) of the following properties: (i) texture, (ii) bulk density, (iii) percentage of organic matter, (iv) pH (H₂O), (v) depth of soil, (vi) field capacity, (vii) permanent wilt point (viii) saturated hydraulic conductivity, (ix) retention parameters of the van Genuchten's model and (x) conductivity parameters of the Mualem's model. The generated digital maps cover the whole region of with an uniform spatial resolution of 250 m.

■ 1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de información edafológica asimilable por modelos agro-hidrológicos regionales es muy limitada en Andalucía. Si bien existen numerosos estudios locales de suelos, el principal problema de esta inestimable fuente de información es que se encuentra muy dispersa y necesita cierto nivel de depuración y homogenización para ser asimilada por los modelos. Por otro lado, los estudios existentes de suelos a escala regional, tales como el mapa de suelos de Andalucía (CSIC-IARA, 1989), solo son capaces de brindar una información muy general y representativa de las clases edáficas dominantes en las unidades que los conforman.

Generalmente, los mapas regionales de clases edáficas no brindan información directa sobre las propiedades físicas e hidráulica de los suelos, por lo que no pueden ser utilizados por los modelos agro-hidrológicos (McBratney *et al.*, 2003; Dobos *et al.*, 2006).

Ante esta situación se procedió a recopilar, depurar y homogeneizar la mayor cantidad posible de perfiles de suelos estudiados en Andalucía con el objetivo de desarrollar un sistema de inferencia espacial de propiedades físico-químicas e hidráulicas de los suelos de la región.

■ 2. SISTEMA DE INFERENCIA ESPACIAL DE PROPIEDADES DEL SUELO

El objetivo de un Sistema de Inferencia Espacial de Propiedades del Suelo es la producción asistida por ordenador de cartografía digital de propiedades y clases de suelos. Estos sistemas se componen de tres elementos fundamentales (Dobos *et al.*, 2006): (i) un modelo predefinido de formación del suelo, (ii) un conjunto de propiedades del suelo obtenidas de las mediciones directas y (iii) un conjunto de variables auxiliares que tienen un impacto significativo sobre la formación del suelo y la distribución espacial de sus propiedades.

La base para la definición del modelo de formación edáfica es la conocida ecuación de Jenny (1941), que identifica cinco factores principales que contribuyen a la creación del suelo, siendo: (i) clima, (ii) organismos biológicos, (iii) relieve, (iv) material parental y (v) tiempo. Desde el punto de vista del Sistema de Inferencia Espacial, los cinco factores identificados por la ecuación de Jenny deben ampliarse con la inclusión de la posición geográfica. Asimismo, algunas propiedades edafológicas son difíciles de medir, pero pueden estimarse con aceptable precisión mediante su correlación con otros parámetros del suelo medidos en la misma localización. Esta visión es la base del modelo SCORPAN formulado por McBratney *et al.* (2003), quienes identificaron siete factores para la predicción espacial de las propiedades edafológicas. El Sistema de Inferencia Espacial propuesto en este trabajo utilizó a SCORPAN como el modelo de formación edáfica.

■ 3. RECOPIACIÓN, DEPURACIÓN Y HOMOGENIZACIÓN DE PERFILES DE SUELOS

Como primer paso, se identificaron las instituciones que disponen de importantes bases de datos de perfiles de suelos geo-referenciados en Andalucía. Después de recopilar, depurar y homogenizar los datos originales, se retuvieron 2.422 perfiles aportados por el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (812 perfiles), Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (861 perfiles) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (319 perfiles). Para depurar y homogeneizar la información aportada por las instituciones antes mencionadas se siguieron en una serie de pasos que se detallan a continuación:

I.- Se eliminaron los perfiles que no disponían de información en al menos uno de los siguientes parámetros: Coordenadas geográficas, textura, densidad aparente (*DA*), materia orgánica (*MO*), *pH*, capacidad de campo (*CC*), punto de marchitez permanente (*PMP*) y profundidad del suelo hasta el horizonte R.

II.- Las coordenadas geográficas de los perfiles se convirtieron al sistema UTM 30N ED 1950. Se eliminaron todos los perfiles con coordenadas erróneas o dudosas acorde con la información aportada en los campos descriptivos de las bases de datos originales.

III.- Se aplicaron las siguientes reglas para filtrar los datos:

1. $0 \leq \text{Arena, Limo y Arcilla} \leq 100$
2. $95 \geq \text{Arena+Limo+Arcilla} \leq 105$
3. Si se cumple la regla 2, el % de Arena se ajustó restando el % de Limo y Arcilla de 100
4. $0 < DA < 2,65 \text{ gr/cm}^3$
5. $MO (\%) = 1,724 * \text{Carbono Orgánico}$, $0 \leq MO \leq 100$
6. $1 \leq pH (H_2O) \leq 14$
7. $CC (\text{porcentaje volumétrico}) = CC (\text{porcentaje gravimétrico}) * DA$
8. $PMP (\text{porcentaje volumétrico}) = PMP (\text{porcentaje gravimétrico}) * DA$
9. $0 < PMP < CC < 100$
10. $(1-DA/2,65)-(CC/100) \geq 0,01$

IV.- Todos los datos recopilados se sometieron a un análisis de identificación de valores atípicos acorde con las recomendaciones de Batjes (2002). Para todas las observaciones pertenecientes a una misma unidad de suelo (unidades definidas en el mapa de suelos de Andalucía, CSIC-IARA, 1989) se calcularon la mediana y la desviación absoluta de la mediana (*DAM*). El *DAM* se calculó como la mediana de las diferencias entre cada observación y la mediana de la muestra. Las observaciones con valores fuera del rango definido por (*mediana* $\pm$ 3,5**DAM*) se consideraron como atípicas y se eliminaron de la base de 3 datos.

V.- Finalmente, para cada perfil se definió un medio homogéneo equivalente mediante la agregación de las propiedades de los horizontes edáficos originales en dos horizontes homogéneos: Uno superficial de 25 a 30 cm de profundidad (incluye el horizonte A básicamente) y otro sub-superficial con un espesor variable desde los 25-30 cm hasta la profundidad de muestreo. Para identificar las propiedades efectivas de los horizontes homogéneos se siguieron las recomendaciones de Durner *et al.* (2008). Para ello se simuló la evolución diaria (durante un período de un año) de los componentes del balance hídrico con los propiedades originales del perfil del suelo y los datos climáticos del año medio histórico correspondiente a su posición geográfica. Posteriormente, se identificaron las propiedades efectivas de los dos horizontes homogéneos mediante modelización inversa con HYDRUS-1D (Simunek *et al.*, 2005), definiendo como función objetivo la variación diaria del contenido de agua en el suelo simulada en el paso anterior.

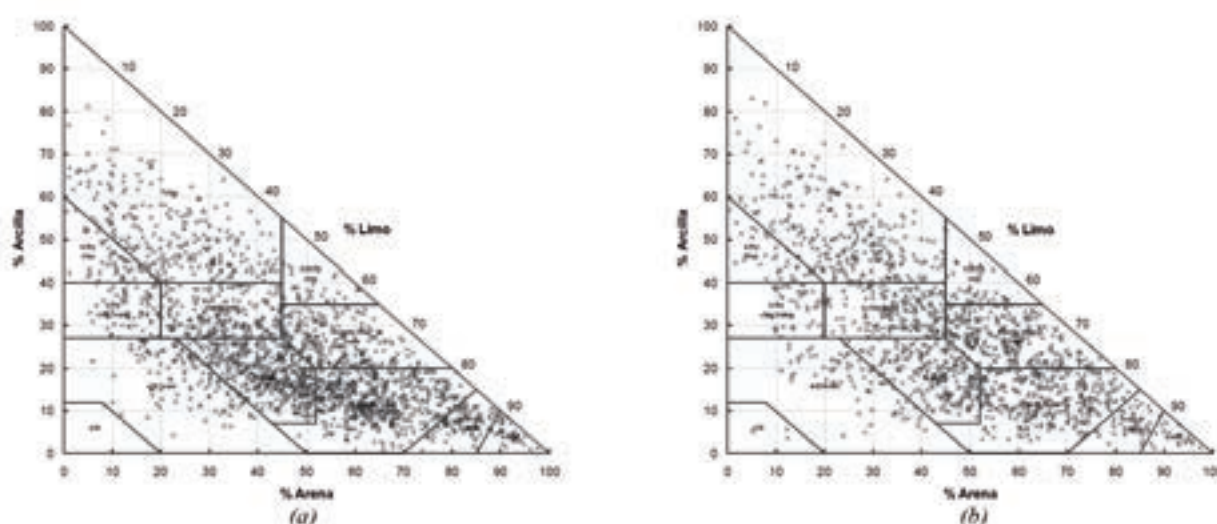


Figura 1.-Clasificación de los perfiles de suelos disponibles según el diagrama de textura del USDA. (a) Textura en el horizonte superficial. (b) Textura en el horizonte subsuperficial

En la Fig. 1 se muestra la clasificación textural de los perfiles recopilados según el sistema del USDA. Los resultados se muestran para los horizontes homogéneos superficial (Fig. 1.a) y subsuperficial (Fig. 1.b). Obsérvese en la Fig. 1 la gran variedad de granulometrías que abarcan los perfiles disponibles, de manera que aparecen representadas todas las clases texturales del USDA en los horizontes homogéneos definidos.

■ 4. VARIABLES AUXILIARES DEL MODELO DE FORMACIÓN EDÁFICA

Partiendo del modelo de formación edáfica asumido en este trabajo (modelo SCORPAN), se identificaron cuatro de los factores más importantes que contribuyen a la formación del suelo. En los siguientes epígrafes se describen los procedimientos de recopilación, depuración y adecuación de las variables auxiliares que se utilizaron en este estudio para describir los principales factores formadores del suelo.

4.1. Parámetros Morfométricos del Terreno

Para el desarrollo del Sistema de Inferencia Espacial se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones de Andalucía con una resolución espacial de 20 m. El primer paso seguido en la parametrización del terreno fue la agregación del MDE a la resolución de trabajo (250 m). La agregación de un MDE es muy útil para reducir las variaciones del terreno a pequeña escala y conseguir una mejor representación regional de su estructura espacial. Sin embargo, este proceso puede deteriorar seriamente la precisión de los parámetros del terreno (Thompson *et al.*, 2001). Para evitar el deterioro de los parámetros del terreno que supone el proceso de agregación, se aplicó el procedimiento que se describe a continuación.

A cada celda original del MDE se asignó el valor medio de las elevaciones contenidas en una ventana local de 250 x 250 m. Posteriormente, el MDE atenuado resultante de la operación anterior se reensambló a la resolución de trabajo de 250 m con el método de interpolación bi-lineal. Asimismo, se calculó la desviación estándar de las elevaciones contenidas en cada ventana local de 250 m. Estos valores se utilizaron para cuantificar la incertidumbre que introdujo el proceso de agregación y generar múltiples realizaciones del MDE con simulaciones estocásticas. Para esto se usó el software DIGEMAN (Bishop *et al.*, 2006) que es capaz de generar realizaciones estocásticas del MDE basado en la técnica de muestreo Hipercubo

Latino, y considerando la correlación espacial entre las celdas vecinas contenidas en una ventana local de 5 x 5 celdas. Para cada una de las 60 realizaciones generadas del MDE se calcularon los parámetros morfométricos correspondientes. Los mapas resultantes se obtuvieron como la media aritmética de todas las realizaciones generadas. Los parámetros morfométricos generados son aquellos que mejor describen los procesos formadores del suelo según los criterios de diferentes autores (Wilson y Gallant, 2000). Así, los atributos elegidos fueron: (i) elevación, (ii) pendiente, (iii) orientación de la pendiente, (iv) curvaturas en planta, perfil, longitudinal, transversal, media, cóncava y convexa, (v) índice de humedad y (vi) potencia de la escorrentía.

4.2. Clases Litológicas

El objetivo de esta fase de trabajo consistió en obtener un mapa sintético de clases litológicas para caracterizar los materiales parentales predominantes en el territorio andaluz. Se eligió como información de partida el Mapa Geológico y Minero de Andalucía (SIGMA) (Junta de Andalucía, 1998) por ser el que más información aporta desde el punto de vista litológico. El Mapa SIGMA divide al territorio andaluz en 6 zonas geotectónicas, 30 unidades geoestructurales y 127 litologías diferentes. Así, objetivo de esta fase fue agrupar las 127 litologías descritas originalmente en el Mapa SIGMA en 20 clases sintéticas. La definición de las clases sintéticas de litologías se basó principalmente en los criterios geomorfológicos, litológicos y cronológicos recomendados por Finke *et al.* (1999).

4.3. Índices de Vegetación

Se seleccionó una serie temporal del Índice de Vegetación Mejorado (EVI) derivado por teledetección para caracterizar las coberturas de los suelos de Andalucía. La serie elegida es una composición temporal (16 días de frecuencia) del EVI derivado por el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) correspondiente al período 2001-2005, con una resolución espacial de 250 m. La serie temporal de imágenes de EVI se sometió a un filtrado con la ayuda del software TIMESAT, especialmente diseñado para estos fines (Jönsson y Eklundh, 2004). En TIMESAT están implementados diferentes tipos de filtros, pero en este trabajo se utilizó el filtro Savitzky-Golay por ser un método sencillo para reconstruir series temporales de índices de vegetación con alta calidad (Chen *et al.*, 2004). Finalizado el proceso de filtrado temporal se procedió a obtener la serie definitiva de EVI compuesta por 23 imágenes con frecuencia de 16 días. Cada imagen que compone esta serie se obtuvo como la media aritmética de las 5 imágenes adquiridas en el período analizado (2001-2005).

4.4. Variables Climáticas

Para caracterizar el clima de Andalucía se utilizaron los datos de precipitación y temperatura media mensual procesados por Moreno (2003). Este autor recopiló y depuró los datos de 817 estaciones pluviométricas y 163 termométricas de la región. Moreno (2003) no procesó datos de temperaturas máxima y mínima mensual en su trabajo original, sin embargo, estas variables climáticas son necesarias para caracterizar los regímenes de humedad a que están sometidos los suelos a través de la evapotranspiración de referencia. Por esta razón, los datos de temperaturas máxima y mínima se obtuvieron del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (Ninyerola *et al.*, 2005), y se utilizaron para calcular la evapotranspiración de referencia con el método de Hargreaves (1994) calibrado para las condiciones de la región andaluza por Vanderlinden *et al.* (2004).

Finalizado el proceso de recopilación y depuración de los datos climáticos se procedió a la generación de la cartografía continua a partir de los datos puntuales registrados en las estaciones meteorológicas. La técnica utilizada para la generación de los mapas se basó en el procedimiento conocido como regresiónkriging (Hengl *et al.*, 2004), que se basa en el desarrollo de funciones de predicción que intentan explicar las relaciones entre las variables climáticas y determinadas variables geográficas (elevación, pendiente, orientación del terreno y las coordenadas geográficas). Las partes no explicadas por las funciones de predicción se interpolaron espacialmente con el método de Kriging ordinario. La cartografía resultante se obtuvo como la suma de los mapas obtenidos por regresión y los mapas de los residuos.

La precisión final de los mapas generados se evaluó con el procedimiento de validación cruzada. Así, los mapas generados fueron capaces de explicar entre el 87 y 95% de la variabilidad de la precipitación media mensual y entre el 87 y el 91% de las variaciones de las temperaturas. En ningún caso, la raíz del error cuadrático medio superó el valor de 1 grado en las predicciones de las temperaturas y los 10 mm en la precipitación media mensual.

■ 5. INFERENCIA DE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO

La cartografía digital de las principales propiedades físico-químicas analizadas en este trabajo se obtuvo con el procedimiento de regresión-kriging, siguiendo las recomendaciones de Hengl *et al.* (2004) y Hengl *et al.* (2007). Estos autores reconocen que las relaciones funcionales entre las propiedades del suelo y las variables ambientales son desconocidas y, usualmente, muy ruidosas. Por esta razón se intentan modelizar con simples funciones lineales, toda vez que los modelos más complejos no mejoran sensiblemente las predicciones. Asimismo, es conocido que las relaciones entre las propiedades del suelo y las variables auxiliares no son necesariamente lineales, sino que se aproximan más bien a funciones sigmoidales, por lo que es aconsejable aplicar transformaciones logísticas a las variables del suelo antes de correlacionarlas linealmente con las variables ambientales.

Por otro lado, muchas de las variables auxiliares originalmente recopiladas en este trabajo están altamente correlacionadas entre sí (datos no mostrados), por lo que si se usaran directamente como variables independientes en las funciones de predicción espacial se originarían serios problemas de multicolinealidad. Para evitar estos problemas se aplicó un análisis de Componentes Principales (CP) que permitió reducir drásticamente la dimensionalidad de los datos originales sin pérdida significativa de información.

Completado el proceso de transformación de las variables se procedió a desarrollar las funciones de predicción espacial de las propiedades del suelo. Además de las CP de las variables ambientales, se utilizaron las coordenadas geográficas como variables independientes de las funciones de predicción. La inclusión de las coordenadas aseguró que no se perdiera el patrón espacial no explicado originalmente por las variables ambientales en el proceso de inferencia de las propiedades del suelo (McBratney *et al.*, 2003). El procedimiento utilizado para realizar los análisis se basó en la técnica de regresión no paramétrica conocida como árboles de regresión, implementada en el software GUIDE (Loh, 2007). GUIDE aplica el procedimiento de selección por pasos hacia adelante (stepwise forward selection) para ajustar modelos lineales múltiples en los nodos terminales del árbol seleccionado y, asimismo, es capaz de asimilar variables continuas y discretas.

En general, las predicciones de las funciones obtenidas fueron suficientemente buenas (R^2 entre 0,284 y 0,701) y estadísticamente significativas en todos los casos. La profundidad del suelo y el pH fueron las variables mejores explicadas por los modelos de regresión, mientras que la materia orgánica fue la propiedad menos explicada. Tal como se esperaba, la correlación entre las propiedades del suelo y las variables ambientales fue más fuerte en la superficie del suelo que en los estratos más profundos. Los residuos (o parte no explicada por las funciones) se obtuvieron como la diferencia entre los valores observados y los valores estimados por las funciones de predicción espacial. Las interpolaciones espaciales de los residuos se realizaron con el software VESPER (Minasny *et al.*, 2005). Los residuos de las variables del suelo con más de 1000 observaciones se interpolaron con el procedimiento Block Kriging ordinario con variogramas locales. Todos los variogramas locales se ajustaron al modelo exponencial usando 100 datos vecinos. Los residuos de la única variable del suelo con menos de 1000 observaciones (Profundidad del Suelo) se interpoló con el método Block Kriging ordinario convencional, que ajusta un solo variograma global con todos los datos disponibles.

Tabla 1.- Precisión alcanzada en la generación de los mapas de propiedades físico-químicas del suelo

PROPIEDAD	ARENA (%)	LIMO (%)	ARCILLA (%)	PH (H ₂ O)	M. ORGÁNICA (%)	PROFUNDIDAD (%)
Horizonte Superficial						0,905
R²	0,774	0,779	0,7918	0,894	0,786	
RECM	8,075	6,574	6,309	0,276	0,669	
Horizonte SubSuperficial						18,561
R²	0,717	0,767	0,721	0,905	0,701	
RECM	8,939	6,908	7,889	0,286	0,371	

5.1. Generación y Evaluación de la Cartografía Digital de las Propiedades Físico-Químicas del Suelo

La cartografía digital de las propiedades del suelo se obtuvo como la suma de los mapas derivados con las funciones de predicción espacial y los mapas de los residuos. La precisión de los mapas generados se evaluó con el procedimiento de validación cruzada y se expresó a través del coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (*RECM*). La **Tabla 1** contiene la precisión alcanzada en la generación de los mapas de las propiedades del suelo con el procedimiento de regresión-kriging. Como regla general, la cartografía digital de suelos puede considerarse adecuada si es capaz de explicar entre el 50% y el 75% de la varianza total de las muestras de datos independientes (Hengl *et al.*, 2007). Los mapas obtenidos en este estudio fueron capaces de explicar entre el 70 y el 90% de la variabilidad de las propiedades analizadas, que son índices de precisión excelentes.

■ 6. INFERENCIA DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO

La producción de la cartografía digital de las propiedades hidráulicas del suelo se basó en el desarrollo y la aplicación de funciones de edafotransferencia. Para la predicción de la Capacidad de Campo (*CC*) y el Punto de Marchitez Permanente (*PMP*) se calibraron funciones de edafotransferencia con los datos locales disponibles. Para ello se utilizó el procedimiento k-Nearest Neighbor (*KNN*), recientemente desarrollada por Nemes *et al.* (2008). *KNN* fue capaz de explicar el 78,9% de las variaciones de la *CC* y el 75,2% del *PMP*, con *RECM* de 0,049 cm³/cm³ y 0,037 cm³/cm³ respectivamente. Estos índices de precisión pueden considerarse muy favorables y fueron similares a los reportados por Nemes *et al.* (2006).

Por otro lado, los parámetros de retención de la función de van Genuchten (1980), la conductividad hidráulica saturada (*Ks*), y los parámetros de la función de conductividad hidráulica no saturada inferidos por el modelo de Mualem (1976) se obtuvieron con las funciones de edafotransferencia contenidas en el software Rosetta (Schaap *et al.*, 2001).

Rosetta utiliza un procedimiento jerárquico basado en redes neuronales artificiales. Los resultados de *Rosetta* se evaluaron con los datos de *CC* y *PMP* recopilados en este trabajo. Para ello, los datos registrados se compararon con los contenidos volumétricos de agua a 330 cm y 15000 cm de potencial matricial calculados con la función de van Genuchten y los parámetros de retención obtenidos por *Rosetta*. En la Fig. 2 se muestra los resultados de la evaluación. Si bien las predicciones de *CC* se aproximaron adecuadamente a los valores deseados, puede apreciarse importantes errores sistemáticos en la estimación del *PMP* (Fig. 2b). Schaap *et al.* (2001) observaron que *Rosetta* tiende a subestimar los valores de retención de agua para presiones elevadas. Por otro lado, Schaap y Leij (1998) apuntaron que los errores sistemáticos reflejan las diferencias entre las condiciones locales de las fuentes de datos utilizados para la calibración y la evaluación de Rosetta y, consecuentemente, deben ser corregidos.

Para adaptar los resultados de Rosetta a las condiciones de la región de estudio se siguió el procedimiento propuesto por Schaap *et al.* (2004). La idea consiste en utilizar un procedimiento que modifica los cuatro parámetros de retención obtenidos originalmente por *Rosetta* con simples transformaciones lineales, de manera que se logre minimizar los errores de predicción de los contenidos de agua en el suelo.

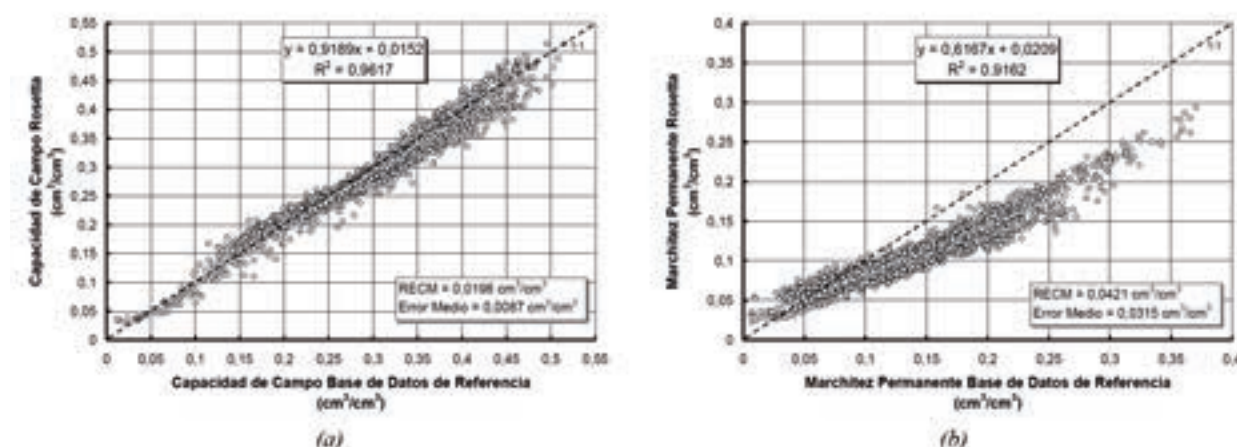


Figura 2.- Comparación entre los contenidos volumétricos de agua registrados en la base de datos de referencia y estimados por Rosetta. (a) Contenido de agua para un potencial matricial de 330 cm. (b) Contenido de agua para un potencial matricial de 15000 cm.

En la Fig. 3 se comparan los valores de contenidos de agua observados y estimados tras aplicar el procedimiento de corrección. Puede apreciarse que el procedimiento de corrección redujo sustancialmente los errores sistemáticos, sobre todo en la estimación del *PMP*. El error medio de estimación del *PMP* pasó de $0,0315 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a $0,0048 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, mientras que la *RECM* se redujo en más del 50% del valor originalmente obtenido. Los errores de estimación de la *CC* también se redujeron pero en menor cuantía.

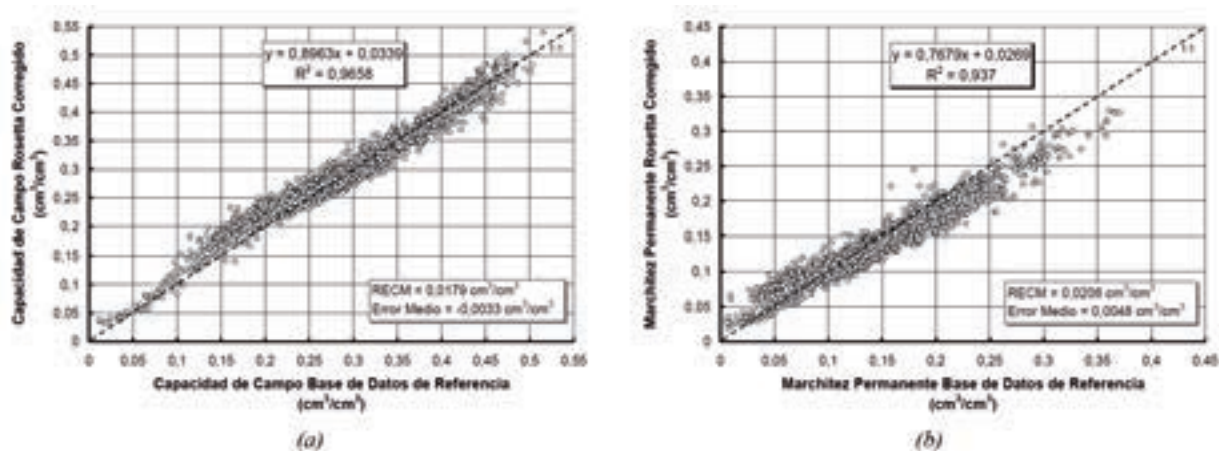


Figura 3.- Comparación entre los contenidos volumétricos de agua registrados en la base de datos de referencia y estimados por Rosetta tras aplicar el procedimiento de corrección. (a) Capacidad de Campo. (b) Punto de Marchitez Permanente

7. CONCLUSIONES

En este estudio se recopilaron, depuraron y homogeneizaron 2.422 perfiles de suelos descritos en Andalucía con el objetivo de inferir sus principales propiedades físico-químicas e hidráulicas a escala regional. Los perfiles recopilados cubrieron adecuadamente la extensión geográfica de la región y representaron todas las clases texturales definidas por el USDA. Para inferir las propiedades del suelo se desarrolló un Sistema de Inferencia Espacial basado en las técnicas edafométricas más actuales, que permitieron correlacionar la información obtenida de las observaciones directas del suelo con las principales variables ambientales que contribuyen a la formación del suelo.

Los mapas obtenidos en este estudio fueron capaces de explicar entre el 70 y el 90% de la variabilidad de las propiedades físico-químicas analizadas. Por otro lado, para inferir las propiedades hidráulicas de los suelos de la región se calibraron diferentes funciones de edafo-transferencias con los datos locales disponibles. En general se puede concluir que la precisión alcanzada por el Sistema de Inferencia Espacial fue satisfactoria y válida para realizar estudios agro-hidrológicos a escala regional.

REFERENCIAS

- Batjes, N.H. 2002. Soil estimates for the soil types of the world for use in global and regional modelling (Versión 2.1, July 2002). ISRIC
- Report 2002/02c. International Food Policy Research Institute (IFPRI) and International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen.
- Bishop, T.F.A.; Minasny, B. y McBratney, A.B. 2006. Uncertainty analysis for soil-terrain models. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2): 117–134.
- Chena, J.; Jönsson, P.; Tamurab, M.; Gua, Z.; Matsushitab, B. y Eklundhd, L. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91: 332–344.
- CSIC-IARA. 1989. Consejo Superior de Investigaciones Científicas–Instituto Andaluz de la Reforma Agraria. Mapa de suelos de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, España.
- Dobos, E.; Carré, F.; Hengl, T.; Reuter, H.I. y Tóth, G. 2006. Digital Soil Mapping as a support to production of functional maps. EUR 22123 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 68 pp.
- Durner, W.; Jansen, U. y Iden, S.C. 2008. Effective hydraulic properties of layered soils at the lysimeter scale determined by inverse modelling. *European Journal of Soil Science*, 59: 114–124.
- Finke, P.; Hartwich, R.; Dudal, R.; Ibañez, J.; Jamagne, M.; King, D.; Montanarella, L. y Yassoglou, N. 1999. Una base de datos de suelos georreferenciada para Europa. Manual de procedimientos Versión 1.1. Editado por el Comité Científico del Buró Europeo de Suelos.
- Hargreaves, G. H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *ASCE J. Irrig. Drain. Engng.*, 120: 1132–1139.
- Hengl, T.; Heuvelink, G.B.M. y Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 120: 75–93.
- Hengl, T.; Heuvelink, G.B.M. y Rossiter, D.G. 2007. About regression-kriging: from equations to case studies. *Computers and Geosciences*, 33(10): 1301–1315.
- Jenny, H. 1941. Factors of soil formation - a system of quantitative pedology. McGraw-Hill, New York, 281 pp.
- Jönsson, P. y Eklundh, L. 2004. TIMESAT - a program for analysing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*, 30: 833–845.
- Junta de Andalucía. 1998. Mapa Geológico-Minero de Andalucía. Escala 1:400.000 (3ª Versión). Sevilla.
- Loh, W.Y. 2007. GUIDE (version 6.0) User Manual. Department of Statistics, University of Wisconsin–Madison. <http://www.stat.wisc.edu/~loh/guide.html>.
- McBratney, A.B.; Mendonça-Santos, M.L. y Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3–52.
- Minasny, B.; McBratney, A.B. y Whelan, B.M. 2005. VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>.
- Moreno, J. A. 2003. Modelo informático de simulación e información hidrológica. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Agrónomos y Montes. Universidad de Córdoba.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resource. Research*, 12: 513 – 522.

- Nemes, A.; Rawls, W.J. y Pachepsky, Y.A. 2006. Use of the non-parametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 327-336.
- Nemes, A.; Roberts, R.T.; Rawls, W.J.; Pachepsky, Y.A. y van Genuchten, M.T. 2008. Software to estimate -33 and -1500 kPa soil water retention using the non-parametric k-Nearest Neighbor technique. *Environmental Modelling & Software*, 23: 254-255.
- Ninyerola, M.; Pons, X. y Roure, J.M. 2005. Atlas climático digital de la península ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología. Universidad Autónoma de Barcelona. <http://opengis.uab.es/wms/iberia/index.htm>.
- Schaap, M.G. y Leij, F.J. 1998. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 163: 765–779.
- Schaap, M.G.; Leij, F.J. y van Genuchten, M.T. 2001. *Rosetta*: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251: 163–176.
- Schaap, M.G.; Nemes, A. y van Genuchten, M.T. 2004. Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. *Vadose Zone Journal*, 3:1455–1463.
- Simunek, J.; van Genuchten, M. T. y Sejna, M. 2005. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 270 pp.
- Thompson, J.; Bell, J. y Butler, C. 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil landscape modelling. *Geoderma*, 100: 67–89.
- Vanderlinden, K.; Giráldez, J.V. y Van Mervenne, M. 2004. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in Southern Spain. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 129 (1): 53–63.
- 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.
- Wilson, J.P. y Gallant, J.C. (eds). 2000. *Terrain analysis: Principles and applications*. John Wiley and Sons, New York.

Variables edáficas derivadas. Funciones de predicción y parámetros de los variogramas

Cabe recordar que el procedimiento seguido para la obtención de las funciones de predicción espacial, consistió en obtener una regresión multivariable que relacionara los datos de perfiles de suelo (transformados logísticamente según la recomendación de HENGL, 2007) con los componentes principales en los que en su estudio RODRÍGUEZ (2008) sintetiza la información cuantitativa territorial de las variables edáficas.

Tierra Fina:

Tabla TF.1. Límites físicos asumidos en la transformación logística

PROPIEDAD	EG_{min} (%)	EG_{max} (%) *
Elementos Gruesos	0	100

Tabla TF.2. Funciones de predicción espacial para Elementos Gruesos

PROPIEDAD	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN ESPACIAL	ERROR ESTÁNDAR	R ²
Elementos Gruesos	$EG^{**} = 92,739 - 2,486 * LAT - 0,153 * CP1 - 0,044 * CP2 + 0,228 * CP3 + 0,547 * CP4 - 0,207 * CP6 - 0,345 * CP7 + 0,364 * CP8 + 0,141 * CP9 - 0,158 * CP10 - 0,536 * CP11 - 0,103 * CP12 - 0,112 * CP15 + 0,226 * CP17 - 0,135 * CP18 + 0,178 * CP19 + 0,140 * CP20 - 0,173 * CP21 + 0,182 * CP22 + 0,119 * CP24 - 0,200 * CP25 + 0,158 * CP26 + 0,09 * CP27 + 0,223 * CP28 - 0,259 * CP29 + 0,119 * CP30 - 0,113 * CP31 - 0,421 * CP32 - 0,176 * CP33 - 0,389 * CP35 + 0,316 * CP36 + 0,335 * CP37 - 0,431 * CP38 + 1,102 * CP40 - 0,402 * CP42$	1,760	0,338

** Variable con transformación logística recomendada por HENGL, 2007

p < 0,01, todas las relaciones fueron estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 99%

Tabla TF.3. Parámetros de los variogramas utilizados para interpolar los residuos de las funciones de predicción espacial

ESPECIE	MODELO DE VARIOGRAMA	C ₀	C ₁	A ₁
Elementos Gruesos	Exponencial $\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{h}{A_1} \right)} \right)$	0,000	3,060	6.905,60

Caliza Activa:

Tabla CA.1. Límites físicos asumidos en la transformación logística

PROPIEDAD	CA_{MIN} (%)	CA_{MAX} (%) *
Caliza Activa	0	50

Tabla CA.2. Funciones de predicción espacial

PROPIEDAD	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN ESPACIAL	ERROR ESTÁNDAR	R ²
Caliza Activa	$CA^{**} = -4,671 - 0,321 * LON + 0,052 * CP1 + 0,055 * CP3 + 0,381 * CP4 + 0,181 * CP5 + 0,200 * CP8 + 0,096 * CP9 - 0,134 * CP10 + 0,169 * CP11 + 0,233 * CP12 + 0,164 * CP16 - 0,141 * CP17 + 0,147 * CP24 - 0,109 * CP25 - 0,124 * CP27 - 0,273 * CP30 + 0,209 * CP32 + 0,302 * CP33 - 0,402 * CP35 + 0,237 * CP36 + 0,610 * CP37 - 0,531 * CP39 - 0,349 * CP41 - 0,677 * CP44$	0,933	0,577

** Variable con transformación logística recomendada por HENGL, 2007

p < 0,01, todas las relaciones fueron estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 99%

Tabla CA.3. Parámetros de los variogramas utilizados para interpolar los residuos de las funciones de predicción espacial

ESPECIE	MODELO DE VARIOGRAMA	C ₀	C ₁	A ₁
Caliza Activa	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{h}{A_1} \right)} \right)$ <i>Exponencial</i>	0,100	0,829	19.914

Capacidad de Intercambio Catiónico:

Tabla CIC.1. Límites físicos asumidos en la transformación logística

PROPIEDAD	CIC _{MIN} (MEQ/100G)	CIC _{MAX} (MEQ/100G) *
Capacidad de Intercambio Catiónico	0	80

Tabla CIC.2. Funciones de predicción espacial

PROPIEDAD	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN ESPACIAL	ERROR ESTÁNDAR	R ²
Capacidad de Intercambio Catiónico	$CIC^{**} = 9,752 - 0,594 * LAT - 0,192 * LON - 0,040 * CP1 + 0,072 * CP3 + 0,154 * CP4 + 0,062 * CP5 + 0,234 * CP8 - 0,096 * CP10 - 0,095084 * CP21 + 0,148 * CP24 - 0,075 * CP25 + 0,215 * CP37 + 0,306 * CP40 - 0,234 * CP42$	0,796	0,229

** Variable con transformación logística recomendada por HENGL, 2007
p < 0,01, todas las relaciones fueron estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 99%

Tabla CIC.3. Parámetros de los variogramas utilizados para interpolar los residuos de las funciones de predicción espacial

ESPECIE	MODELO DE VARIOGRAMA	C ₀	C ₁	A ₁
Capacidad de Intercambio Catiónico	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{h}{A_1} \right)} \right)$ <i>Exponencial</i>	0,080	0,498	10.741

Porcentaje de Saturación de Bases:

Tabla PSB.1. Límites físicos asumidos en la transformación logística

PROPIEDAD	PSB _{MIN} (%)	PSB _{MAX} (%) *
Porcentaje de Saturación de bases	0	100

Tabla PSB.2. Funciones de predicción espacial

PROPIEDAD	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN ESPACIAL	ERROR ESTÁNDAR	R ²
Porcentaje de Saturación de bases	$PSB^{**} = 186,986 - 4,747 * LAT + 0,592 * LON + 0,257 * CP2 + 0,259 * CP3 + 0,955 * CP4 + 0,362 * CP5 + 0,444 * CP8 - 0,226 * CP10 + 0,386 * CP11 - 0,324 * CP12 - 0,323 * CP13 - 0,706 * CP14 + 0,523 * CP20 + 0,396 * CP22 + 0,499 * CP24 - 0,784 * CP26 - 0,237 * CP27 - 0,757 * CP28 - 0,867 * CP30 + 0,480 * CP35 - 0,557 * CP37 - 1,484 * CP38$	2,314	0,546

** Variable con transformación logística recomendada por HENGL, 2007
p < 0,01, todas las relaciones fueron estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 99%

Tabla PSB.3. Parámetros de los variogramas utilizados para interpolar los residuos de las funciones de predicción espacial

ESPECIE	MODELO DE VARIOGRAMA	C ₀	C ₁	A ₁
Porcentaje de Saturación de bases	Exponencial			
	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{h}{A_1} \right)} \right)$	0,000	4,629	3.677,10

Nitrógeno Superficial:

Tabla Nsup.1. Límites físicos asumidos en la transformación logística

PROPIEDAD	NSUP _{MIN} (%)	NSUP _{MAX} (%) *
Nitrógeno Superficial	0	1,50

Tabla Nsup.2. Funciones de predicción espacial

PROPIEDAD	FUNCIÓN DE PREDICCIÓN ESPACIAL	ERROR ESTÁNDAR	R ²
Nitrógeno Superficial	$Nsup^{**} = -16,544 + 0,392 * LAT + 0,159 * LON - 0,0729 * CP2 - 0,0298 * CP3 - 0,110 * CP4 - 0,024 * CP6 + 0,059 * CP7 - 0,042 * CP9 - 0,051 * CP11 + 0,057 * CP12 + 0,050 * CP21 + 0,059 * CP24 + 0,057 * CP25 + 0,115 * CP30 + 0,078 * CP34 + 0,114 * CP35 + 0,182 * CP42 + 0,461 * CP44$	0,615	0,183

** Variable con transformación logística recomendada por HENGL, 2007
p < 0,01, todas las relaciones fueron estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 99%

Tabla Nsup.3. Parámetros de los variogramas utilizados para interpolar los residuos de las funciones de predicción espacial

ESPECIE	MODELO DE VARIOGRAMA	C ₀	C ₁	A ₁
Nitrógeno Superficial	Exponencial			
	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{\left(-\frac{h}{A_1} \right)} \right)$	0,030	0,455	18.662

Resumen estadístico de las variables ambientales

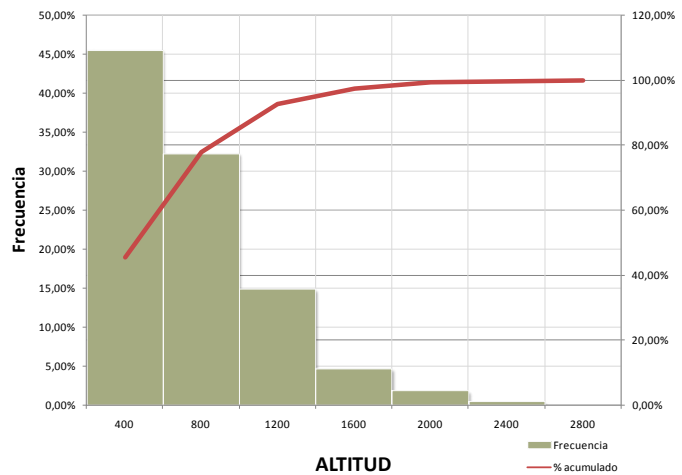
■ 4.1 ALTITUD (m)

ALTITUD

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	524,37
Error típico	1,84
Mediana	447,35
Desviación estándar	434,96
Varianza de la muestra	189190,86
Curtosis	2,35
Coefficiente de asimetría	1,27
Rango	3263,95
Mínimo	0
Máximo	3263,95



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

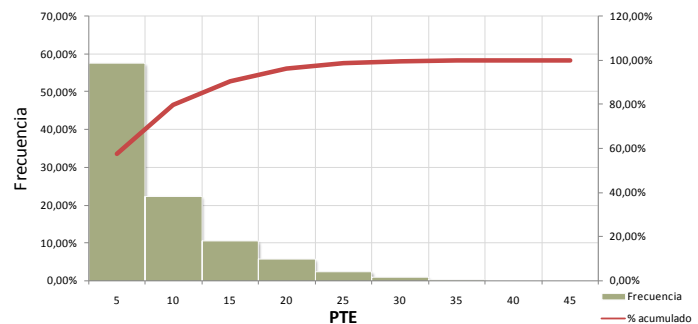
■ 4.2 PENDIENTE (grados)

PENDIENTE

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	6,05
Error típico	0,03
Mediana	3,98
Desviación estándar	5,94
Varianza de la muestra	35,28
Curtosis	2,73
Coefficiente de asimetría	1,61
Rango	42,26
Mínimo	0,00
Máximo	42,26



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

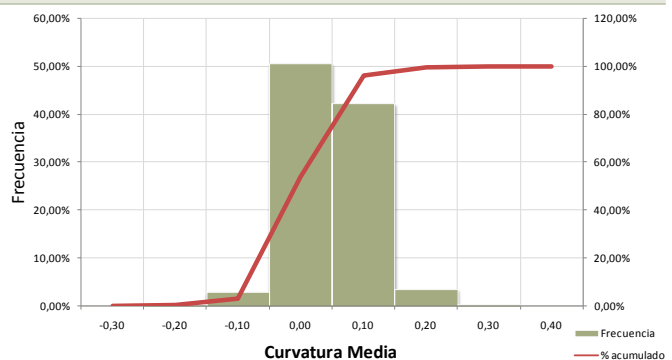
■ 4.3 CURVATURA MEDIA (1/m)

CURVATURA MEDIA

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	0,00
Error típico	0,00
Mediana	0,00
Desviación estándar	0,05
Varianza de la muestra	0,00
Curtosis	4,17
Coefficiente de asimetría	0,24
Rango	0,77
Mínimo	-0,38
Máximo	0,40



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

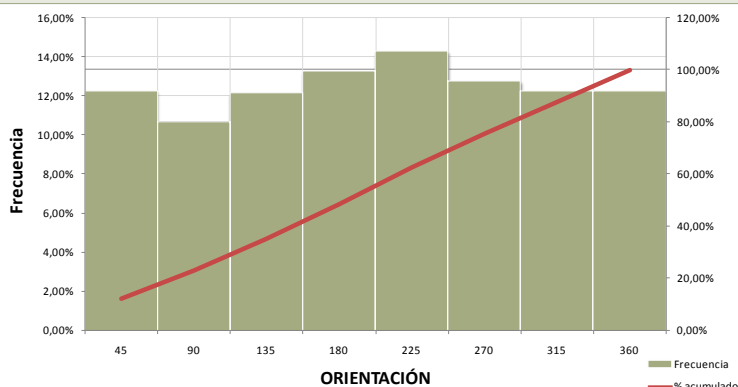
■ 4.4 ORIENTACIÓN (grados)

ORIENTACIÓN

Análisis univariable

Media	182,26
Error típico	0,43
Mediana	184,99
Desviación estándar	102,43
Varianza de la muestra	10492,76
Curtosis	-1,11
Coefficiente de asimetría	-0,06
Rango	361,00
Mínimo	-1,00
Máximo	360,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

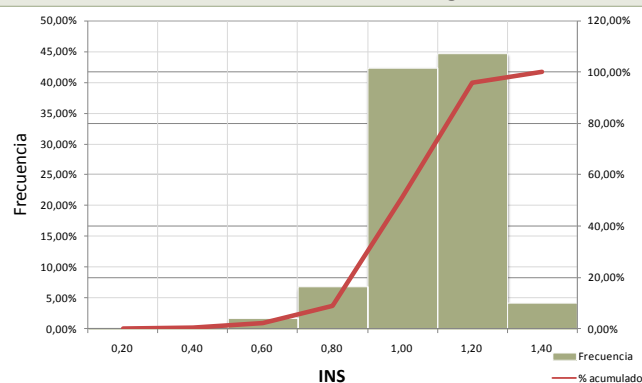
■ 4.5 INSOLACIÓN (adimensional)

INSOLACIÓN

Análisis univariable

Media	0,98
Error típico	0,00
Mediana	1,00
Desviación estándar	0,14
Varianza de la muestra	0,02
Curtosis	6,65
Coefficiente de asimetría	-1,59
Rango	1,41
Mínimo	0,00
Máximo	1,41

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

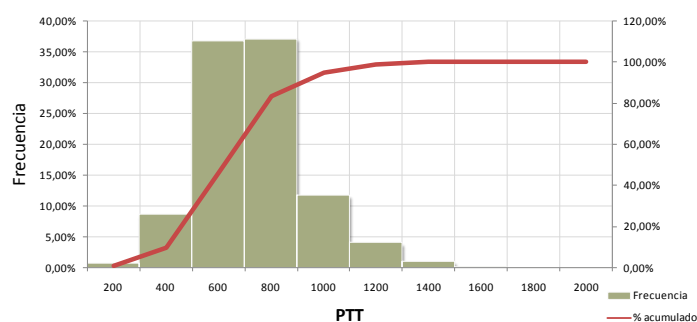
■ 4.6 PRECIPITACIÓN ANUAL (mm)

PRECIPITACIÓN ANUAL

Análisis univariable

Media	639,46
Error típico	0,83
Mediana	612,68
Desviación estándar	195,93
Varianza de la muestra	38386,68
Curtosis	1,56
Coefficiente de asimetría	0,66
Rango	1900,39
Mínimo	0,00
Máximo	1900,39

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

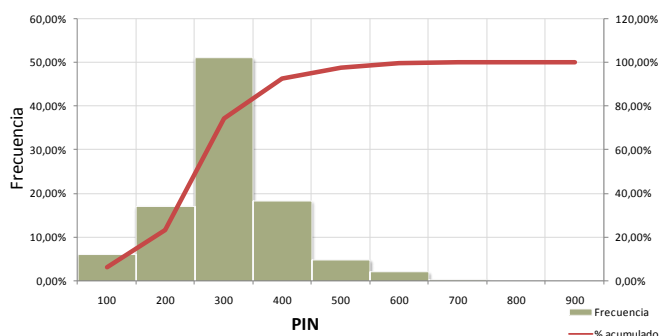
■ 4.7 PRECIPITACIÓN DE INVIERNO (mm)

PRECIPITACIÓN DE INVIERNO

Análisis univariable

Media	257,65
Error típico	0,41
Mediana	252,35
Desviación estándar	97,73
Varianza de la muestra	9552,04
Curtosis	1,75
Coefficiente de asimetría	0,67
Rango	876,34
Mínimo	0,00
Máximo	876,34

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

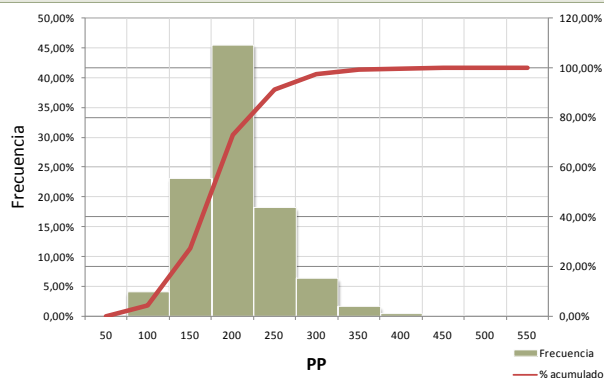
■ 4.8 PRECIPITACIÓN DE PRIMAVERA (mm)

PRECIPITACIÓN DE PRIMAVERA

Análisis univariable

Media	178,50
Error típico	0,22
Mediana	170,41
Desviación estándar	51,38
Varianza de la muestra	2639,81
Curtosis	2,30
Coefficiente de asimetría	0,89
Rango	524,64
Mínimo	0,00
Máximo	524,64

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

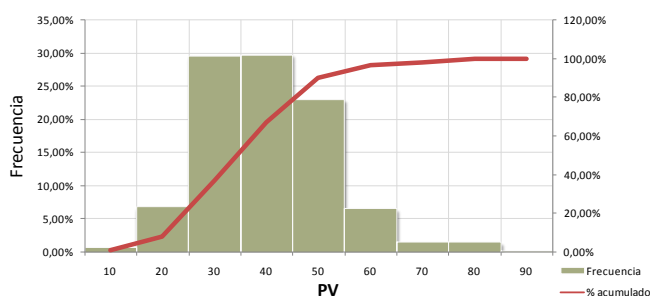
■ 4.9 PRECIPITACIÓN DE VERANO (mm)

PRECIPITACIÓN DE VERANO

Análisis univariable

Media	35,35
Error típico	0,05
Mediana	33,67
Desviación estándar	12,24
Varianza de la muestra	149,74
Curtosis	0,99
Coefficiente de asimetría	0,71
Rango	91,14
Mínimo	0,00
Máximo	91,14

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

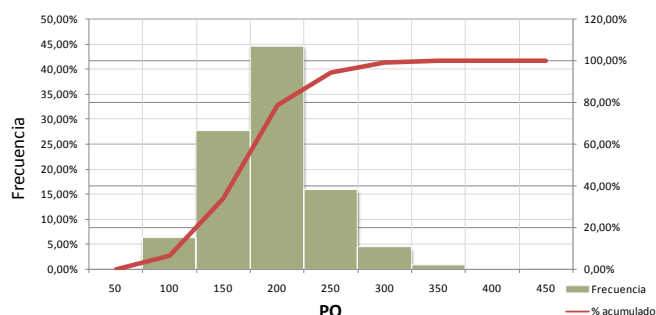
■ 4.10 PRECIPITACIÓN DE OTOÑO (mm)

PRECIPITACIÓN DE OTOÑO

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	167,97
Error típico	0,20
Mediana	162,99
Desviación estándar	46,66
Varianza de la muestra	2176,71
Curtosis	1,06
Coefficiente de asimetría	0,54
Rango	455,19
Mínimo	0,00
Máximo	455,19



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

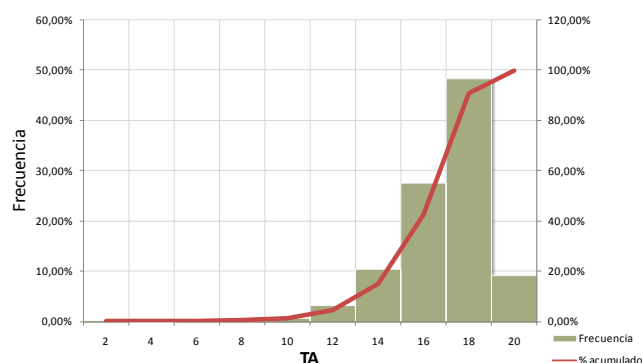
■ 4.11 TEMPERATURA MEDIA ANUAL (grados)

TEMPERATURA MEDIA ANUAL

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	15,95
Error típico	0,01
Mediana	16,37
Desviación estándar	2,06
Varianza de la muestra	4,24
Curtosis	8,38
Coefficiente de asimetría	-1,99
Rango	19,02
Mínimo	0
Máximo	19,02



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

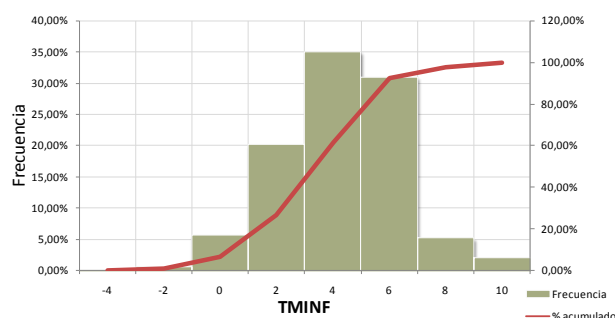
■ 4.12 TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÍNIMAS DEL MES MÁS FRÍO (grados)

TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÍNIMAS DEL MES MÁS FRÍO

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	3,24
Error típico	0,01
Mediana	3,17
Desviación estándar	2,16
Varianza de la muestra	4,66
Curtosis	0,13
Coefficiente de asimetría	-0,06
Rango	15,78
Mínimo	-5,80
Máximo	9,97



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

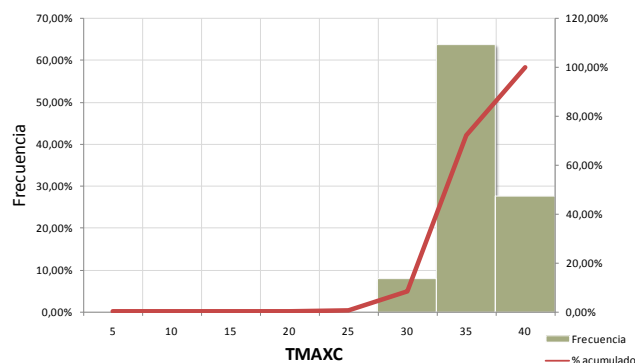
■ 4.13 TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÁXIMAS DEL MES MÁS CÁLIDO (grados)

TEMPERATURA MEDIA DE LAS MÍNIMAS DEL MES MÁS CÁLIDO

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	33,43
Error típico	0,01
Mediana	34,10
Desviación estándar	2,70
Varianza de la muestra	7,27
Curtosis	45,79
Coefficiente de asimetría	-4,28
Rango	37,80
Mínimo	0,00
Máximo	37,80



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

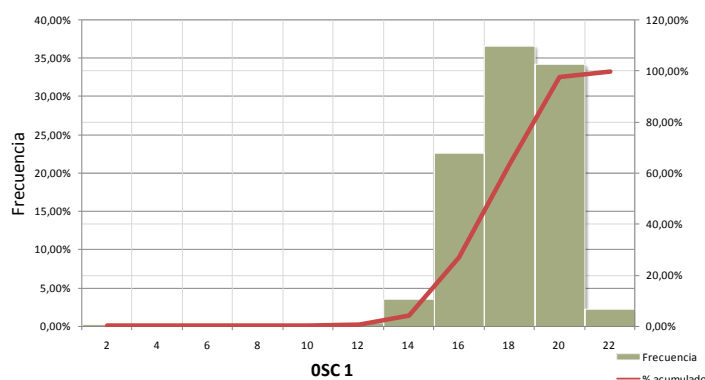
■ 4.14 OSCILACIÓN TÉRMICA MEDIA (grados)

OSCILACIÓN TÉRMICA MEDIA

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	17,09
Error típico	0,01
Mediana	17,15
Desviación estándar	1,87
Varianza de la muestra	3,49
Curtosis	13,00
Coefficiente de asimetría	-1,80
Rango	20,88
Mínimo	0,00
Máximo	20,88



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

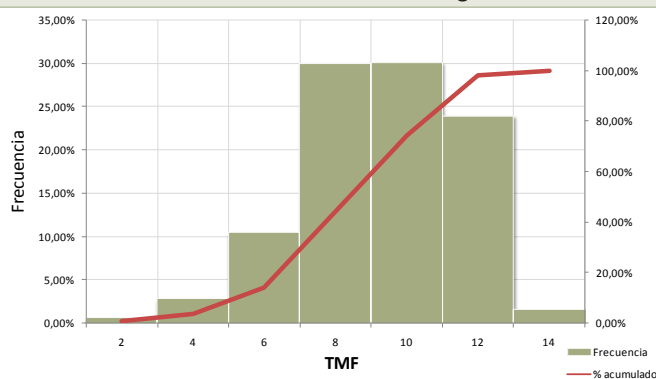
■ 4.15 TEMPERATURA MEDIA DEL MES MÁS FRÍO (grados)

TEMPERATURA MEDIA DEL MES MÁS FRÍO

Análisis univariable

Histograma de frecuencia

Media	8,26
Error típico	0,01
Mediana	8,33
Desviación estándar	2,15
Varianza de la muestra	4,61
Curtosis	0,64
Coefficiente de asimetría	-0,62
Rango	15,58
Mínimo	-2,54
Máximo	13,04



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

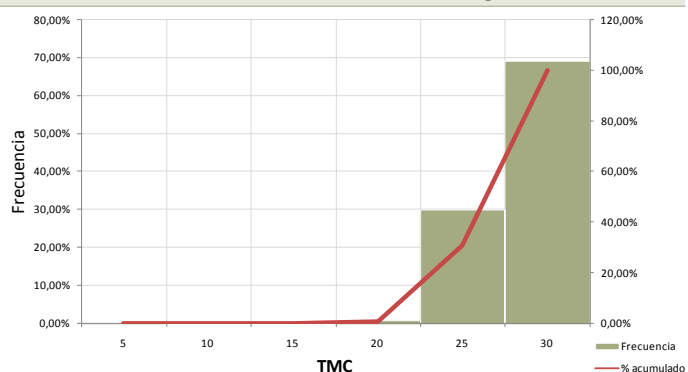
■ 4.16 TEMPERATURA MEDIA DEL MES MÁS CÁLIDO (grados)

TEMPERATURA MEDIA DEL MES MÁS CÁLIDO

Análisis univariable

Media	25,35
Error típico	0,01
Mediana	25,74
Desviación estándar	1,91
Varianza de la muestra	3,64
Curtosis	61,66
Coefficiente de asimetría	-5,36
Rango	28,73
Mínimo	0,00
Máximo	28,73

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

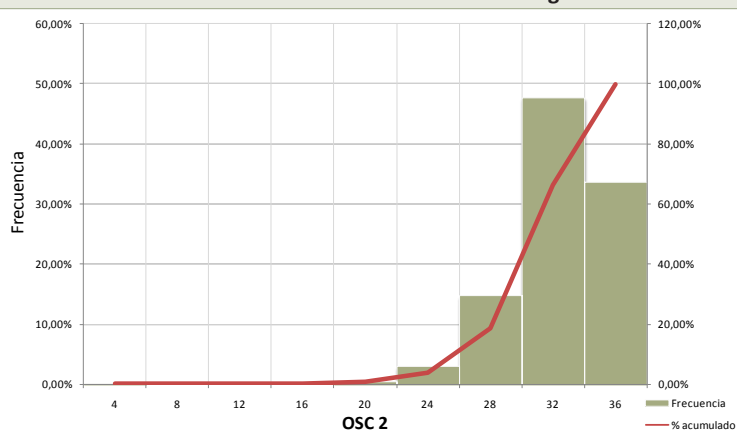
■ 4.17 OSCILACIÓN TÉRMICA TOTAL (grados)

OSCILACIÓN TÉRMICA TOTAL

Análisis univariable

Media	30,19
Error típico	0,01
Mediana	30,70
Desviación estándar	3,20
Varianza de la muestra	10,25
Curtosis	15,68
Coefficiente de asimetría	-2,40
Rango	36,15
Mínimo	0,00
Máximo	36,15

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

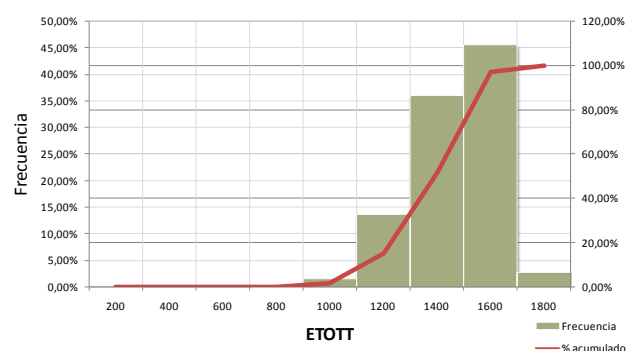
■ 4.18 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ANUAL (mm)

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA ANUAL

Análisis univariable

Media	1363,30
Error típico	0,68
Mediana	1394,81
Desviación estándar	160,42
Varianza de la muestra	25733,45
Curtosis	9,77
Coefficiente de asimetría	-1,73
Rango	1738,17
Mínimo	0,00
Máximo	1738,17

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

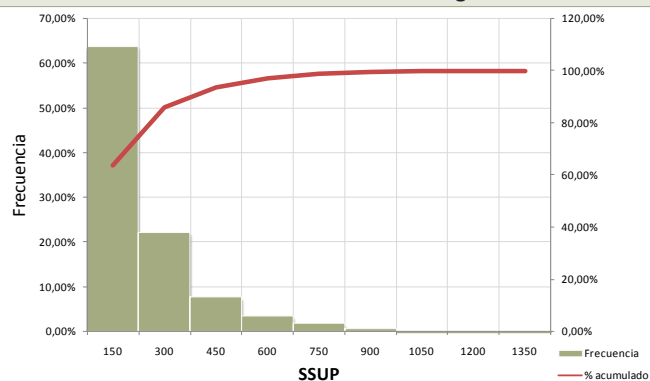
■ 4.19 SUMA DE SUPERAVITS (mm)

SUMA DE SUPERAVITS

Análisis univariable

Media	152,33
Error típico	0,68
Mediana	101,00
Desviación estándar	160,27
Varianza de la muestra	25686,21
Curtosis	4,34
Coefficiente de asimetría	1,88
Rango	1451,00
Mínimo	0,00
Máximo	1451,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

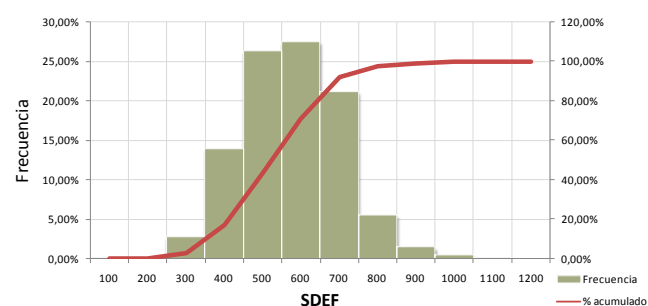
■ 4.20 SUMA DE DÉFICITS (mm)

SUMA DE DÉFICITS

Análisis univariable

Media	526,49
Error típico	0,55
Mediana	524,00
Desviación estándar	130,90
Varianza de la muestra	17135,83
Curtosis	0,61
Coefficiente de asimetría	0,20
Rango	1115,00
Mínimo	0,00
Máximo	1115,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

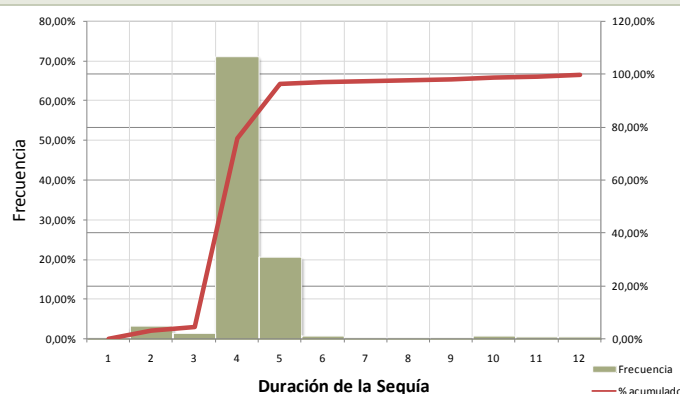
■ 4.21 DURACIÓN DE LA SEQUÍA (meses)

DURACIÓN DE LA SEQUÍA

Análisis univariable

Media	4,30
Error típico	0,00
Mediana	4,00
Desviación estándar	1,16
Varianza de la muestra	1,35
Curtosis	19,85
Coefficiente de asimetría	3,50
Rango	12,00
Mínimo	0,00
Máximo	12,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

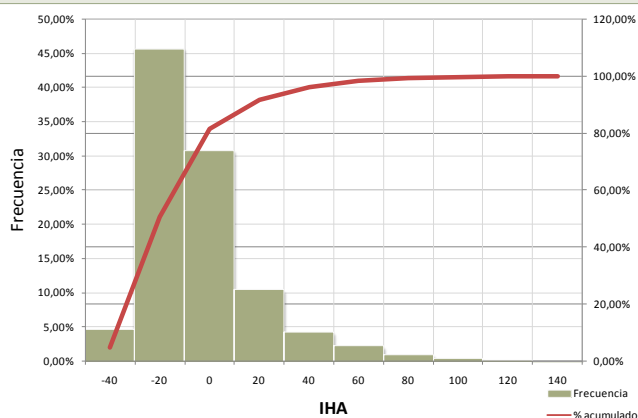
■ 4.22 ÍNDICE HÍDRICO ANUAL (adimensional)

ÍNDICE HÍDRICO ANUAL

Análisis univariable

Media	-13,56
Error típico	0,10
Mediana	-20,00
Desviación estándar	23,20
Varianza de la muestra	538,06
Curtosis	4,85
Coefficiente de asimetría	1,84
Rango	212,00
Mínimo	-54,00
Máximo	158,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

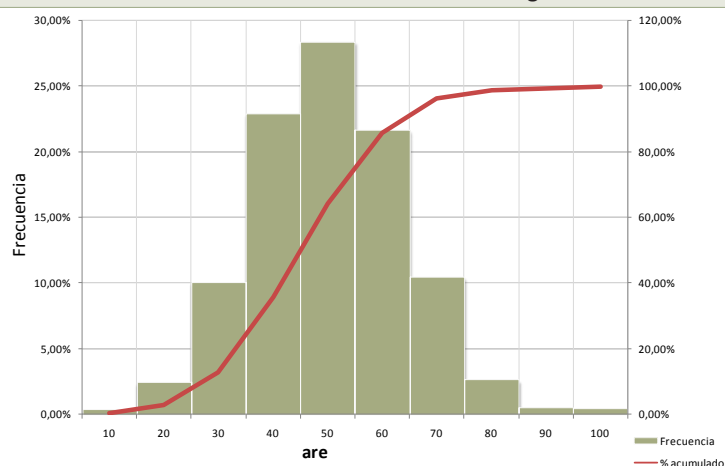
■ 4.23 ARENA (%)

ARENA

Análisis univariable

Media	45,28
Error típico	0,06
Mediana	45,06
Desviación estándar	13,78
Varianza de la muestra	189,89
Curtosis	0,28
Coefficiente de asimetría	0,18
Rango	92,76
Mínimo	0,00
Máximo	92,76

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

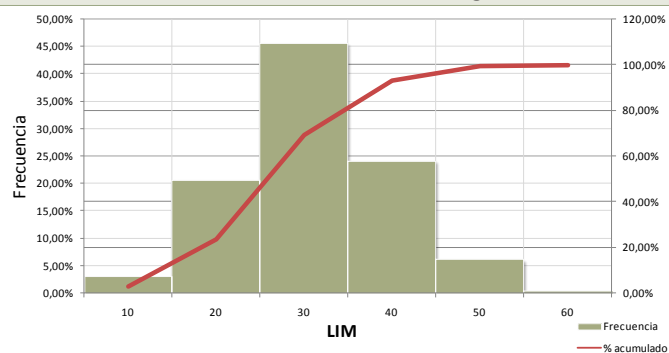
■ 4.24 LIMO (%)

LIMO

Análisis univariable

Media	26,09
Error típico	0,04
Mediana	25,72
Desviación estándar	8,79
Varianza de la muestra	77,24
Curtosis	0,12
Coefficiente de asimetría	0,17
Rango	60,13
Mínimo	0,00
Máximo	60,13

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

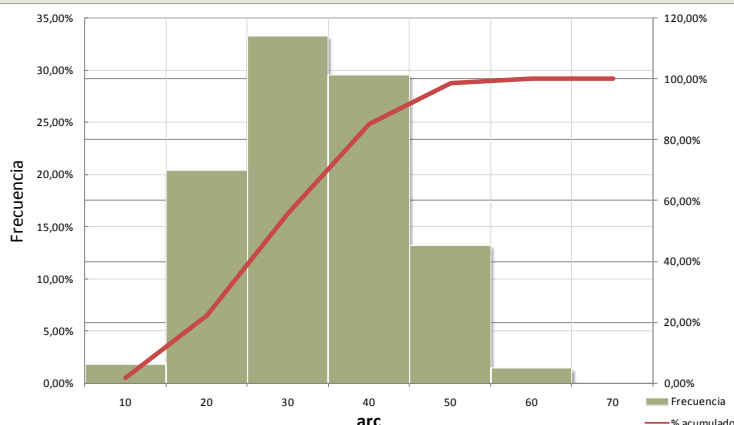
■ 4.25 ARCILLA (%)

ARCILLA

Análisis univariable

Media	28,62
Error típico	0,04
Mediana	28,15
Desviación estándar	10,32
Varianza de la muestra	106,50
Curtosis	-0,56
Coefficiente de asimetría	0,15
Rango	65,88
Mínimo	0,00
Máximo	65,88

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

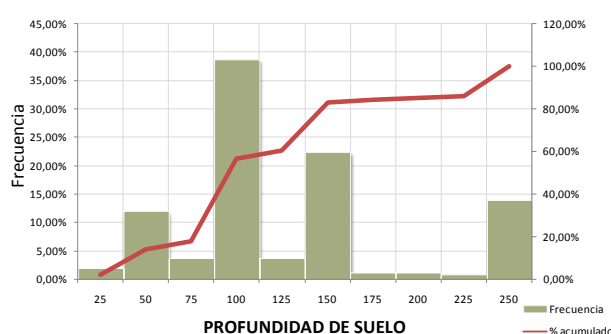
■ 4.26 PROFUNDIDAD DEL SUELO (cm)

PRODUNDIDAD DEL SUELO

Análisis univariable

Media	125,15
Error típico	0,26
Mediana	100,00
Desviación estándar	61,48
Varianza de la muestra	3779,62
Curtosis	-0,09
Coefficiente de asimetría	0,78
Rango	250,00
Mínimo	0,00
Máximo	250,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

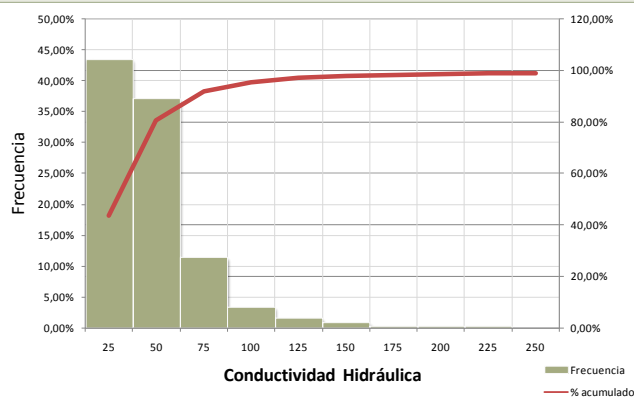
■ 4.27 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA (cm/día)

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA

Análisis univariable

Media	40,58
Error típico	0,22
Mediana	27,54
Desviación estándar	50,92
Varianza de la muestra	2592,62
Curtosis	58,13
Coefficiente de asimetría	6,84
Rango	627,19
Mínimo	0,00
Máximo	627,19

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

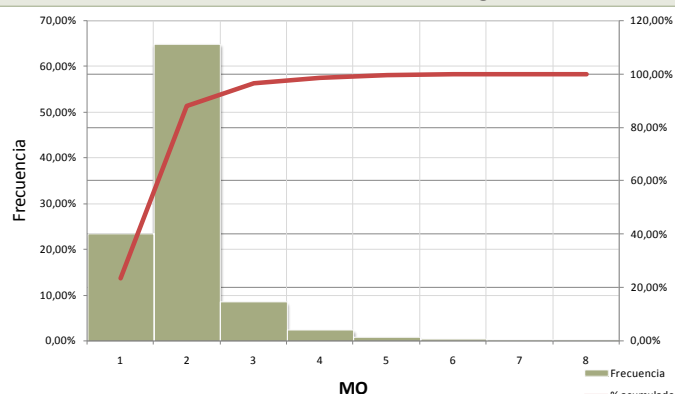
■ 4.28 MATERIA ORGÁNICA (%)

MATERIA ORGÁNICA

Análisis univariable

Media	1,41
Error típico	0,00
Mediana	1,25
Desviación estándar	0,68
Varianza de la muestra	0,47
Curtosis	15,81
Coefficiente de asimetría	3,05
Rango	11,17
Mínimo	0,00
Máximo	11,17

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

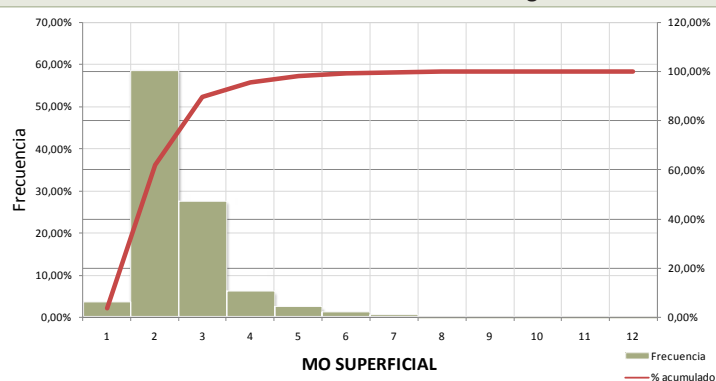
■ 4.29 MATERIA ORGÁNICA SUPERFICIAL (%)

MATERIA ORGÁNICA SUPERFICIAL

Análisis univariable

Media	2,04
Error típico	0,00
Mediana	1,83
Desviación estándar	0,94
Varianza de la muestra	0,87
Curtosis	10,19
Coefficiente de asimetría	2,51
Rango	11,41
Mínimo	0,00
Máximo	11,41

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

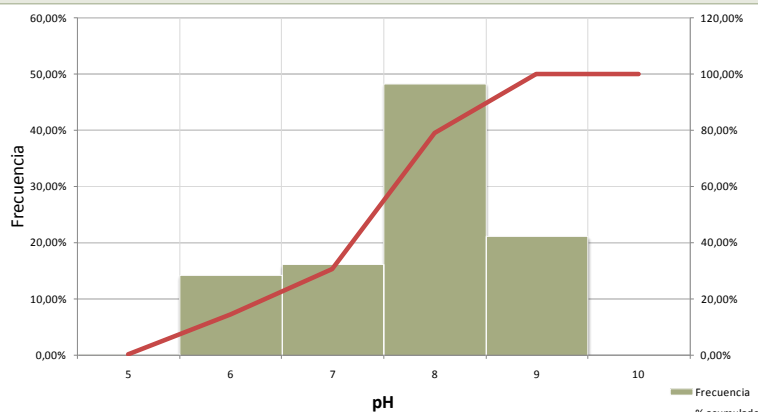
■ 4.30 PH

PH

Análisis univariable

Media	7,30
Error típico	0,00
Mediana	7,65
Desviación estándar	0,89
Varianza de la muestra	0,80
Curtosis	-0,22
Coefficiente de asimetría	-0,86
Rango	9,00
Mínimo	0,00
Máximo	9,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster. resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

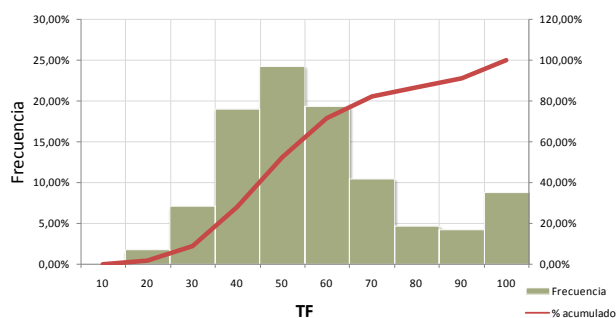
■ 4.31 TIERRA FINA (%)

TIERRA FINA

Análisis univariable

Media	52,88
Error típico	0,09
Mediana	49,00
Desviación estándar	20,29
Varianza de la muestra	411,63
Curtosis	-0,01
Coefficiente de asimetría	0,75
Rango	100,00
Mínimo	0,00
Máximo	100,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

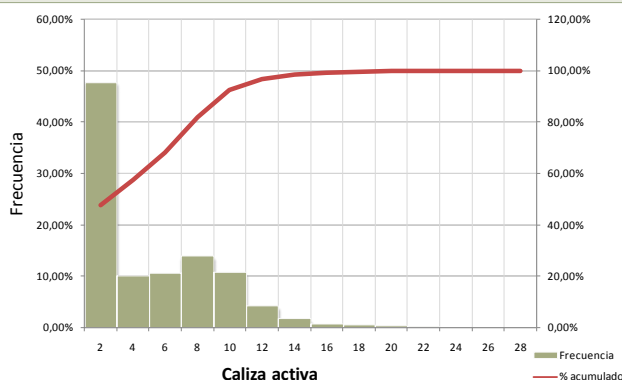
■ 4.32 CALIZA ACTIVA (%)

CALIZA ACTIVA

Análisis univariable

Media	4,04
Error típico	0,02
Mediana	2,37
Desviación estándar	3,89
Varianza de la muestra	15,15
Curtosis	0,66
Coefficiente de asimetría	1,00
Rango	27,92
Mínimo	0,00
Máximo	27,92

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

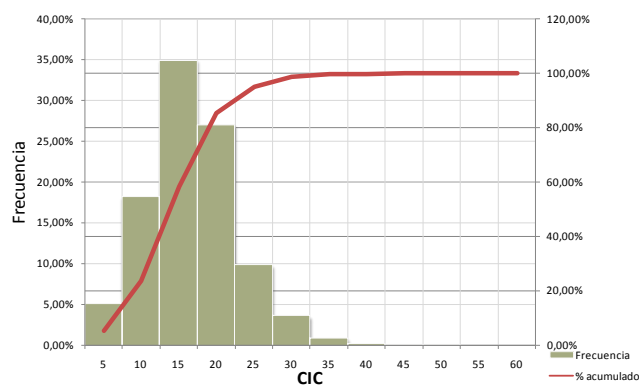
■ 4.33 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (meq/100 gr)

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO

Análisis univariable

Media	14,23
Error típico	0,03
Mediana	13,86
Desviación estándar	6,07
Varianza de la muestra	36,89
Curtosis	1,71
Coefficiente de asimetría	0,60
Rango	57,58
Mínimo	0,00
Máximo	57,58

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

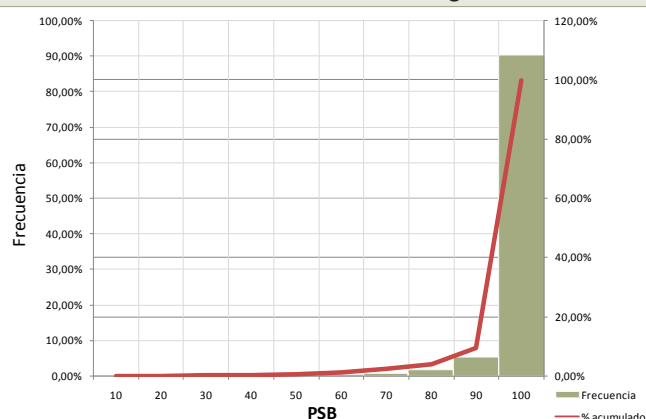
■ 4.34 PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE BASES (%)

PORCETAJE DE SATURACIÓN DE BASES

Análisis univariable

Media	96,70
Error típico	0,04
Mediana	99,93
Desviación estándar	8,50
Varianza de la muestra	72,19
Curtosis	27,29
Coefficiente de asimetría	-4,61
Rango	100,00
Mínimo	0,00
Máximo	100,00

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

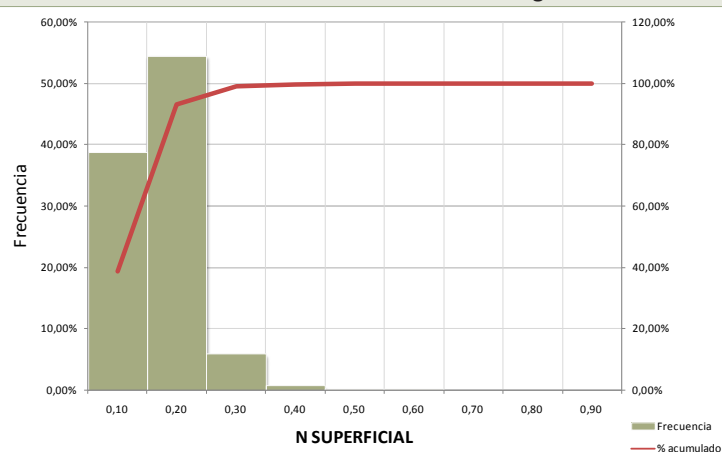
■ 4.35 NITRÓGENO SUPERFICIAL (%)

NITRÓGENO SUPERFICIAL

Análisis univariable

Media	0,12
Error típico	0,00
Mediana	0,11
Desviación estándar	0,05
Varianza de la muestra	0,00
Curtosis	16,21
Coefficiente de asimetría	2,28
Rango	0,93
Mínimo	0,00
Máximo	0,93

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

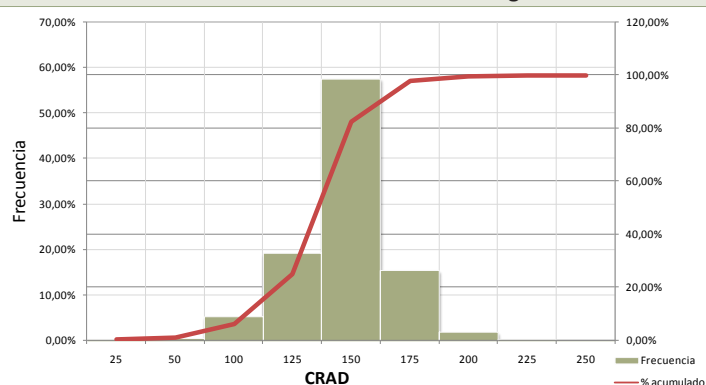
■ 4.36 CAPACIDAD DE RETENCIÓN DEL AGUA (mm/m)

CAPACIDAD DE RETENCIÓN DEL AGUA

Análisis univariable

Media	133,90
Error típico	0,09
Mediana	135,39
Desviación estándar	21,56
Varianza de la muestra	464,98
Curtosis	5,11
Coefficiente de asimetría	-1,12
Rango	234,39
Mínimo	0,00
Máximo	234,39

Histograma de frecuencia



Espacio: región andaluza
Ráster: resolución 100x100

ETRS89 Zone 30N - ED1950 Zone 30N
Nº píxeles:8.759.954

Curvas de respuestas de las variables ambientales



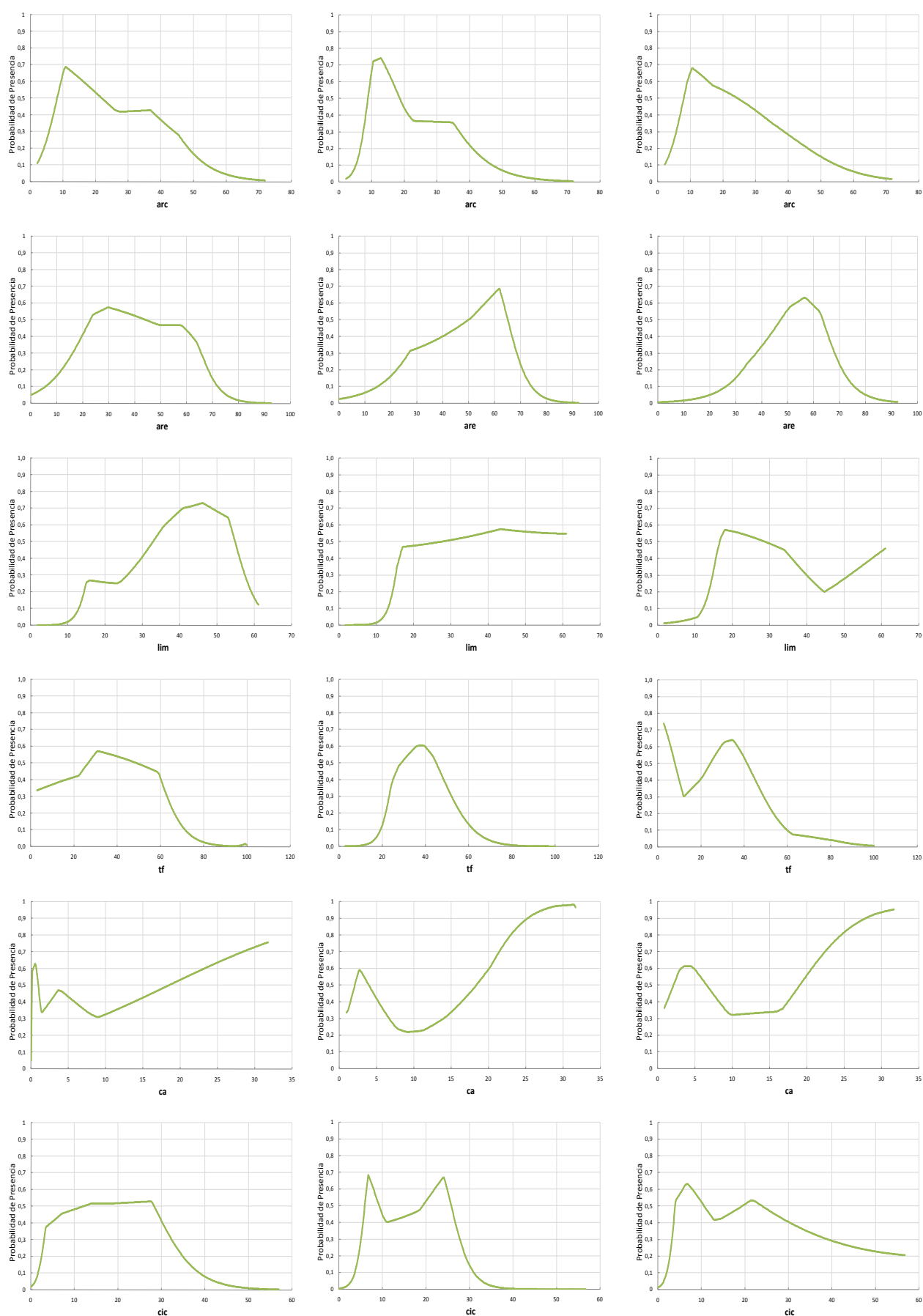
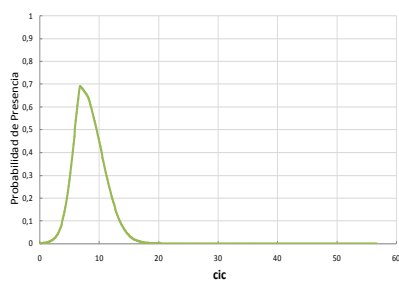
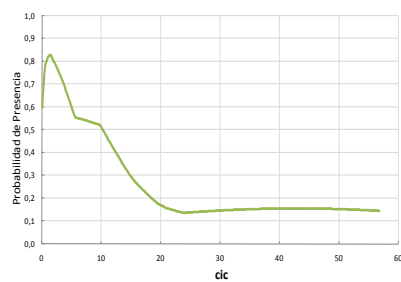
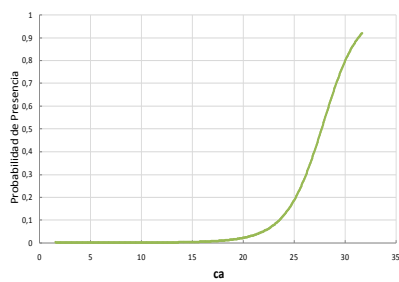
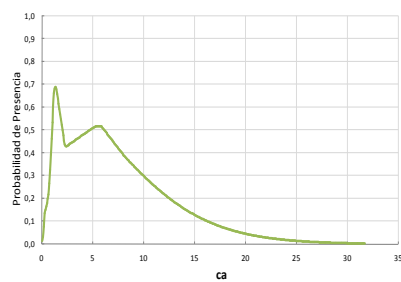
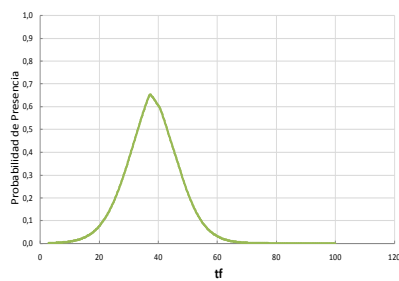
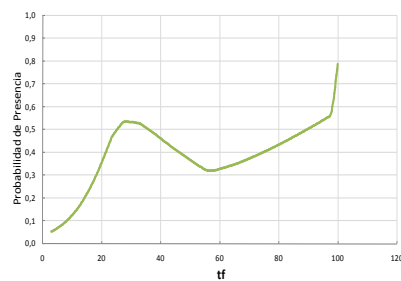
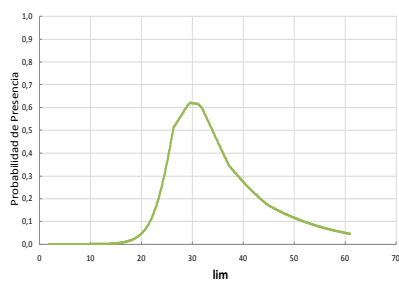
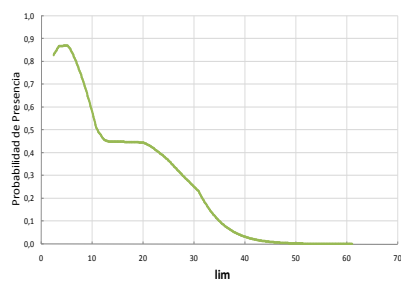
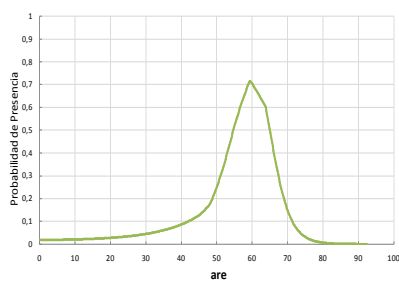
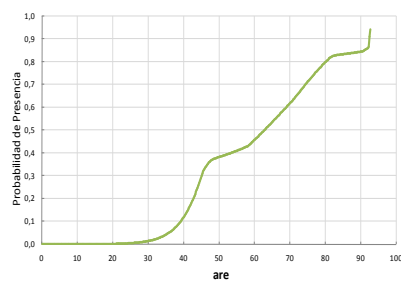
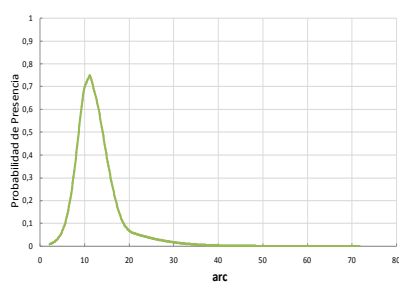
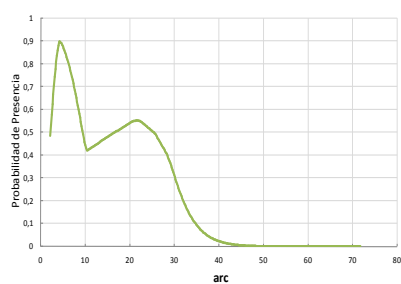
*Pinus halepensis**Pinus nigra**Pinus pinaster*

Figura A5.1. Curvas de respuestas de las variables ambientales para cada especie analizada

Pinus pinea

Pinus sylvestris



Pinus halepensis

Pinus nigra

Pinus pinaster

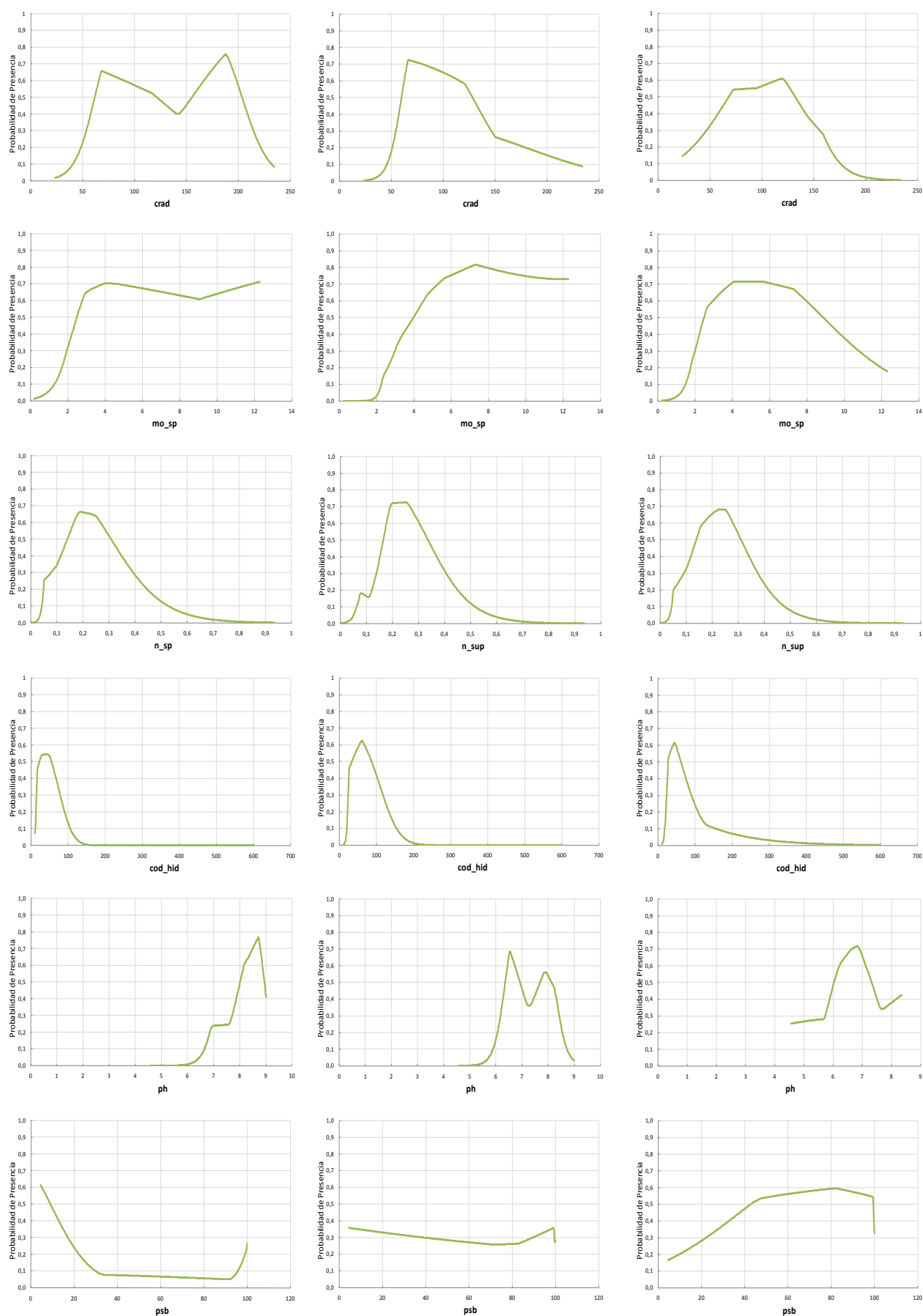
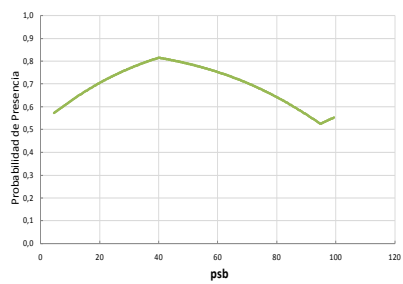
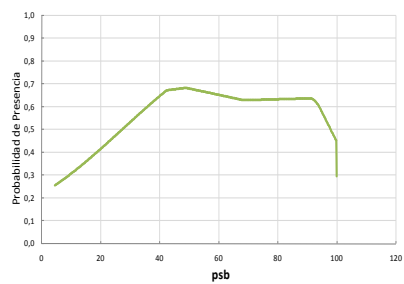
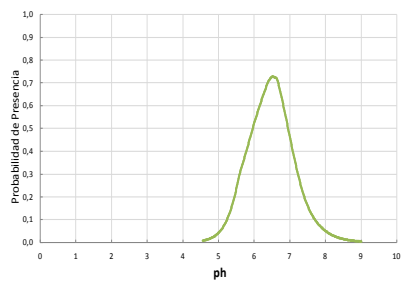
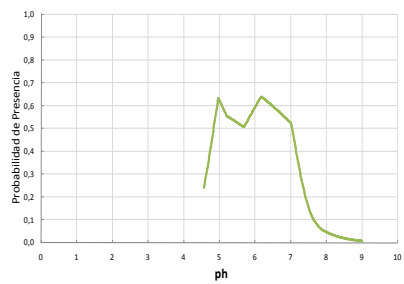
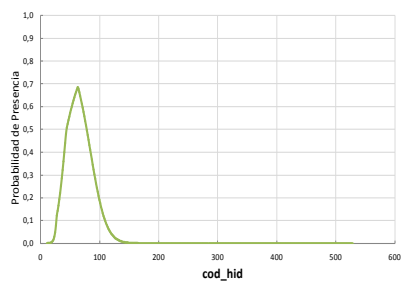
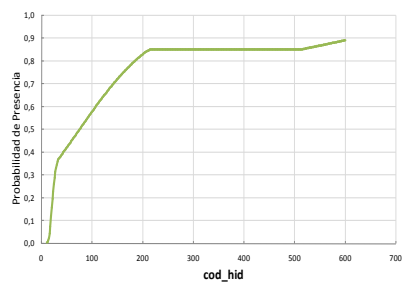
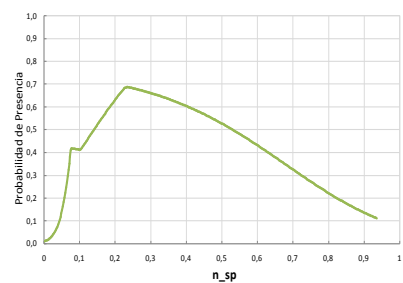
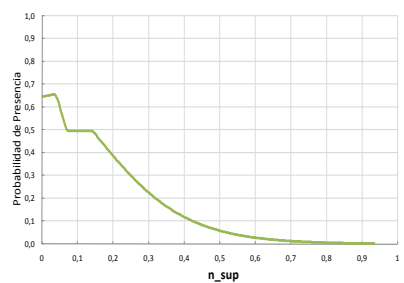
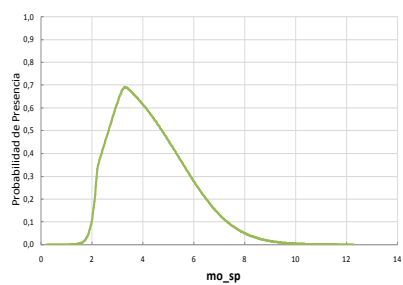
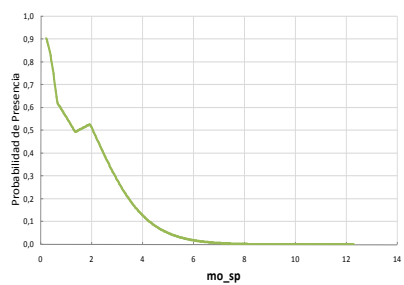
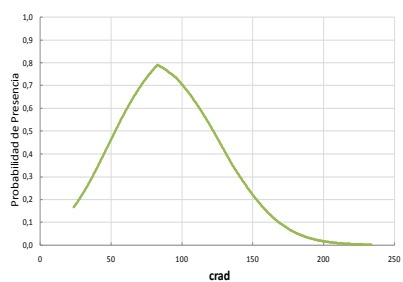
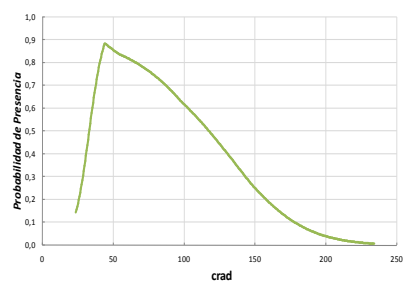


Figura A5.1. Curvas de respuestas de las variables ambientales para cada especie analizada. *Continuación*

Pinus pinea

Pinus sylvestris



Pinus halepensis

Pinus nigra

Pinus pinaster

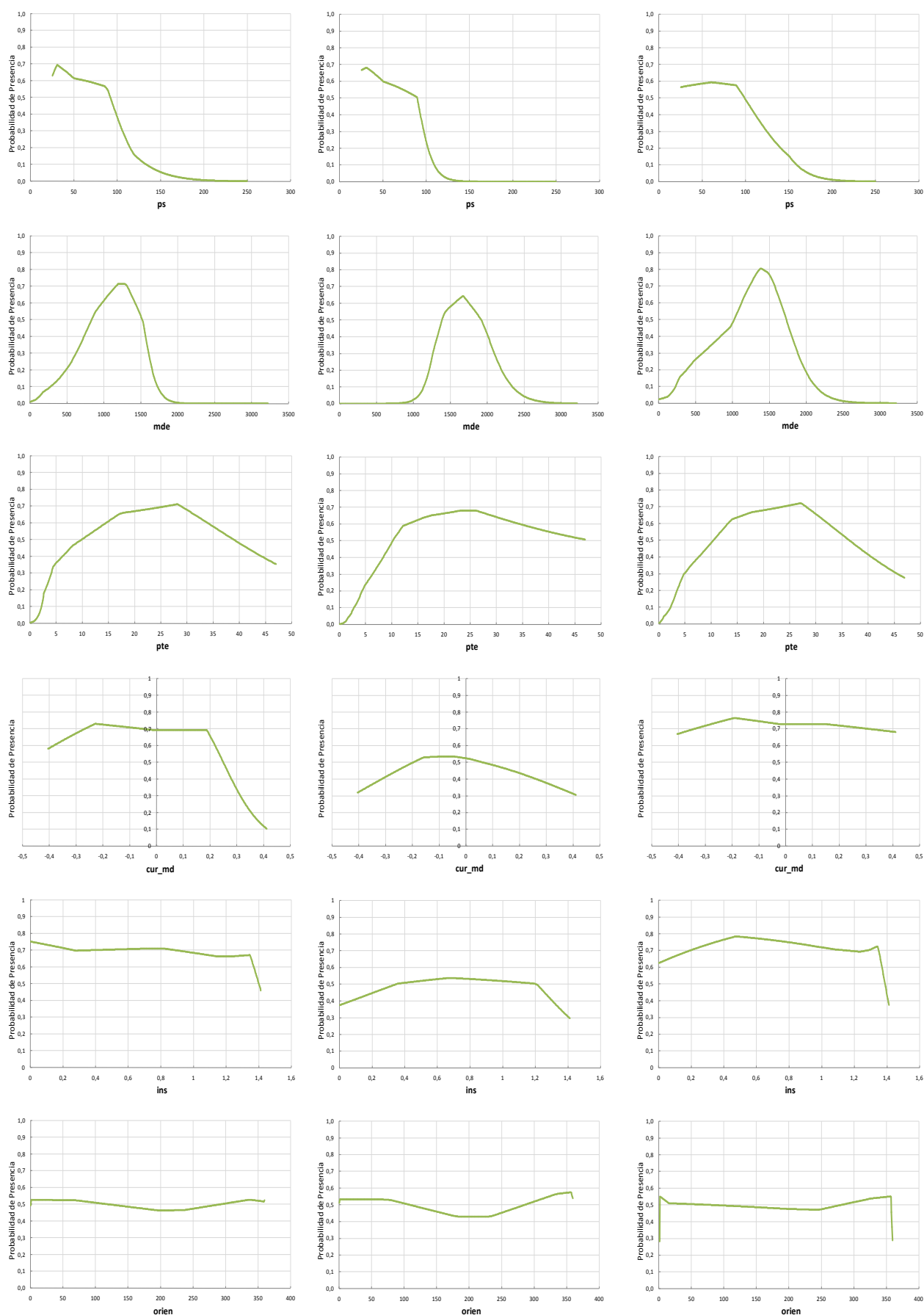
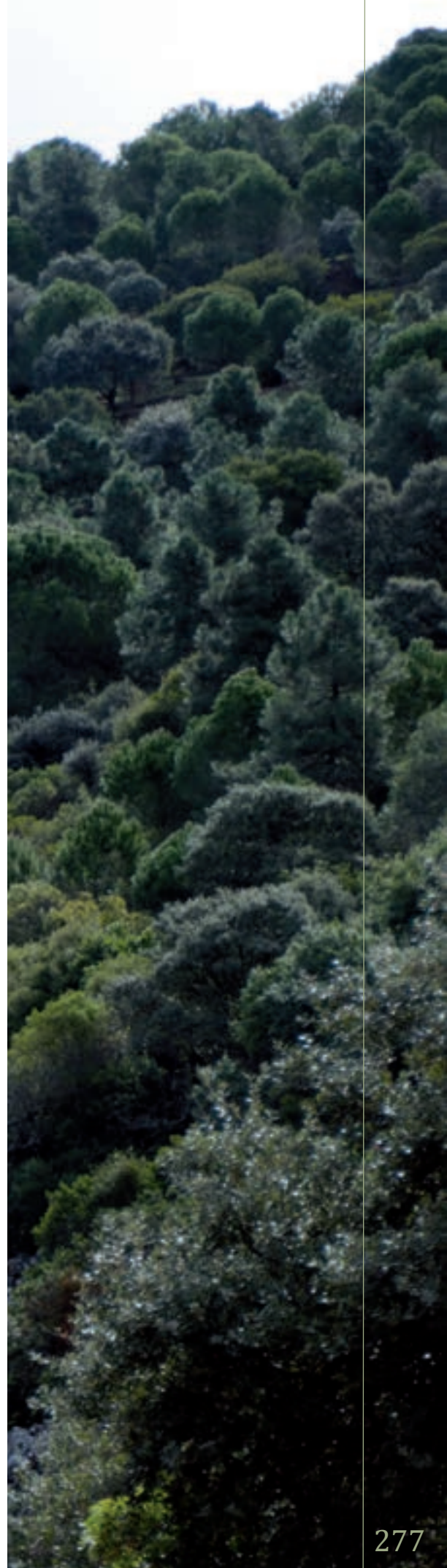
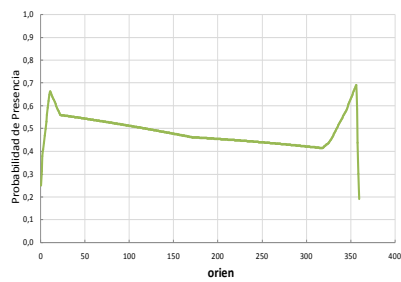
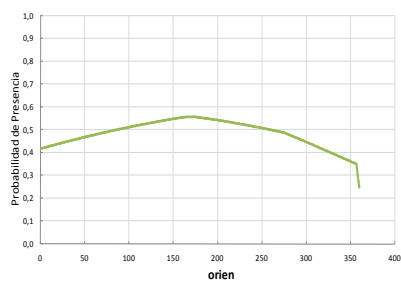
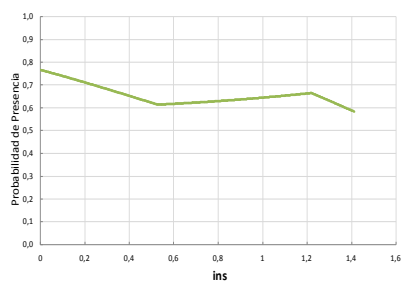
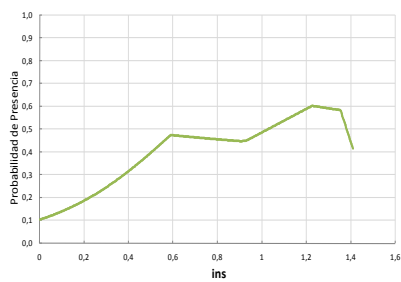
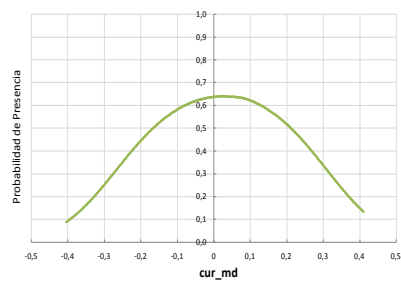
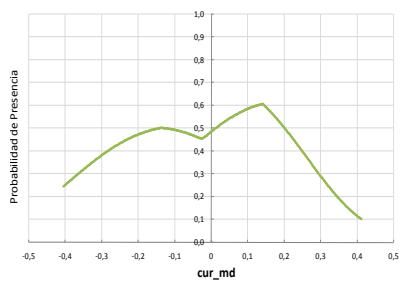
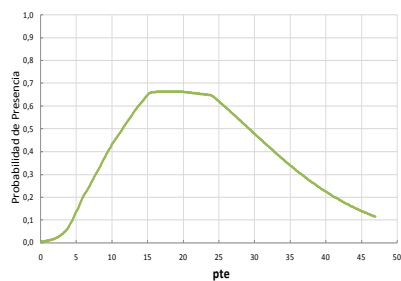
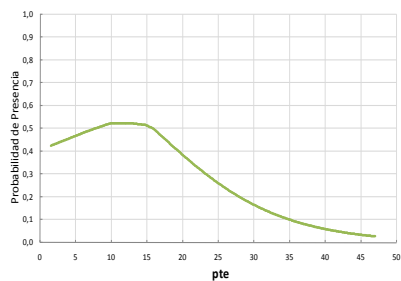
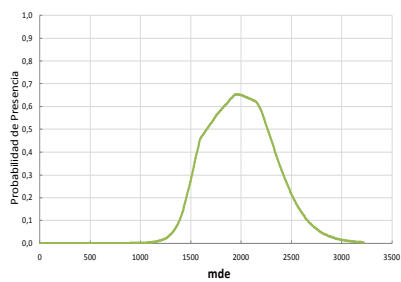
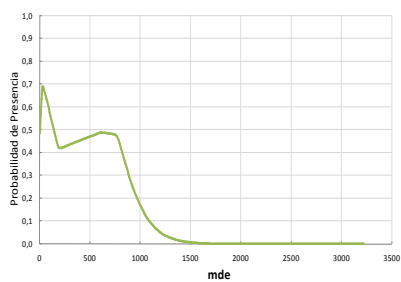
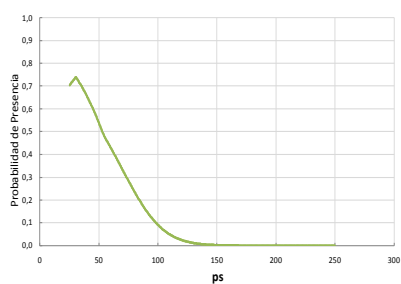
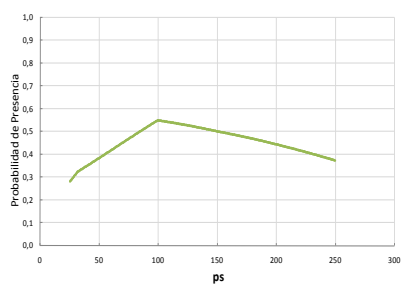


Figura A5.1. Curvas de respuestas de las variables ambientales para cada especie analizada. *Continuación*

Pinus pinea

Pinus sylvestris



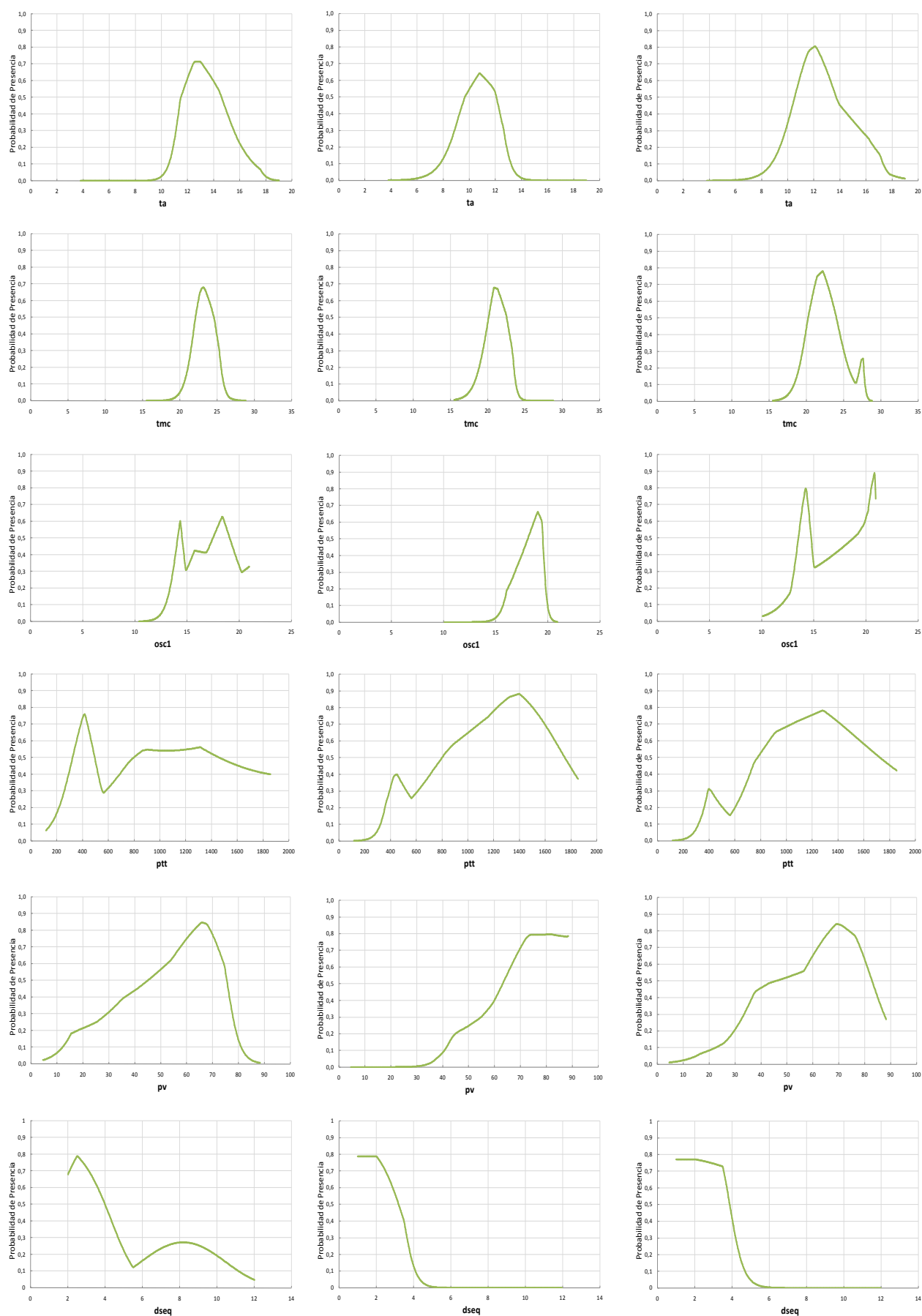
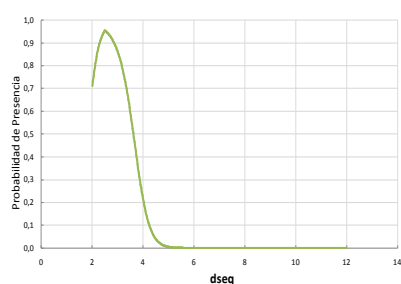
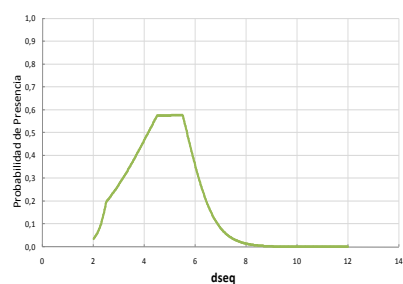
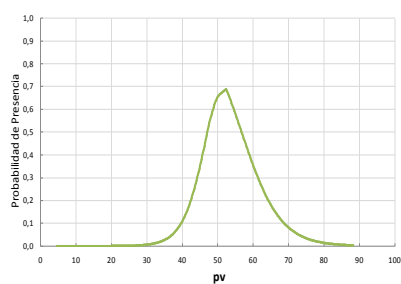
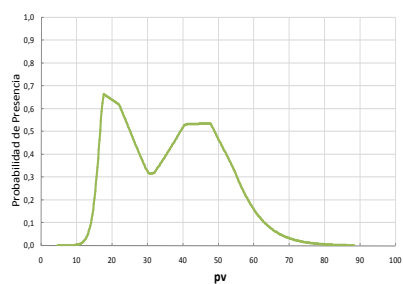
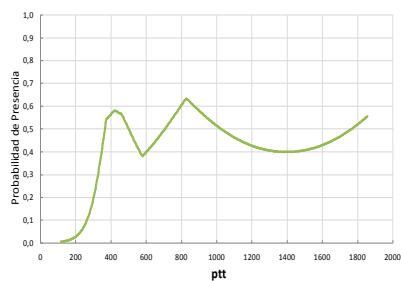
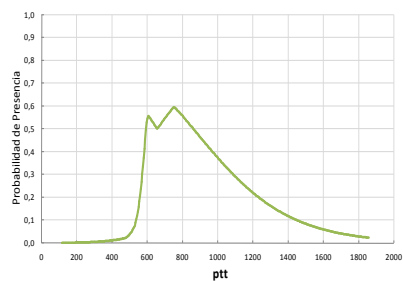
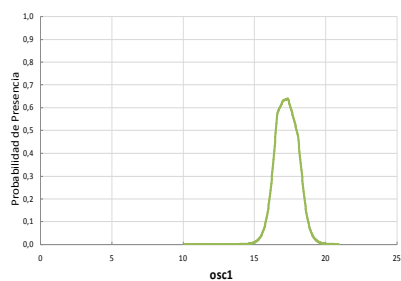
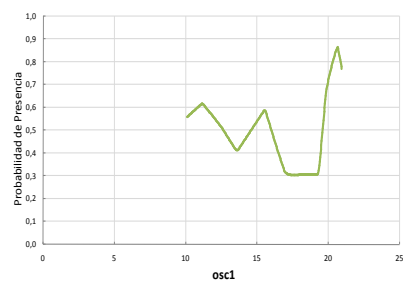
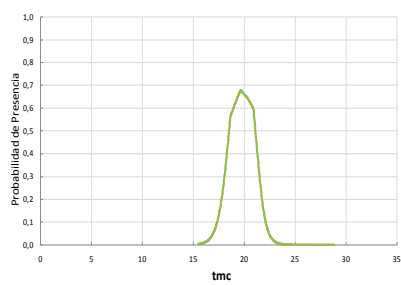
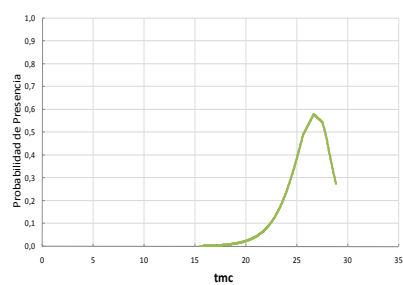
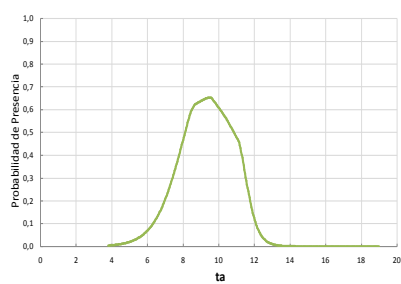
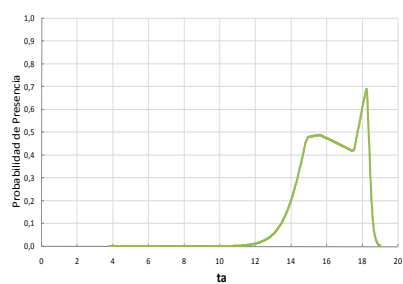
*Pinus halepensis**Pinus nigra**Pinus pinaster*

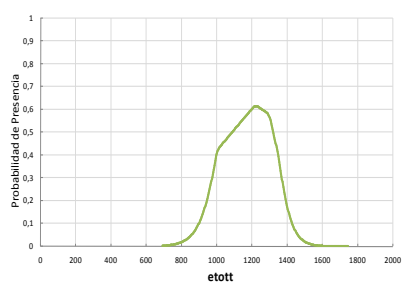
Figura A5.1. Curvas de respuestas de las variables ambientales para cada especie analizada. *Continuación*

Pinus pinea

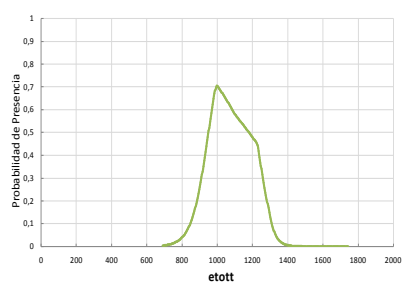
Pinus sylvestris



Pinus nigra



Pinus nigra



Pinus pinaster

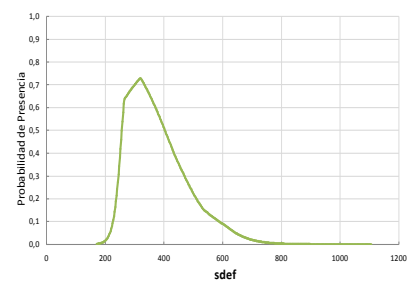
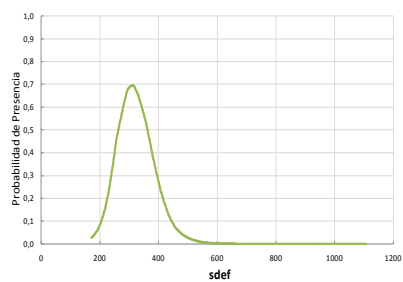
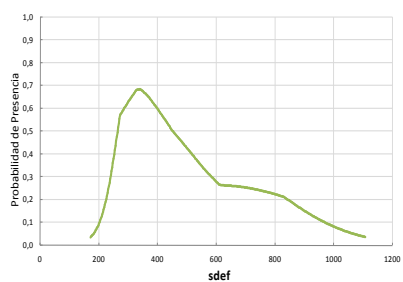
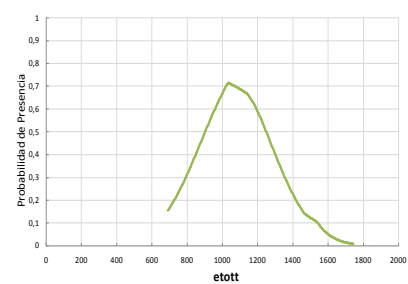
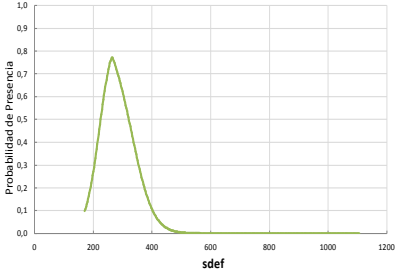
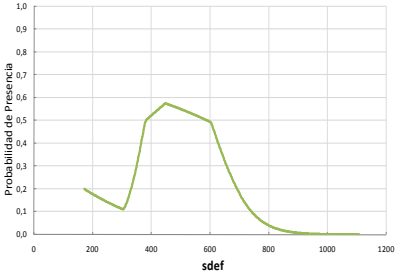
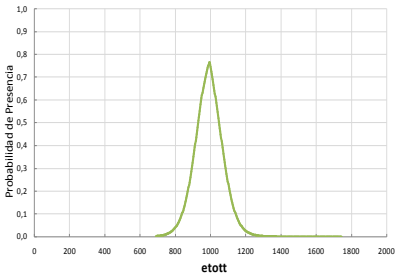
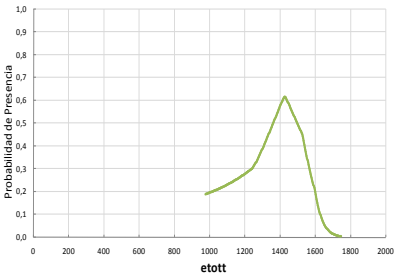


Figura A5.1. Curvas de respuestas de las variables ambientales para cada especie analizada. *Continuación*

Pinus pinea

Pinus sylvestris



La **ecuación (A5.1)** ayuda a interpretar el significado de las curvas de respuesta y su relación con la probabilidad de presencia.

$$PP(x,y) = Pp(Var1(x,y))*FP1 + Pp(Var2(x,y))*FP2 + ... + Pp(Varn(x,y))*FPn \quad (A5.1)$$

Donde:

- $PP(x,y)$ es la probabilidad de presencia de la especie en el punto x, y .
- $Pp(Var1(x,y))$ es la probabilidad que se obtiene de la curva de respuesta de la variable $Var1$, correspondiente al valor que adquiere $Var1$ en el punto x, y .
- $FP1$ es el factor de peso que le corresponde a la variable $Var1$, es decir, es la importancia de la variable $Var1$ en el desarrollo final de la especie.

La probabilidad que se obtiene de una curva de respuesta representa solo una fracción de la probabilidad de presencia final de la especie, dependiendo de la importancia que tiene la variable ambiental sobre el desarrollo de la especie.

Algunas curvas presentan formas peculiares (picos dobles, triples, asíntóticas ascendentes, etc.) que requieren una interpretación más detallada.

Las curvas que presentan más de un máximo se han analizado en mayor detalle cruzando los datos de distribución de la especie correspondiente con la variable objeto de análisis, obteniéndose mapas que se han clasificado para la variable específica según los intervalos en los que mostraba más de un valor máximo. Se ha analizado la distribución territorial de dichos intervalos de presencia obteniéndose para todas las especies la misma conclusión en base a la información de partida utilizada: las características territoriales (características edáficas, orientación, etc.) dan lugar a la aparición de varios máximos de presencia dentro de la misma gráfica, constituyendo, por tanto, ejemplos de la amplia valencia ecológica de estas especies para algunas de las variables ambientales consideradas.

Tomando como ejemplo el *Pinus pinea*, esta especie presenta ocho gráficas de distribución en las que aparecen varios máximos. Tras realizar el análisis por intervalos, se concluye que uno de los picos responde de forma sistemática a la localización de los pinares de la costa de Huelva (Doñana, Cartaya y hasta Ayamonte) y en ocasiones de la costa gaditana, mientras que otro máximo corresponde a los pinares de Sierra Morena. Se muestra a modo de ejemplo los intervalos para la oscilación térmica (**Figura A5.2**), así como la distribución de los datos en función de los distintos máximos:

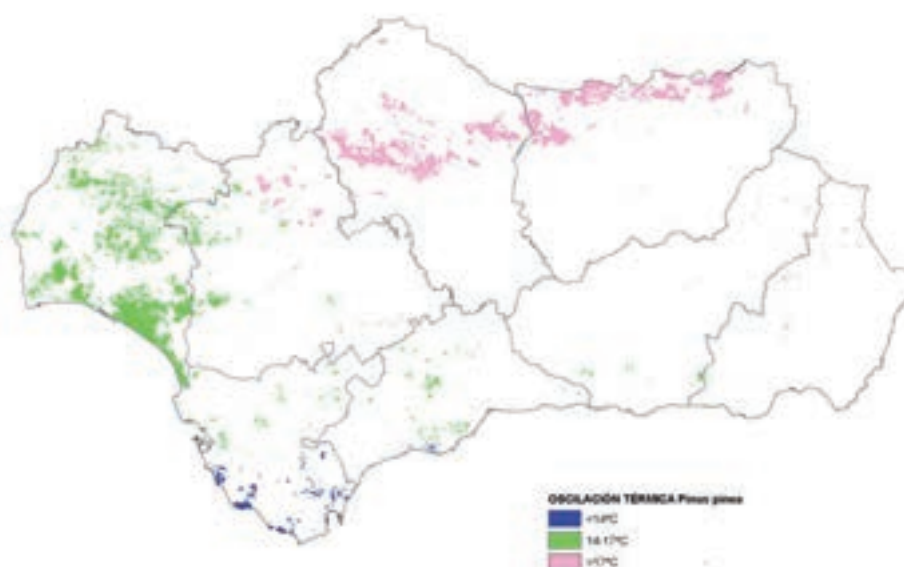


Figura A5.2. Oscilación térmica para *Pinus pinea*

En relación con las curvas que presentan valores asintóticos ascendentes (máximo de la curva coincide con la mayor probabilidad de presencia de la especie), se ha realizado un análisis de los umbrales máximos de estas las variables en Andalucía. Tras este análisis, se concluye que los valores máximos de las asíntotas coinciden con los máximos andaluces, deduciéndose que la valencia ecológica de las especies es más amplia que los valores alcanzados por las variables del biotopo en el territorio estudiado. En la **Figura A5.3** se presentan dos ejemplos: caliza activa en *Pinus pinaster* y arena en *Pinus pinea*.

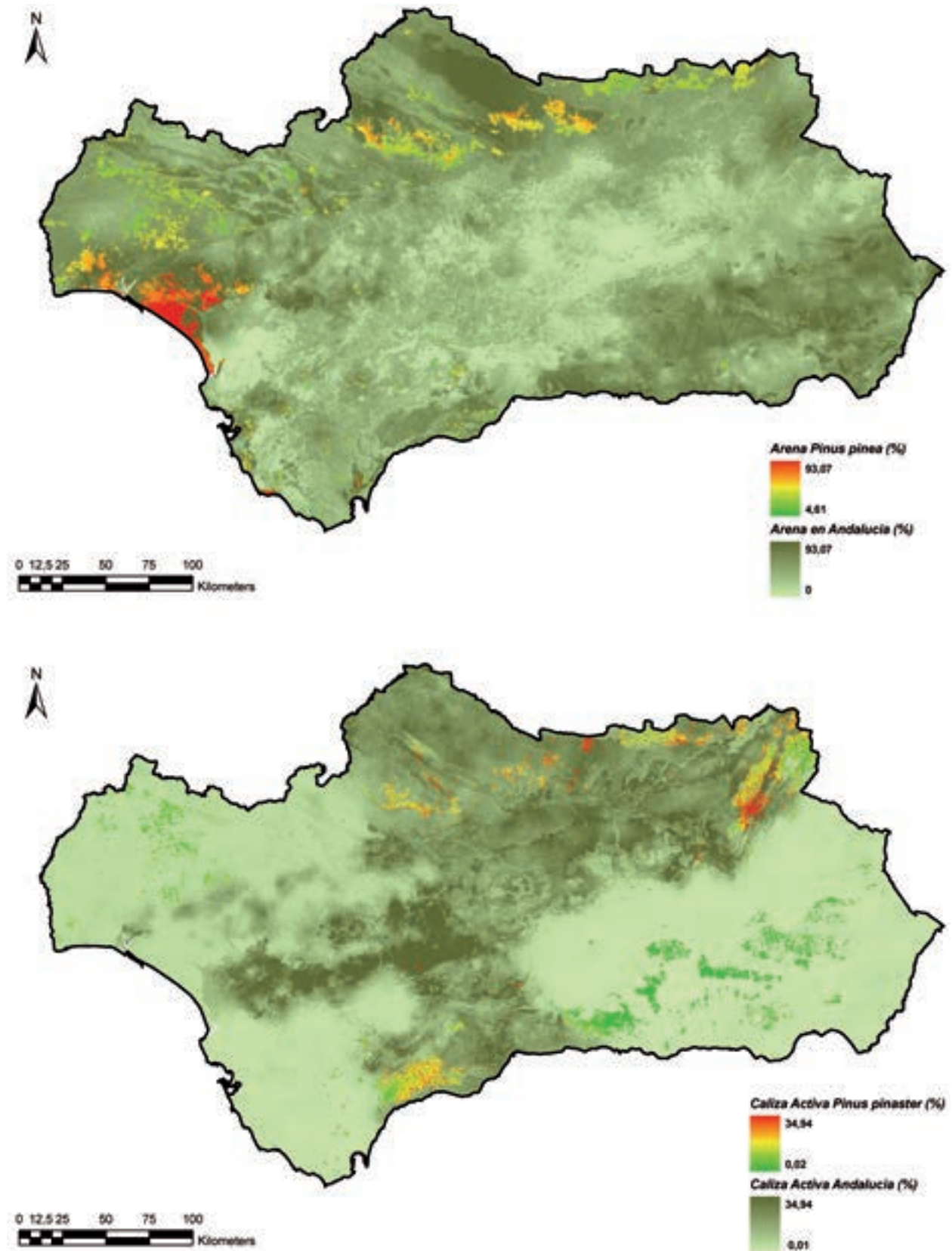


Figura A5.3. Umbrales máximos caliza activa y arena para *P. pinaster* y *P. pinea*, respectivamente

