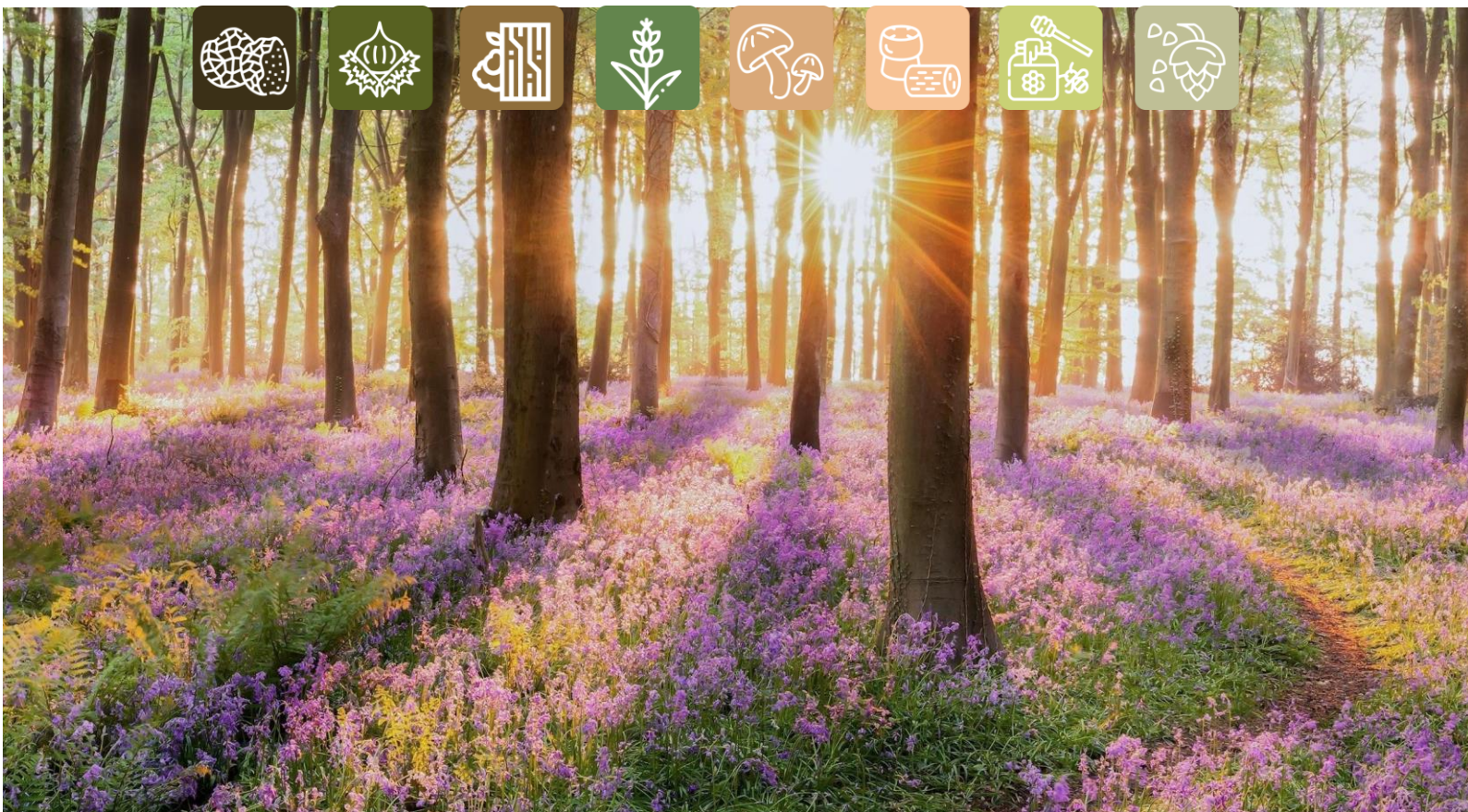




Informe de requerimientos y amenazas para el aprovechamiento de Productor Forestales No Madereros

Financiado por:



IMFOREST cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU.



Asociación
Española para
la Sostenibilidad
Forestal

Este trabajo ha sido realizado por Cesefor en el marco del proyecto IMFOREST – Impulso a la bioeconomía forestal a través del desarrollo, la innovación y la gestión sostenible de los recursos forestales no madereros, con la colaboración de los socios del proyecto. Acción A1 - Resultado R1.2.

Título del material: Informe de requerimientos y amenazas para el aprovechamiento de Productor Forestales No Madereros

Autoría: Javier de Dios Gracia. Fundación Cesefor.

Referencia a financiación: Imforest cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU.

Año: 2025

Este material se distribuye bajo la licencia CC BY 4.0. Para ver una copia de esta licencia, visita <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU



Índice

1. Introducción
2. Metodología.
3. Resultados y discusión
4. Glosario de acrónimos
5. Bibliografía.

1. Introducción

Los productos forestales no maderables (PFNM) desempeñan un papel fundamental en la bioeconomía y en el desarrollo rural de muchas regiones mediterráneas, aportando recursos con un elevado valor socioeconómico, cultural y ambiental (Martínez de Aragón et al., 2007; Martínez-Peña et al., 2012; Bonet et al., 2014). Entre los más relevantes se encuentran la resina, el corcho, la castaña, el piñón, las setas, la trufa y la bellota, cuya producción contribuye tanto a la diversificación de rentas en el medio rural como a la conservación de los ecosistemas forestales (Palahí et al., 2009; Calama et al., 2021; Mutke et al., 2017). Sin embargo, el cambio climático y otras presiones antrópicas amenazan su aprovechamiento, reduciendo la productividad potencial y comprometiendo la viabilidad futura de algunos de estos productos (San-Miguel-Ayanz et al., 2016; Bravo-Oviedo et al., 2014). En este contexto, disponer de información detallada sobre los requerimientos ecológicos de las especies y sobre las amenazas que condicionan su distribución resulta esencial para una gestión sostenible (De la Varga et al, 2013; Wang et al., 2024).

Con este propósito se enmarca el proyecto IMFOREST, y en particular la acción A1.1, “Determinación de la distribución potencial de los hábitats asociados a los PFNM”, cuyo objetivo es establecer una cartografía de referencia para los principales hábitats productores de PFNM en España. Entre los productos considerados se incluyen la castaña, la resina, el piñón ibérico, la bellota, el corcho, diversas setas de interés comercial y la trufa negra.

Para alcanzar este objetivo se han analizado las variables bioclimáticas y geológicas que determinan la distribución potencial de las especies productoras. En el caso de las especies arbóreas se han evaluado: *Castanea sativa* (castaña), *Pinus pinaster* (resina), *Pinus pinea* (piñón ibérico), *Quercus ilex* (bellota) y *Quercus suber* (corcho). Las especies productoras de setas incluidas han sido: *Amanita caesarea*, *Boletus aereus*, *Boletus edulis*, *Boletus pinophilus*, *Calocybe gambosa*, *Cantharellus cibarius*, *Hygrophorus limacinus*, *Lactarius deliciosus*, *Lactarius sanguifluus*, *Morchella* sp. y *Pleurotus eryngii*.

La cartografía resultante de la distribución potencial de estas especies ha sido incorporada al visor web del proyecto (<https://imforest.es>), empleando la herramienta FITOCLIM que permite proyectar la idoneidad de los hábitats bajo distintos escenarios climáticos. Esta base de información constituye un punto de partida para analizar los requerimientos ecológicos y las amenazas que condicionan el aprovechamiento de los PFNM en escenarios presentes y futuros.

En paralelo, los trabajos del grupo operativo MIKOGEST han desarrollado metodologías específicas para los productos micológicos, aplicando tanto modelos estadísticos de tipo hurdle, adecuados para datos con gran proporción de ceros (parcelas o años sin fructificación), como algoritmos de aprendizaje automático Random Forest, capaces de capturar relaciones no lineales entre predictores y producción. Ambos enfoques han confirmado la importancia de variables climáticas —en especial la precipitación acumulada en septiembre y noviembre y las temperaturas medias estivales y otoñales— junto con variables de masa forestal (área basimétrica, estructura y composición del rodal) y topográficas (altitud, pendiente, orientación), como factores determinantes de la productividad micológica (De la Varga et al., 2013; Martínez de Aragón et al. 2007; Martínez-Peña et al., 2012). Los resultados de estos modelos han sido también incorporados al visor IMFOREST, lo que permite disponer en una única plataforma de la información tanto de especies arbóreas como de especies micológicas de interés.

La combinación de estas aproximaciones metodológicas —modelos fitoclimáticos para especies arbóreas y modelos estadísticos y de machine learning para los productos micológicos— ofrece un marco sólido para comprender las oportunidades y riesgos asociados al aprovechamiento de los PFNM y para orientar estrategias de gestión adaptativa en un contexto de cambio climático.

2. Metodología

FITOCLIM es una herramienta para evaluar los efectos del cambio climático sobre las principales formaciones vegetales naturales de Castilla y León basadas en modelos de análisis fitoclimático multivariable (Allué Andrade, 1990; García López & Allué, 2003). Estos modelos han sido calibrados para Castilla y León. En el caso de las capas

mostradas en el visor del IMFOREST se han usado los modelos de *Cubiertas Arbóreas Forestales (CAF)* para representar la distribución potencial de las especies arbóreas.

La información climática de partida (temperaturas y precipitaciones medias mensuales) se obtiene en FITOCLIM por distintos procedimientos en función de que trabajemos con el periodo observado (1950-2019) o con el futuro (2006 a 2100):

- Periodo observado: A través de los datos meteorológicos diarios observados procedentes de estaciones de la red oficial de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), con datos de 1950-2019. Se puede obtener información más detallada en el visor de FITOCLIM en el documento “Base de datos de T y P mensuales en forma de grid de alta resolución basado en observaciones históricas (Universidad de Cantabria)”.
- Periodo futuro: A través de datos diarios proyectados de temperatura y precipitación calculados para los escenarios de cambio climático RCP45 y RCP85 (según el 5º informe del IPCC- Grupo intergubernamental de expertos de Cambio Climático-) hasta el año 2100. Los escenarios de cambio climático dependen de la emisión a nivel mundial de gases de efecto invernadero y por lo tanto dependen de la aplicación con éxito de medidas de reducción de dicha emisión o de políticas de fijación de CO₂. Se puede encontrar información más detallada en el documento disponible en el visor de FITOCLIM: “Proyecciones regionales de cambio climático calibradas a alta resolución (Bases de datos de T y P) para los escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5 del 5º IPCC (Universidad de Cantabria)”.

A partir de los datos de temperatura y precipitación mensuales calculados para medias de 30 años y de los correspondientes climodiagramas de Bagnouls y Gaussen (1953) adaptados (Figura 1), los modelos de FITOCLIM calculan para cada estación un total de 12 factores con significado fitoclimático relevante (Tabla 1). Estos factores fitoclimáticos constituyen la información de entrada que alimenta a los modelos CAF, que se muestran en el visor del IMFOREST, y a los modelos de *Fisionomías Vegetales*

Naturales (FVN), que describen la estructura potencial de la vegetación según los factores fitoclimáticos.

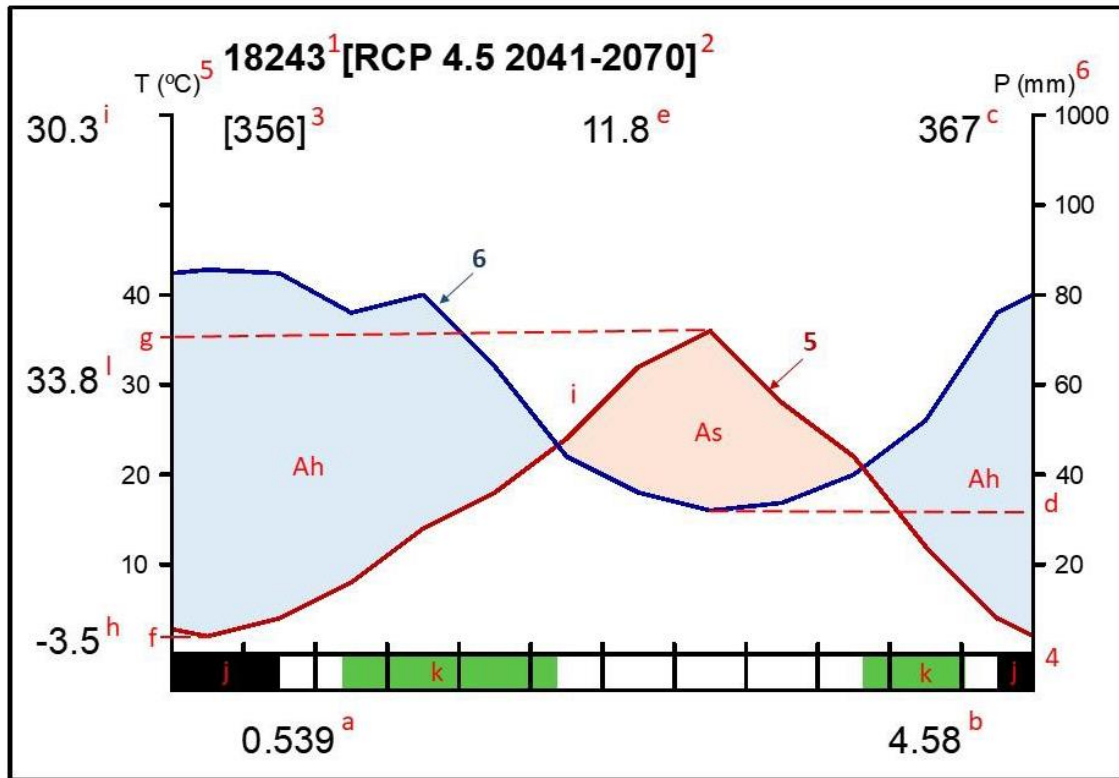


Figura 1. Factores fitoclimáticos a partir de un climodiagrama tipo Walter-Lieth. Las letras en rojo de la a “a” la “l” identifican los valores de los 12 factores, Ah es el área húmeda del climodiagrama y As el área seca. Los n° hacen referencia a otros datos y estructura: 1-n° de cuadrícula, 2-periodo, 3 altitud, 4 eje de abscisas con los 12 meses del año, 5-eje de ordenadas con escala de temperaturas, 6-eje de ordenadas con escala de precipitaciones. Adaptada de Allué Camacho & García López, 2024.

Tabla 1. Factores fitoclimáticos. Adaptada de Allué Camacho & García López, 2024.

ABREVIATURA	VARIABLE	UNIDAD
K	Intensidad de la aridez. Se calcula por el cociente As/Ah , siendo Ah el área húmeda de climodiagrama (curva de P_i por encima de la de T_i , es decir $2T_i < P_i$) y As el área seca del climodiagrama (curva de P_i por debajo de la de T_i , es decir $2T_i > P_i$).	-
A	Duración de la aridez, en el sentido de GAUSSEN, es decir, el número de meses en que la curva de T_i se sitúa por encima de la de P_i , es decir cuando $2T_i > P_i$.	meses
P	Precipitación anual total	mm
PE	Precipitación estival mínima (Junio, Julio, Agosto o Septiembre)	mm
TMF	Temperatura media mensual más baja	°C

ABREVIATURA	VARIABLE	UNIDAD
T	Temperatura media anual	°C
TMC	Temperatura media mensual más alta	°C
TMMF	Temperatura media de las mínimas del mes de temperatura media más baja	°C
TMMC	Temperatura media de las máximas del mes de temperatura media más alta	°C
HS	Helada segura. Calculada como nº de meses en que $T_i \leq 4^{\circ}\text{C}$	meses
PV	Periodo de actividad vegetal libre, calculada como el número de meses en que $T_i \geq 7,5^{\circ}\text{C}$ excluidos los periodos con $A > 0$	meses
OSC	Oscilación térmica. Se calcula como TMC - TMMF	°C

Los modelos fitoclimáticos han sido empleados para calcular los mapas de idoneidad y la distribución potencial según los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5, 2014) para *Castanea sativa*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*, *Quercus ilex* y *Quercus suber*. Estos escenarios describen trayectorias contrastadas de concentración de gases de efecto invernadero y permiten proyectar la evolución de las variables climáticas hasta finales de siglo, sirviendo como referencia para evaluar la respuesta potencial de las especies ante condiciones de cambio climático.

Con la publicación del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6, 2021), los RCP han sido reemplazados por los SSP (Shared Socioeconomic Pathways), que incorporan además supuestos sobre la evolución demográfica, económica y tecnológica global. No obstante, ambos marcos son compatibles: el escenario RCP4.5 se corresponde funcionalmente con el SSP2–4.5, mientras que RCP8.5 es equivalente al SSP5–8.5, lo que garantiza la continuidad metodológica entre los modelos desarrollados bajo los informes IPCC5 e IPCC6.

En consecuencia, los resultados generados mediante los modelos CAF y FVN basados en los escenarios RCP pueden interpretarse de manera coherente con las proyecciones actuales del IPCC6, y su integración en el visor del proyecto IMFOREST permite mantener la comparabilidad entre estudios fitoclimáticos realizados bajo distintos marcos de referencia.

Distinción entre idoneidad y producción

Los modelos empleados en este informe distinguen entre idoneidad fitoclimática y producción o potencial productivo, conceptos complementarios pero no equivalentes.

La idoneidad fitoclimática hace referencia a la aptitud potencial del territorio para albergar una determinada especie o formación vegetal en función de las condiciones climáticas y fitoclimáticas (temperatura, precipitación, aridez, termicidad, etc.), tal como se representa mediante los modelos CAF (Cubiertas Arbóreas Forestales) y FVN (Fisionomías Vegetales Naturales) (Allué Andrade, 1990; García López & Allué, 2003).

Estos modelos permiten delimitar el espacio climático potencialmente compatible con cada especie bajo distintos escenarios de cambio climático (RCP/SSP).

Por su parte, la producción o potencial productivo se refiere a la capacidad real de aprovechamiento de los productos forestales no maderables (PFNM), modulada por factores ecológicos, estructurales y de gestión que no dependen exclusivamente del clima. Entre estos factores se incluyen las características edáficas y litológicas, la estructura de la masa forestal (densidad, área basimétrica, mezcla de especies), la fisiología de las especies productoras, la presión de plagas y patógenos, y las prácticas selvícolas aplicadas.

De este modo, los mapas de idoneidad proporcionan una visión del espacio potencial favorable desde el punto de vista bioclimático, mientras que los modelos de producción (como los de aprendizaje automático y regresión desarrollados en MIKOGEST) estiman la respuesta productiva esperada bajo condiciones ecológicas y de gestión concretas. Ambos enfoques resultan complementarios para comprender los requerimientos y las amenazas que condicionan el aprovechamiento sostenible de los PFNM en Castilla y León.

Metodología complementaria de MIKOGEST

Para los productos micológicos, el Grupo Operativo **MIKOGEST** desarrolló modelos predictivos específicos a nivel de especie con el fin de estimar la productividad potencial y evaluar la vulnerabilidad frente a la variabilidad climática. Se aplicaron dos enfoques metodológicos complementarios:

- **Modelos estadísticos de tipo hurdle**, adecuados para datos con elevada proporción de ceros (parcelas o años sin fructificación). Estos modelos trabajan en dos etapas: (i) un submodelo de ocurrencia que predice la probabilidad de fructificación y (ii) un submodelo de abundancia que estima la cantidad producida en los casos en que se da fructificación.
- **Algoritmos de aprendizaje automático Random Forest**, capaces de capturar relaciones no lineales y complejas entre predictores ambientales y productivos,



mejorando la capacidad de generalización de los modelos y reduciendo el riesgo de sobreajuste.

Ambos enfoques se calibraron con **datos de fructificación obtenidos en parcelas permanentes de Castilla y León y de otras regiones de España**, lo que proporciona una base empírica sólida y representativa de la variabilidad interanual y espacial de la producción.

Las variables predictoras incorporadas incluyen:

De masa forestal: área basimétrica (AB), densidad del rodal, composición de especies hospedadoras.

Topográficas: altitud, pendiente y orientación.

Climáticas estacionales: precipitaciones acumuladas y temperaturas medias mensuales, con especial relevancia en **septiembre y noviembre**, meses críticos para la fructificación de géneros como *Boletus* y *Lactarius*.

De hábitat: tipo de bosque, condiciones edáficas y características locales del suelo.

Estos modelos han permitido identificar los factores clave que determinan la fructificación y predecir la potencialidad productiva de especies de alto valor comercial como *Boletus edulis*, *B. aereus*, *B. pinophilus*, *Lactarius deliciosus* y *Cantharellus cibarius*. Además, los resultados se han incorporado al **visor del proyecto IMFOREST**, facilitando su consulta integrada junto con la cartografía de distribución potencial de especies arbóreas productoras de PFNM.

La combinación de modelos hurdle y Random Forest constituye una herramienta robusta y complementaria: los primeros ofrecen interpretabilidad estadística y los segundos mayor capacidad predictiva, lo que permite avanzar hacia una gestión forestal adaptativa orientada al aprovechamiento sostenible de los recursos micológicos.

3. Resultados y discusión

a. Castaña (*Castanea sativa*)

i. Requerimientos ecológicos

El castaño se asocia a climas húmedos y templados, con suelos profundos y ácidos, bien drenados y ricos en nutrientes, siendo sensible a la sequía estival. Su óptimo en la Península Ibérica se da en áreas montanas con precipitaciones anuales superiores a 800–1000 mm (Allué Andrade, 1990). Además, en muchas localizaciones su presencia está condicionada por aportes de agua freática, lo que añade complejidad a la caracterización de sus requerimientos. Su distribución actual en el noroeste peninsular refleja tanto su ecología natural como la influencia de repoblaciones históricas y manejo humano (Mitreveli et al., 2023).

ii. Amenazas por el cambio climático

Bajo escenarios de cambio climático, el castaño muestra una **reducción progresiva de superficie compatible en Castilla y León**, primero discreta entre los periodos 1950–1979 y 1990–2019, y posteriormente más acusada en las proyecciones de futuro. En el escenario más desfavorable (RCP 8.5), la superficie podría reducirse hasta la mitad en el horizonte 2041–2070 respecto al periodo de referencia. Las **idoneidades medias** también muestran un descenso moderado, con un leve repunte en escenarios más cálidos debido a un aumento de la termicidad en ciertas áreas.

Las principales amenazas derivadas de esta situación son:

- **Abióticas:** sequías recurrentes y aumento de temperaturas pueden reducir la viabilidad de los castaños (Camisón et al., 2019).
- **Bióticas:** enfermedades como la tinta (*Phytophthora cinnamomi*) y el chancro (*Cryphonectria parasitica*) constituyen sus principales amenazas (Robin & Marchand, 2022).

iii. Hábitat productor: Castaños

El castaño encaja principalmente en el subtipo fisionómico VI(IV)2 nemoromediterráneo subtípico, aunque según condiciones locales y proyecciones climáticas puede aparecer también en VI(IV)1 y en transición hacia IV(VI)1. En la tabla siguiente (Tabla 2) se muestran los valores máximos y mínimos de los 12 factores del modelo de fisionomías vegetales (modelo FVN) para los subtipos en que aparece la especie.

Tabla 2. Ámbitos factoriales formados por los valores extremos de los 12 factores fitoclimáticos del modelo de fisionomías vegetales de Carmen Allué para los subtipos fisionómicos que caracterizan la distribución del castaño. Donde K=intensidad de la aridez, A=duración de la aridez (meses), P=precipitación anual total (mm), PE=precipitación estival mínima (mm), T=temperatura media anual (°C), TMF=temperatura media mensual más baja (°C), TMC=temperatura media mensual más alta (°C), TMMF=temperatura media de las mínimas del mes de temperatura media más baja (°C), TMMC=temperatura media de las máximas del mes de temperatura media más alta (°C), HS=helada segura (meses), PV=periodo de actividad vegetal libre (meses) y OSC=oscilación térmica (°C). Información más detallada sobre el cálculo de estos factores puede encontrarse en la Tabla 1.

SU BTI PO	LÍM ITE S	K	A	P	PE	T	TM F	TM C	TMM F	TMM C	H S	PV	OS C
IV(VI) 1	Má x.	15,1 8	7,1 9	110 9	30	15, 3	6,5	26, 7	0	37	3, 1	6,5	22, 1
	Mín .	0,72	3	224	0	9,3	2,1	18, 3	-4,2	25,3	0	2,2	13, 4
VI(I V) 1	Má x.	5,71	2,9 9	725	39	14, 9	4,9	26, 1	2,5	37,3	4, 9	7,8	22, 7

	Mín	0,01	1,2	321	4	7,3	-0,5	16	-5,4	23,5	0	3,2	13,2
VI(I V) 2	Má x.	1,4	2,9	201	40	14	4,9	25,2	2,6	35,2	4,9	7,6	21,8
	Mín	0,02	1,2	726	2	6,6	-0,9	14,8	-5,4	21,9	0	2,5	12

- Dificultades de caracterización:** La caracterización fitoclimática del castaño y de los castañares presenta notables dificultades, ya que con frecuencia está vinculada a localizaciones con aportes de agua freática. Además, una parte de sus localizaciones deriva de la expansión realizada por el ser humano fuera de su área natural de distribución, así como de su mantenimiento mediante riegos, desbroces de sotobosque o eliminación de especies arbóreas competidoras. A ello se suman las limitaciones edáficas y litológicas, dado que *Castanea sativa* es una especie marcadamente acidófila que evita suelos calizos o con pH elevados. Por ello, la incorporación de variables edáficas (pH, textura, contenido en carbonatos) y litológicas en los modelos de distribución permitiría mejorar la interpretación de las discrepancias entre la idoneidad climática proyectada y la distribución real de la especie.
- Evolución observada:** en la parte occidental de Castilla y León (El Bierzo, Sierra de Francia, Sierra de Béjar, Sierra de la Culebra, Robleda-Cervantes), los castañares muestran un ligero descenso de superficie e idoneidad en el periodo 1990–2019 respecto al de 1950–1979, aunque de manera poco significativa en términos generales.
- Proyecciones futuras:** los modelos señalan complicaciones crecientes, con poblaciones que podrían quedar fuera de rango o con idoneidades muy reducidas, comprometiendo su competitividad. En el escenario RCP 8.5, León,

Palencia y Burgos conservarían mejores condiciones para los castaños, mientras que Salamanca y Zamora experimentarían descensos notables en su distribución debido al incremento de la aridez.

b. Resina (*Pinus pinaster*)

i. Requerimientos ecológicos

El pino negral o resinero se desarrolla principalmente en los subtipos fitoclimáticos nemoromediterráneos (VI(IV)1 y VI(IV)2) y mediterráneos (IV3, IV4). Se asocia preferentemente a suelos ácidos y profundos, con buena disponibilidad hídrica en la estación de crecimiento, lo que condiciona en gran medida su distribución natural (San-Miguel-Ayanz et al., 2016). Presenta una gran plasticidad ecológica, aunque sus masas más productivas se desarrollan en regiones con precipitaciones anuales superiores a 600 mm y veranos relativamente suaves.

La resina constituye una defensa química natural frente a insectos y patógenos, siendo su producción modulada por la edad del árbol, las características edáficas y, en particular, las condiciones climáticas (Moura et al., 2025).

ii. Amenazas por el cambio climático

Aunque a escala de Castilla y León no se observan grandes cambios en la superficie potencialmente compatible, sí aparecen variaciones en la idoneidad del territorio para la especie. Las principales amenazas son:

- **Migración hacia subtipos mediterráneos más secos (IV3)** en escenarios futuros, con precipitaciones en torno a 350 mm y sequías prolongadas de hasta 4 meses (Allué Camacho & García López, 2023).
- **Pérdida de idoneidad** en zonas emblemáticas como la Tierra de Pinares (Segovia, Valladolid, Ávila), debido al aumento de la termoxericidad.

- **Competencia intraespecífica:** masas muy densas disminuyen la disponibilidad hídrica por árbol y, con ello, la producción resinera (Allué Camacho et al., 1995).
- **Sobreexplotación y abandono:** la falta de tratamientos selvícolas adecuados reduce la vitalidad y resistencia de los pinares.

iii. Hábitat productor: Pinares de pino negral

El hábitat productor principal de resina lo constituyen los pinares de *Pinus pinaster*, que encajan en subtipos nemoromediterráneos (VI(IV)1 y VI(IV)2) y mediterráneos (IV3 y IV4), con tendencia a desplazarse hacia subtipos mediterráneos más secos en escenarios de cambio climático. Los valores máximos y mínimos de los factores fitoclimáticos de estos subtipos pueden verse en la siguiente tabla (Tabla 3).

Tabla 3. Ámbitos factoriales formados por los valores extremos de los 12 factores fitoclimáticos del modelo de fisionomías vegetales de Carmen Allué para los subtipos fisionómicos que caracterizan la distribución del pino negral. Donde K=intensidad de la aridez, A=duración de la aridez (meses), P=precipitación anual total (mm), PE=precipitación estival mínima (mm), T=temperatura media anual (°C), TMF=temperatura media mensual más baja (°C), TMC=temperatura media mensual más alta (°C), TMMF=temperatura media de las mínimas del mes de temperatura media más baja (°C), TMMC=temperatura media de las máximas del mes de temperatura media más alta (°C), HS=helada segura (meses), PV=periodo de actividad vegetal libre (meses) y OSC=oscilación térmica (°C). Información más detallada sobre el cálculo de estos factores puede encontrarse en la Tabla 1.

SUBTI PO	LÍMIT ES	K	A	P	P E	T	TM F	TM C	TMM F	TMM C	H S	P V	OS C
IV 3	Máx.	7,0 0	6,0 8	500	3 1	18, 3	9,4	29, 2	6,6	38,2	2, 8	9	21, 4
	Mín.	1,3 1	3	305	0	10, 8	1,7	20, 4	0,1	26,9	0	3, 2	13, 7
IV 4	Máx.	5,4 0	5,2 1	158 3	2 7	18, 2	9,4	29, 3	7,4	38,6	2, 7	9	22, 2
	Mín.	0,5 7	3	501	0	10, 2	1,9	18, 5	0,1	24,2	0	3, 3	11, 6
VI(IV) 1	Máx.	5,7 2	2,9 9	725	3 9	14, 9	4,9	26, 1	2,5	37,3	4, 9	7, 8	22, 7
	Mín.	0,0 1	1,2 5	321	4	7,3	- 0,5	16	-5,4	23,5	0	3, 2	13, 2
VI(IV) 2	Máx.	1,4	2,9 9	201 6	4 0	14	4,9	25, 2	2,6	35,2	4, 9	7, 6	21, 8

SUBTI PO	LÍMIT ES	K	A	P	P E	T	TM F	TM C	TMM F	TMM C	H S	P V	OS C
	Mín.	0,0 2	1,2 5	726	2	6,6	- 0,9	14, 8	-5,4	21,9	0	2, 5	12

- **Distribución histórica:** en 1950–1979 los pinares mostraban idoneidades moderadas-altas en la Tierra de Pinares (Segovia–Ávila–Valladolid), Burgos (Oña-Caderechas), Soria (Tierras de Almazán), Montes de León y valle del Tiétar (Fig. 2)

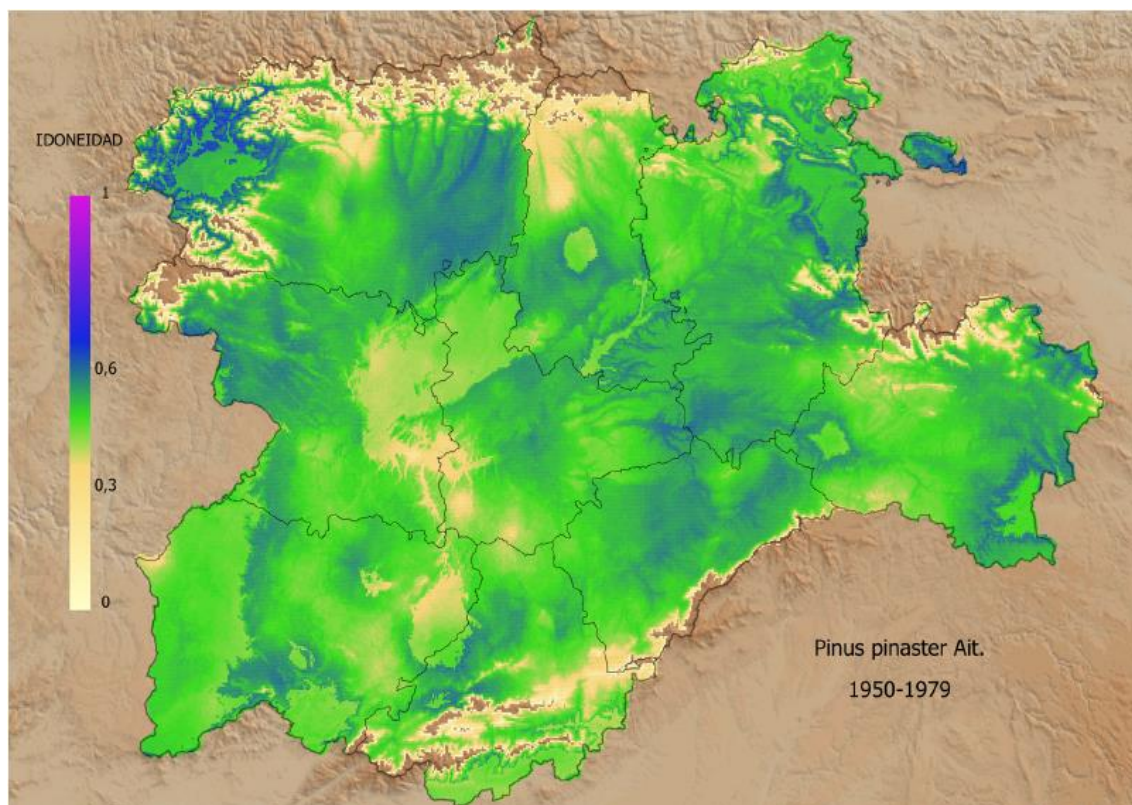


Fig. 2. Áreas de idoneidad (compatibilidad fitoclimática) para pinares de *P. pinaster* de Castilla y León en el periodo 1950-1979. Adaptado de Allué Camacho & García López, 2024.

- **Evolución reciente:** entre 1990–2019 la idoneidad cae en la cuenca central, aunque se mantiene en el norte y este de Castilla y León (Fig. 3).

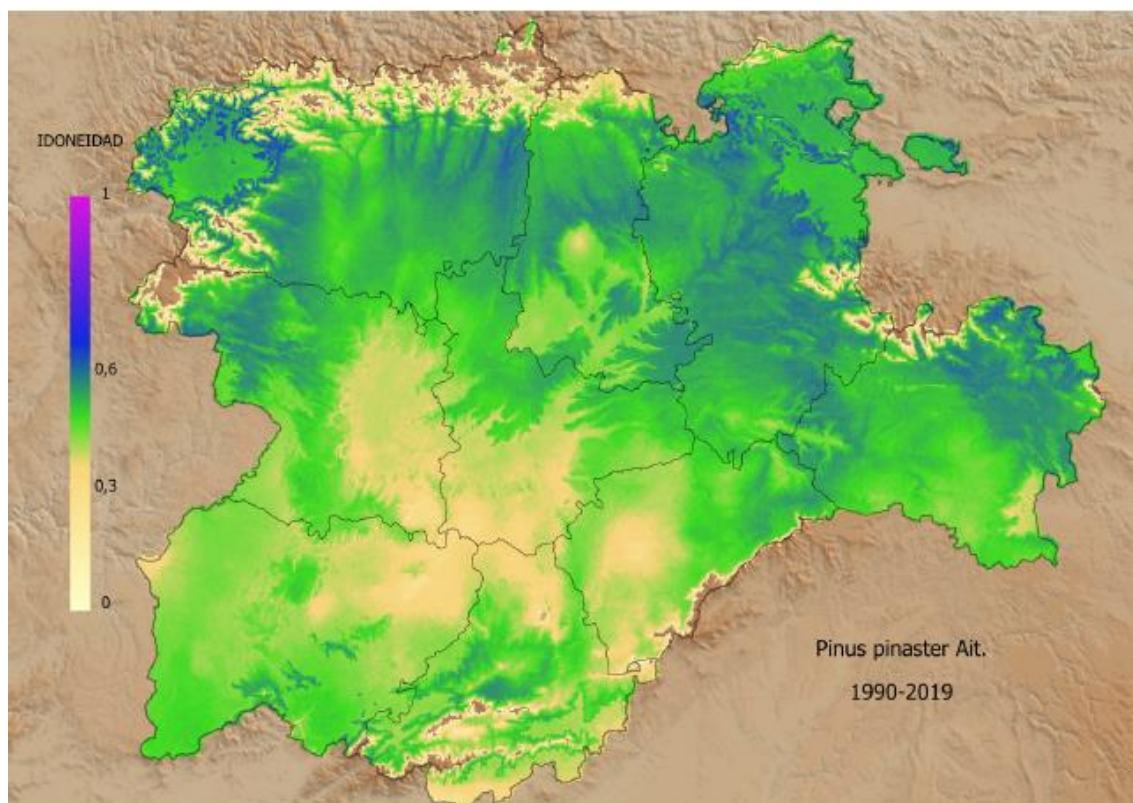


Fig. 3. Áreas de idoneidad (compatibilidad fitoclimática) para pinares de *P. pinaster* de Castilla y León en el periodo 1990-2019. Adaptado de Allué Camacho & García López, 2024.

- **Proyecciones futuras:** bajo escenarios desfavorables (Fig. 4), la especie queda vinculada mayoritariamente al subtipo IV3 (mediterráneo seco), lo que compromete seriamente su productividad resinera (Allué Camacho y García López, 2023).

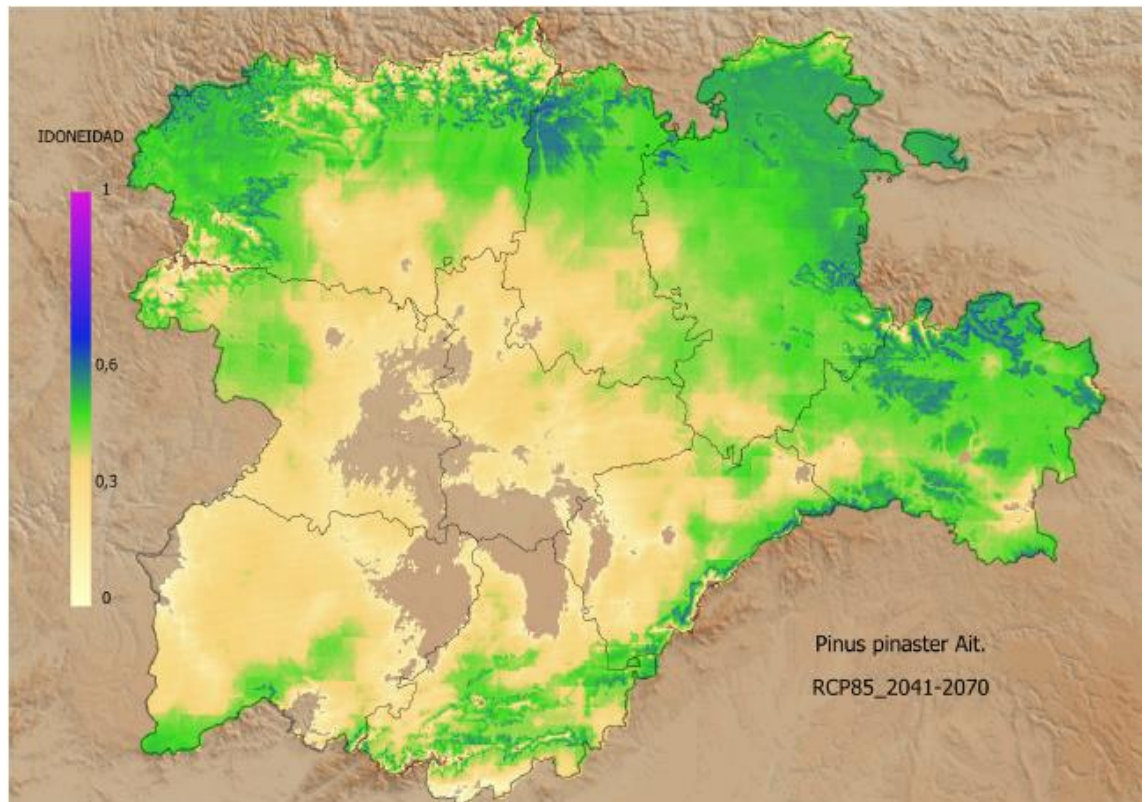


Fig. 4. Áreas de idoneidad (compatibilidad fitoclimática) para pinares de *P. pinaster* de Castilla y León en el periodo simulado 2041-2070 con escenario más desfavorable (RCP 8.5). Adaptado de Allué Camacho & García López, 2024.

- **Medidas recomendadas:** reducir la competencia hídrica mediante **clareos y resalveos**, proteger el regenerado mejor enraizado, e incluso favorecer la mezcla con especies más resilientes como *Pinus pinea* (Allué Camacho et al., 1995).

En cuanto a la producción resinera, distintos estudios muestran que el rendimiento está estrechamente ligado a la temperatura, la radiación solar, la evapotranspiración y a la intensidad de las sequías estivales (p. ej. Rodríguez-García et al., 2015). Además, la productividad resinera puede ser optimizada mediante una adecuada gestión selvícola que combine aclareos sucesivos y selección de individuos con mayor vigor (Allué Camacho et al., 1995).

c. Piñón (*Pinus pinea*)

i. Requerimientos ecológicos

El pino piñonero encaja en los subtipos mediterráneos genuinos **IV3 e IV4**, con posibilidad de situarse en **IV(VI)1** como formación de transición. Prefiere **arenales y suelos silíceos bien drenados**, donde alcanza sus mejores producciones. La productividad depende en gran medida de la precipitación en momentos fenológicos clave (Calama et al., 2016):

- **Mayo–noviembre** (inducción de yemas).
- **Enero–marzo** (prefloración).
- **Junio–septiembre** (postfloración).

Por otra parte, las heladas intensas (< -5 °C) pueden dañar los conos inmaduros.

ii. Amenazas por el cambio climático

A diferencia de otras especies de Castilla y León, el pino piñonero muestra una tendencia positiva en superficie compatible e idoneidad, pero con riesgos:

- **Escenario RCP 4.5:** incremento de superficie e idoneidad media, especialmente en zonas marginales de la especie.
- **Escenario RCP 8.5:** aumento inicial (2040–2070), seguido de fuerte reducción hacia final de siglo.

No obstante, las zonas donde el modelo FVN prevé la aparición del subtipo IV1 podrían experimentar una **pérdida local de compatibilidad**, reflejando condiciones de mayor aridez y termicidad. En los escenarios más desfavorables, estas áreas de incompatibilidad climática tienden a ser más amplias y continuas.

A esta vulnerabilidad climática se suma la presencia de **factores exógenos no climáticos** que condicionan de forma creciente la productividad del piñón. En particular, la expansión del **chinche americano (*Leptoglossus occidentalis*)**, detectada en gran

parte de la Península Ibérica, ha tenido un impacto notable sobre la viabilidad de los piñones, al provocar el **aborto prematuro de las semillas y una reducción drástica de los rendimientos** (Mutke et al., 2017). Este insecto constituye actualmente una de las principales amenazas bióticas para el aprovechamiento del piñón, independiente de los factores climáticos, y debe considerarse de manera explícita en la interpretación de las proyecciones de idoneidad.

iii. Hábitat productor: Pinares de pino piñonero

Los **pinares naturales de *Pinus pinea*** tienen su mayor representación en Valladolid, sobre arenasles, aunque la especie se ha empleado ampliamente en repoblaciones. Los valores extremos de los factores fitoclimáticos calculados por cada subtipo pueden consultarse en la tabla siguiente (Tabla 4).

Tabla 4. Ámbitos factoriales formados por los valores extremos de los 12 factores fitoclimáticos del modelo de fisionomías vegetales de Carmen Allué para los subtipos fisionómicos que caracterizan la distribución del pino piñonero. Donde K=intensidad de la aridez, A=duración de la aridez (meses), P=precipitación anual total (mm), PE=precipitación estival mínima (mm), T=temperatura media anual (°C), TMF=temperatura media mensual más baja (°C), TMC=temperatura media mensual más alta (°C), TMMF=temperatura media de las mínimas del mes de temperatura media más baja (°C), TMMC=temperatura media de las máximas del mes de temperatura media más alta (°C), HS=helada segura (meses), PV=periodo de actividad vegetal libre (meses) y OSC=oscilación térmica (°C). Información más detallada sobre el cálculo de estos factores puede encontrarse en la Tabla 1.

SUBTI PO	LÍMIT ES	K	A	P	P E	T	TM F	TM C	TMM F	TMM C	H S	P V	OS C
IV 3	Máx.	7,00	6,0 8	500	3 1	18, 3	9,4	29, 2	6,6	38,2	2, 8	9	21, 4

	Mín.	1,31	3	305	0	10,8	1,7	20,4	0,1	26,9	0	3,2	13,7
IV 4	Máx.	5,40	5,21	1583	27	18,2	9,4	29,3	7,4	38,6	2,7	9	22,2
	Mín.	0,57	3	501	0	10,2	1,9	18,5	0,1	24,2	0	3,3	11,6
IV(VI) 1	Máx.	15,18	7,19	1109	30	15,3	6,5	26,7	0	37	3,1	6,5	22,1
	Mín.	0,72	3	224	0	9,3	2,1	18,3	-4,2	25,3	0	2,2	13,4

- **Situación histórica:** en 1950–1979 ocupaban amplias áreas con buena compatibilidad fitoclimática.
- **Evolución observada:** entre 1990–2019 aumentan tanto la superficie como la idoneidad de la especie, a diferencia de lo ocurrido con otras coníferas mediterráneas.
- **Proyecciones futuras:** en escenarios moderados, las áreas compatibles continúan creciendo; sin embargo, en escenarios más extremos aparecen extensas zonas de incompatibilidad (subtipo IV1).
- **Recomendaciones de gestión:**
Ante la previsión de cambios fitoclimáticos y de la presión de agentes exógenos, se recomienda fomentar una gestión orientada a la **diversificación genética y estructural** de los pinares de *Pinus pinea*. El mantenimiento de densidades moderadas y la promoción de regeneración natural en mosaicos de edad pueden contribuir a incrementar la resiliencia frente a sequías y plagas.

Asimismo, resulta prioritario **reforzar la vigilancia fitosanitaria** y promover investigaciones aplicadas sobre el control de *Leptoglossus occidentalis*, así como sobre estrategias de manejo adaptativo que permitan mitigar su impacto. La integración de esta variable biótica en los modelos predictivos futuros mejorará la capacidad de anticipar la productividad real del piñón ibérico bajo distintos escenarios climáticos.

d. Corcho (*Quercus suber*)

i. Requerimientos ecológicos

El alcornoque se sitúa en posiciones intermedias entre ambientes nemoromediterráneos húmedos y mediterráneos subnemorales o genuinos, dependiendo de la estación y del escenario climático. Su óptimo climático se encuentra en temperaturas medias anuales de 13–16 °C y precipitaciones superiores a 500 mm (Pausas et al., 2009), con veranos secos, pero no excesivamente prolongados.

Además de los factores climáticos, la distribución real de *Quercus suber* está fuertemente condicionada por la naturaleza del suelo. La especie presenta una marcada preferencia por sustratos silíceos, arenosos y ácidos, evitando suelos calizos o básicos que limitan su implantación. Esta especialización edáfica condiciona su presencia real en el territorio, restringiéndola a zonas con litologías favorables, aun cuando los modelos fitoclimáticos indiquen una elevada compatibilidad climática. La combinación de clima templado húmedo y suelos ácidos constituye, por tanto, el principal requisito ecológico de la especie.

ii. Amenazas por el cambio climático

Aunque su superficie potencial en Castilla y León es amplia, su preferencia por suelos ácidos restringe las áreas realmente ocupadas a Salamanca, Zamora y El Bierzo. Entre las principales amenazas destacan:

- **Escenario RCP 4.5:** mantenimiento en subtipos IV(VI)1 y IV(VI)3, con cierta estabilidad.
- **Escenario RCP 8.5:** desplazamiento hacia subtipos más secos (IV4), con riesgo de pérdida de productividad.
- **Abióticas:** sequías recurrentes y olas de calor prolongadas afectan al crecimiento y regeneración (Arosa González, 2015; Mechergui, 2025).
- **Bióticas:** la “seca” (*Phytophthora cinnamomi*) constituye la amenaza más grave, especialmente en combinación con estrés hídrico (Brasier et al., 1993).

iii. Hábitat productor: Alcornocales

Los alcornocales de Castilla y León se concentran en el flanco occidental de la Comunidad, sobre todo en la provincia de Salamanca, aunque también se encuentran en Zamora y el Bierzo. En la tabla siguiente (Tabla 5) se muestran los valores máximos y mínimos de los 12 factores del modelo de fisionomías vegetales (modelo FVN) para los subtipos en los que aparece la especie.

Tabla 5. Ámbitos factoriales formados por los valores extremos de los 12 factores fitoclimáticos del modelo de fisionomías vegetales de Carmen Allué para los subtipos fisionómicos que caracterizan la distribución del alcornoque. Donde K=intensidad de la aridez, A=duración de la aridez (meses), P=precipitación anual total (mm), PE=precipitación estival mínima (mm), T=temperatura media anual (°C), TMF=temperatura media mensual más baja (°C), TMC=temperatura media mensual más alta (°C), TMMF=temperatura media de las mínimas del mes de temperatura media más baja (°C), TMMC=temperatura media de las máximas del mes de temperatura media más alta (°C), HS=helada segura (meses), PV=periodo de actividad vegetal libre (meses) y OSC=oscilación térmica (°C). Información más detallada sobre el cálculo de estos factores puede encontrarse en la Tabla 1.

SUBTI PO	LÍMIT ES	K	A	P	P E	T	TM F	TM C	TMM F	TMM C	H S	PV	OS C
IV 4	Máx.	5,40	5,2 1	158 3	2 7	18, 2	9,4	29, 3	7,4	38,6	2, 7	9	22, 2
	Mín.	0,57	3	501	0	10, 2	1,9	18, 5	0,1	24,2	0	3,3	11, 6
IV(VI) 1	Máx.	15,1 8	7,1 9	110 9	3 0	15, 3	6,5	26, 7	0	37	3, 1	6,5	22, 1
	Mín.	0,72	3	224	0	9,3	2,1	18, 3	-4,2	25,3	0	2,2	13, 4
IV(VI) 3	Máx.	5,80	2,9 9	186 2	4 0	16, 2	7,4	27, 9	5	37,5	0	10, 6	21
	Mín.	0,04	1,2 5	346	0	10, 3	5	16, 9	-1,7	23,4	0	4,6	11, 1
VI(IV) 2	Máx.	1,4	2,9 9	201 6	4 0	14	4,9	25, 2	2,6	35,2	4, 9	7,6	21, 8

SUBTI PO	LÍMIT ES	K	A	P	P E	T	TM F	TM C	TMM F	TMM C	H S	PV	OS C
	Mín.	0,02	1,2 5	726	2	6,6	- 0,9	14, 8	-5,4	21,9	0	2,5	12

- **Situación histórica (1950–1979):** superficie compatible de 75.466 km², aunque la presencia real fue mucho menor por limitaciones edáficas.
- **Evolución observada (1990–2019):** panorama estable, con idoneidad mantenida gracias al aumento de la termicidad.
- **Proyecciones futuras:** en escenarios moderados, se mantiene en sus áreas actuales; bajo escenarios adversos, retrocede hacia posiciones más mediterráneas. Algunas mejoras puntuales de idoneidad se prevén en el suroeste de Salamanca y en El Bierzo.

En cualquier caso, incluso en los escenarios de aumento de idoneidad climática, la expansión real del alcornoque estará limitada por la edafología y la litología subyacente. Los suelos calizos o de pH elevado resultan inadecuados para la especie, por lo que la superficie “climáticamente compatible” obtenida mediante los modelos CAF debería ajustarse mediante capas litológicas y edáficas que reflejen la distribución real de sustratos aptos. Este enfoque permitiría obtener una cartografía “potencial real” más precisa y coherente con su ecología.

- **Medidas recomendadas:** gestión forestal para mejorar la disponibilidad hídrica (clareos, claras, resalveos), promoción de diversidad fenológica y estructural de las masas, respeto a otras especies arbóreas, y control de la regeneración. Los desbroces puntuales y planificados del matorral y la conservación de restos de corta pueden mejorar el microclima del suelo, mejorando la disponibilidad hídrica individual y ofreciendo refugio al regenerado frente a las altas temperaturas.

- Se recomienda incorporar en el visor del IMFOREST **capas de información edáfica y litológica** (pH, textura, material parental y drenaje) que complementen los modelos fitoclimáticos actuales. La integración de estos factores permitiría diferenciar entre áreas **compatibles climáticamente** y aquellas con **aptitud ecológica real**, mejorando la planificación del aprovechamiento del corcho y la gestión adaptativa del alcornoque ante escenarios de cambio climático.

e. Encinares (*Quercus ilex*)

i. Requerimientos ecológicos

La encina posee una gran amplitud ecológica, ocupando tanto posiciones mediterráneas genuinas (IV3, IV4) como subnemorales (IV(VI)1, IV(VI)2, IV(VI)3) y nemoromediterráneas (VI(IV)1, VI(IV)2, VI(IV)4). Se adapta a diferentes suelos, aunque prefiere los profundos y bien drenados. Resiste bien la sequía y se beneficia de temperaturas medias anuales de 10–17 °C y precipitaciones de 400–1000 mm, según el subtipo.

ii. Amenazas por el cambio climático.

La encina es la especie forestal con **mayor representación territorial** en Castilla y León, pero su futuro se ve afectado por:

Estabilidad relativa entre 1950–1979 y 1990–2019, con ligero aumento de superficie por migración altitudinal.

Escenarios futuros: desplazamiento hacia territorios nemoromediterráneos hasta ahora dominados por especies marcescentes, con pérdida de idoneidad en el centro de Castilla y León.

Escenario RCP 8.5: riesgo de retroceso acusado en áreas más áridas, con caída de idoneidad media.

Abióticas: la intensificación de sequías mediterráneas reduce la supervivencia de plántulas y la regeneración natural (Gori et al., 2023).

Bióticas: la “seca” asociada a *Phytophthora cinnamomi* (Sánchez et al., 2002) y el sobrepastoreo (Wilcox et al., 2024) son amenazas críticas

iii. Hábitat productor:

Los encinares son las formaciones arboladas naturales con mayor representación territorial en Castilla y León. Están presentes en casi todo el territorio salvo en la alta montaña no arbolada. A pesar de esto raramente tienen una elevada capacidad competitiva. El ámbito factorial de los subtipos que definen su área de distribución, así como las formaciones zonales más frecuentes puede consultarse en la tabla siguiente (Tabla 6).

Tabla 6. Ámbitos factoriales formados por los valores extremos de los 12 factores fitoclimáticos del modelo de fisionomías vegetales de Carmen Allué para los subtipos fisionómicos que caracterizan la distribución de la encina. Donde K=intensidad de la aridez, A=duración de la aridez (meses), P=precipitación anual total (mm), PE=precipitación estival mínima (mm), T=temperatura media anual (°C), TMF=temperatura media mensual más baja (°C), TMC=temperatura media mensual más alta (°C), TMMF=temperatura media de las mínimas del mes de temperatura media más baja (°C), TMMC=temperatura media de las máximas del mes de temperatura media más alta (°C), HS=helada segura (meses), PV=periodo de actividad vegetal libre (meses) y OSC=oscilación térmica (°C). Información más detallada sobre el cálculo de estos factores puede encontrarse en la Tabla 1.

SUBTIPO	LÍMITES	K	A	P	PE	T	TMF	TMC	TMMF	TMMC	HS	PV	OSC	Formaciones zonales más frecuentes
IV3	Máx.	7,00	6,08	500	31	18,3	9,4	29,2	6,6	38,2	2,8	9	21,4	Encinares secos
	Mín.	1,31	3	305	0	10,8	1,7	20,4	0,1	26,9	0	3,2	13,7	
IV4	Máx.	5,40	5,21	1583	27	18,2	9,4	29,3	7,4	38,6	2,7	9	22,2	Encinares húmedos
	Mín.	0,57	3	501	0	10,2	1,9	18,5	0,1	24,2	0	3,3	11,6	
IV(VI)1	Máx.	15,18	7,19	1109	30	15,3	6,5	26,7	0	37	3,1	6,5	22,1	Encinares húmedos

SUBTIPO	LÍMITES	K	A	P	PE	T	TMF	TM C	TM MF	TMM C	H S	P V	OS C	Formaciones zonales más frecuentes
	Mín.	0,72	3	224	0	9,3	2,1	18,3	-4,2	25,3	0	2,2	13,4	con quejigo o rebollo
IV(VI) 2	Máx.	5,27	2,99	850	36	18,6	11,6	27,1	7,9	34,9	0	10,8	18,6	Alsinares secos
	Mín.	0,15	1,25	388	2	12,9	7,5	18,3	1,4	23,4	0	8,9	10,2	
IV(VI) 3	Máx.	5,80	2,99	1862	40	16,2	7,4	27,9	5	37,5	0	10,6	21	Encinares ilicinos
	Mín.	0,04	1,25	346	0	10,3	5	16,9	-1,7	23,4	0	4,6	11,1	
VI(IV) 1	Máx.	5,72	2,99	725	39	14,9	4,9	26,1	2,5	37,3	4,9	7,8	22,7	Quejigares y melojares secos con encina
	Mín.	0,01	1,25	321	4	7,3	-0,5	16	-5,4	23,5	0	3,2	13,2	
VI(IV) 2	Máx.	1,4	2,99	2016	40	14	4,9	25,2	2,6	35,2	4,9	7,6	21,8	Quejigares y melojares húmedos con encina
	Mín.	0,02	1,25	726	2	6,6	-0,9	14,8	-5,4	21,9	0	2,5	12	

SUBTIPO	LÍMITES	K	A	P	P E	T	TM F	TM C	TM MF	TMM C	H S	P V	OS C	Formaciones zonales más frecuentes
VI(IV) 4	Máx.	0,6 0	1,2 4	950	9 0	16, 6	10, 4	24,7	6,8	32,2	0	12	20	Alsinares húmedos
	Mín.	0	0	408	1 8	10	4	16,7	- 2,3	21,5	0	6	8,6	

- **Situación histórica:** encinares presentes en casi todo el territorio, salvo en alta montaña. Idoneidad media relativamente baja (0,45), lo que explica su frecuente mezcla con otras especies de muy distinto temperamento.
- **Evolución observada:** estabilidad general con leve incremento de superficie en 1990–2019 respecto a 1950–1979, gracias a mayor termicidad.
- **Proyecciones futuras:** retroceso progresivo hacia subtipos nemoromediterráneos, con pérdidas importantes en el centro de Castilla y León.
- **Medidas recomendadas:** en dehesas, el manejo debe centrarse en la regeneración y protección frente al diente del ganado, mientras que en encinares cerrados son prioritarios los resalvos para reducir la competencia hídrica y las podas de copa moderadas para evitar debilitamientos.

f. Setas

i. Requerimientos ecológicos

La producción de setas depende de la interacción entre el clima, el suelo, la vegetación hospedadora y la estructura de las masas forestales. El Grupo Operativo **MIKOGEST** modelizó varias especies de alto interés comercial (*Amanita caesarea*, *Boletus aereus*,

Boletus edulis, *Boletus pinophilus*, *Calocybe gambosa*, *Cantharellus cibarius*, *Hygrophorus limacinus*, *Lactarius deliciosus*, *Lactarius sanguifluus*, *Morchella* sp. y *Pleurotus eryngii*, entre otras).

Los principales **requerimientos biológicos y de hábitat** identificados son:

Especies hospedadoras: la mayoría de estas setas son ectomicorrícicas y dependen de *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*, *Quercus ilex*, *Quercus pyrenaica* o *Castanea sativa*, entre otros.

Altitud: condiciona la adecuación climática, siendo especies como *B. edulis* y *C. cibarius* más frecuentes en cotas medias-altas, mientras que *L. deliciosus* aparece en cotas más bajas mediterráneas.

Pendiente y orientación: influyen en la disponibilidad hídrica y la radiación solar, modulando la fructificación.

Estructura forestal (área basimétrica, AB): factor clave en la producción. Valores intermedios de AB maximizan la productividad de *Boletus* y *Cantharellus*, mientras que en especies oportunistas (*Tricholoma terreum*) la relación es más laxa.

Hábitat forestal: la composición y madurez de la masa influyen en la diversidad y abundancia de fructificaciones.

ii. Amenazas por el cambio climático

La producción de setas es uno de los PFNM más sensibles a la variabilidad climática. Las principales **amenazas abióticas** son: sequías estacionales, olas de calor y menor regularidad de precipitaciones, que afectan fuertemente a la fructificación (Büntgen et al., 2012).

Las **amenazas bióticas** incluyen: degradación del bosque hospedador, incendios, sobrepastoreo y recolección desregulada (Martínez de Aragón et al., 2007).

iii. Variables determinantes de la distribución y la producción potencial

Los modelos predictivos de MIKOGEST, tanto con **enfoques de idoneidad fitoclimática** como con **Random Forest**, identificaron las siguientes variables clave:

- ***Boletus* spp.** (*B. edulis*, *B. aereus*, *B. pinophilus*):
 - Precipitación de septiembre (determinante para la fructificación).
 - Pendiente y altitud (influyen en la humedad edáfica y el microclima).
 - Área basimétrica (efecto positivo hasta valores intermedios).
- ***Lactarius* spp.** (*L. deliciosus* y *L. sanguifluus*):
 - Área basimétrica (factor más importante en masas de pino).
 - Precipitación acumulada anual y temperatura de septiembre.
 - Para *L. deliciosus*: precipitación de noviembre, área basimétrica y precipitación de septiembre.
- ***Cantharellus cibarius*:**
 - Más ligados a altitudes medias-altas y a pendientes con exposición húmeda.
 - Relación positiva con masas densas pero no excesivamente cerradas (AB intermedia).

g. Trufa negra (*Tuber melanosporum*)

i. Requerimientos ecológicos

La trufa negra es un hongo ectomicorrízico que se asocia principalmente con encinas (*Quercus ilex*), quejigos (*Q. faginea*), rebollos (*Q. pyrenaica*) y coscojas (*Q. coccifera*). Sus requerimientos principales son:

- **Clima:** requiere un régimen estacional contrastado, con veranos cálidos y secos e inviernos fríos, lo que favorece la formación de micorrizas y el desarrollo de carpóforos (Reyna & García-Barreda, 2014).

- **Suelos:** preferencia por suelos **calizos, bien drenados, de textura franca o franco-arenosa**, con escaso horizonte orgánico (Olivier et al., 2012).

ii. Amenazas por el cambio climático

- **Amenazas abióticas:** la fuerte dependencia de suelos calizos limita su área potencial. La reducción de precipitaciones estivales y la intensificación de sequías comprometen la producción, tal como ha quedado demostrado en el Mediterráneo, donde sequías prolongadas han reducido notablemente las cosechas (Büntgen et al., 2012).
- **Amenazas bióticas:** degradación de encinares y quejigares por incendios, abandono o sobreexplotación forestal.
- **Presión de aprovechamiento:** prácticas de recolección no reguladas o expolio en trufas silvestres, con riesgo para la persistencia del micelio.

iii. Variables determinantes de la distribución potencial

Pese a que no se han llevado a cabo simulaciones en escenarios de cambio climático para desarrollar las capas de la trufa que figuran en el visor, entre los factores bioclimáticos y geológicos que determinan su distribución potencial destacan:

- **Precipitación anual y estival mínima**, crucial para la hidratación de suelos y la fructificación.
- **Temperatura media anual y temperaturas extremas**, que condicionan la estacionalidad climática.
- **Litología caliza**, esencial por el carácter calcícola de la especie (Olivier et al., 2012).

4. Glosario de acrónimos

AEMET. *Agencia Estatal de Meteorología.* Organismo público español responsable de la observación, predicción y estudio del tiempo y del clima, cuyos datos se emplearon para la calibración de los modelos climáticos históricos (1950–2019).

AR5. *Fifth Assessment Report del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),* publicado en 2014. Introduce los escenarios de concentración representativa (*Representative Concentration Pathways, RCP*).

AR6. *Sixth Assessment Report del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),* publicado en 2021. Actualiza las proyecciones climáticas globales e introduce los escenarios socioeconómicos compartidos (*Shared Socioeconomic Pathways, SSP*).

CAF. *Cubiertas Arbóreas Forestales.* Modelos desarrollados en el marco de FITOCLIM que representan la idoneidad climática potencial de las especies arbóreas principales a escala regional.

FITOCLIM. Herramienta de modelización fitoclimática multivariable desarrollada por Allué Andrade y colaboradores. Utiliza datos de temperatura y precipitación de alta resolución para estimar factores fitoclimáticos y generar modelos de distribución potencial de especies forestales.

FVN. *Fisionomías Vegetales Naturales.* Modelos fitoclimáticos que describen la estructura potencial de la vegetación en función de los factores bioclimáticos definidos por Allué Andrade (1990) y sus revisiones posteriores.

HS. *Helada segura.* Variable fitoclimática que expresa el número de meses en que la temperatura media mensual $\leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

IPCC. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Organismo de Naciones Unidas responsable de la evaluación científica del cambio climático y de la publicación de los informes AR5 y AR6.

IPCC5 / IPCC6. Denominaciones empleadas en el informe para referirse respectivamente al *Quinto* (AR5) y *Sexto* (AR6) *Informe de Evaluación del IPCC*.

LIFE. Programa financiero de la Unión Europea dedicado al medio ambiente y la acción por el clima. Algunos resultados de este informe derivan de proyectos LIFE como *Soria ForestAdapt*.

MIKOGEST. Grupo Operativo que desarrolló modelos predictivos de productividad micológica mediante algoritmos de aprendizaje automático (*Random Forest* y *Hurdle Models*), aplicados a especies de interés comercial como *Boletus edulis*, *Lactarius deliciosus* y *Cantharellus cibarius*.

OSC. *Oscilación térmica*. Variable fitoclimática definida como la diferencia entre la temperatura media mensual más alta (TMC) y la más baja (TMF).

PFNM. *Productos Forestales No Maderables*. Recursos de origen forestal distintos de la madera, entre los que se incluyen resina, corcho, piñón, castaña, bellota, setas y trufa negra.

PV. *Periodo de actividad vegetal libre*. Variable fitoclimática calculada como el número de meses con temperatura media $\geq 7,5$ °C, excluidos los periodos de aridez.

RCP. *Representative Concentration Pathways*. Escenarios de cambio climático empleados por el IPCC en el AR5 (2014), definidos por diferentes trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero.

SSP. *Shared Socioeconomic Pathways*. Escenarios de cambio climático del IPCC AR6 (2021) que integran simultáneamente la evolución climática y socioeconómica global para proyectar impactos y vulnerabilidades futuras.

5. Bibliografía

Allué Andrade, J. L. (1990). *Atlas fitoclimático de España. Taxonomías*. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (MAPA). 221 pp.

Allué Camacho, C., Fernández Meléndez, J. A., & Allué-Andrade, J. L. (1995). Cambio de clima en la tierra de pinares de Segovia y alternativas dasocráticas para el amortiguamiento de sus efectos. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 1, 279–294.

Allué Camacho, C., & García López, J. M. (2023). La dinámica fitoclimática como reto de gestión en la Red de Espacios Naturales Protegidos de Castilla y León. *Boletín Europarc-España*, 54, 12–15.

Allué Camacho, C., & García López, J. M. (2024). *Los bosques naturales de Castilla y León: caracterización y potencialidades fitoclimáticas en un contexto de cambio climático*. LIFE19/CCA/ES001181 Soria ForestAdapt, Burgos, España.

Arosa González, M.L. (2015). The decline of cork oak woodlands: Biotic and abiotic interactions in Portuguese *Montados*. Tesis doctoral, Universidad de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1953). Saison sèche et indice xérothermique. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 88, 193–240.

Bonet, J. A., González-Olabarria, J.R, & Martínez de Aragón, J. (2014). Mushroom production as an alternative for rural development in a forested mountainous area. *Journal of Mountain Science*, 11(2), 535–543. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2877-0>

Brasier, C. M., Robredo, F., Ferraz, J.F.P. (1993). Evidence for *Phytophthora cinnamomi* involvement in Iberian oak decline. *Plant Pathology*, 42(1), 140-145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1993.tb01482.x>

Bravo-Oviedo, A., Pretzsch, H., Ammer, C., Andenmatten, E., Barbati, A., Barreiro, S., Brang, P., Bravo, F., Coll, L., Corona, P., den Ouden, J., Ducey, M. J., Forrester, D. I.,

Giergiczny, M., Jacobsen, J. B., Lesinski, J., Löf, M., Mason, W. L., Matovic, B., Metslaid, M., Morneau, F., Motiejunaite, J., O'Reilly, C., Pach, M., Ponette, Q., del Rio, M., Short, I., Skovsgaard, J. P., Soliño, M., Spathelf, P., Sterba, H., Stojanovic, D., Strelcova, K., Svoboda, M., Verheyen, K., von Lüpke, N., & Zlatanov, T. (2014). European Mixed Forests: definition and research perspectives. *Forest Systems*, 23(3), 518-533. <https://doi.org/10.5424/fs/2014233-06256>

Büntgen, U., Egli, S., Camarero, J.J., Fischer, E.M., Stobbe, U., Kauserud, H., Tegel, W., Sproll, L. & Stenseth, N.C. (2012). Drought-induced decline in Mediterranean truffle harvest. *Nature Climate Change*, 2, 827–829. <https://doi.org/10.1038/nclimate1733>

Calama, R., de-Dios-García, J., del Río, M., Madrigal, G., Gordo, J., Pardos M. (2021). Mixture mitigates the effect of climate change on the provision of relevant ecosystem services in managed *Pinus pinea* L. forests. *Forest Ecology and Management*, 481, p. 118782, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118782>

Calama, R., Gordo, J., Madrigal, G., Mutke, S., Conde, M., Montero, G., & Pardos, M. (2016). Enhanced tools for predicting annual stone pine (*Pinus pinea* L.) cone production at tree and forest scale in Inner Spain. *Forest Systems*, 25(3), e079. <https://doi.org/10.5424/fs/2016253-09671>

Camisón, Á., Martín, M. Á., Oliva, J., & Gil, L. (2019). Increased tolerance to *Phytophthora cinnamomi* in offspring of ink-diseased chestnut (*Castanea sativa* Miller) trees. *Annals of Forest Science*, 76, 119. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0898-8>

De la Varga, H., Águeda, B., Ágreda, T., Martínez-Peña, F., Parladé, J. & Pera, J. (2013). Seasonal dynamics of *Boletus edulis* and *Lactarius deliciosus* extraradical mycelium in pine forests of central Spain. *Mycorrhiza*, 23, 391–402. <https://doi.org/10.1007/s00572-013-0481-3>

García-López, J. M., & Allué, C. (2003). Aplicación de la teoría de la envolvente convexa a la mejora del sistema fitoclimático Allué-Andrade. *Ecología*, 17, 329–343.

Gori, A., Baesso Moura, B., Sillo, F., Alderotti, F., Pasquini, D., Balestrini, R., Ferrini, F., Centritto, M. & Brunetti, C. (2023). Unveiling resilience mechanisms of *Quercus ilex*

seedlings to severe water stress: Changes in non-structural carbohydrates, xylem hydraulic functionality and wood anatomy. *Science of The Total Environment*, 878, 163124, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163124>.

Martínez de Aragón, J., Bonet, J. A., Fischer, C. R., & Colinas, C. (2007). Productivity of ectomycorrhizal and selected edible saprotrophic fungi in pine forests of the pre-Pyrenees mountains, Spain: Predictive equations for forest management of mycological resources. *Forest Ecology and Management*, 252(1-3), 239-256. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.040>

Martínez-Peña, F., de Miguel, S., Pukkala, T., Bonet, J. A., Ortega-Martínez, P., Aldea, J., & Martín-Pinto, P. (2012). Yield models for ectomycorrhizal mushrooms in *Pinus sylvestris* forests with special focus on *Boletus edulis* and *Lactarius group deliciosus*. *Forest Ecology and Management*, 282, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.034>

Mehergui, T., Pardos, M., Jacobs, D.F., Banerjee, A., & Catry, F.X. (2025). Cork oak seedling emergence, survival, and growth in response to active limestone and water stress conditions. *European Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01827-9>

Metreveli, V., Kreft, H., Akobia, I., Janiashvili, Z., Nonashvili, Z., Dzadzamia, L., Javakhishvili, Z., & Gavashelishvili, A. (2023). Potential Distribution and Suitable Habitat for Chestnut (*Castanea sativa*). *Forests*, 14(10), 2076. <https://doi.org/10.3390/f14102076>

Moura, M., Campelo, F., Carvalho, A., Nabais, C., García-Fórner, N. (2025). Growth and climate drive resin production in *Pinus pinaster* and *Pinus pinea*. *Trees*, 39(22). <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02578-7>

Mutke, S., Calama, R., Nasrallah Neaymeh, E., & Roques, A. (2017). Impact of the Dry Cone Syndrome on commercial kernel yield of stone pine cones. *Mediterranean Pine Nuts from Forests and Plantations*; Carrasquinho, I., Correia, AC, Mutke, S., Eds. Zaragoza: CIHEAM. Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens, 122, 79-84.

Olivier, J.M., Savignac, J.C. & Sorzat, P. (2012). *Truffe et Trufficulture*. FANLAC, Périgord.

Palahí, M., Pukkala, T., Bonet, J. A., Colinas, C., Fischer, C. R., Martínez de Aragón, J. (2009). Effect of the inclusion of mushroom values on the optimal management of even-aged pine stands of Catalonia. *Forest Science*, 55(6), 503-511. <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.6.503>

Pausas, J. G., Pereira, J. S., & Aronson, J. (2009). The tree. In Aronson, J., Pereira, J. S., & Pausas, J. G. editors. *Cork oak woodlands on the edge. Conservation, Adaptive Management, and Restoration*. Chapter 1, 11-22. Society for ecological restoration international.

Reyna, S. & García-Barreda, S. (2014). Black truffle cultivation: a global reality. *Forest Systems*, 23(2): 317–328. <https://doi.org/10.5424/fs/2014232-04771>

Robin, C. & Marchand, M. (2022). Diseases of chestnut trees. In: Asiegbu, F.O., Kovalchuk, A. (eds). *Forest Microbiology, Volume Two: Forest Tree Health*. Elsevier Inc., All., 311–323. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85042-1.00036-7>

Rodríguez-García, A., Martín, J. A., López, R., Mutke, S., Pinillos, F., & Gil, L. (2015). Influence of climate variables on resin yield and secretory structures in tapped *Pinus pinaster* Ait. in central Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 202, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.023>

San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo G., Houston Durrant, T., Mauri, A., Tinner, W., Ballian, D., Beck, P., Birks, H. J. B., Eaton, E., Enescu, C. M., Pasta, S., Popescu, I., Ravazzi, C., Welk, E., Abad Viñas, R., Azevedo, J. C., Barbat, A., Barredo, J. I., Benham, S. E., Boca, R., Bosco, C., Caldeira, M. C., Cerasoli, S., Chirici, G., Cierjacks, A., Conedera, M., Da Ronch, F., Di Leo, M., García-Viñas, J. I., Gastón González, A., Giannetti, F., Guerrero Hue, N., Guerrero Maldonado, N., López, M. J., Jonsson, R., Krebs, P., Magni, D., Mubareka, S., Mulhern, G., Nieto Quintano, P., Oliveira, S., Pereira, J. S., Pividori, M., Rätty, M., Rinaldi, F., Saura, S., Sikkema, R., Sitzia, T., Strona, G., Vidal, C., Vilar, L., Zecchin, B. (2016). *European atlas of forest tree species*.



Luxembourg: Publication Office of the European Union.
<https://data.europa.eu/doi/10.2760/776635>

Sánchez, M. E., Caetano, P., Ferraz, J., Trapero-Casas, A. (2002). *Phytophthora* disease of *Quercus ilex* in South-Western Spain. *Forest Pathology*, 32(1), 5–18.
<https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2002.00261.x>

Wang, C., Zhang, F., & Liu, W. (2024). The ecological management and sustainable development of forests. *Forests*, 15(5), 871. <https://doi.org/10.3390/f1505087>

Wilcox, B.P., Caldeira, M.C., Leite, P.A.M., Lobo-do-Vale, R., Bugalho, M.N. (2024). Understory shrubs improve soil infiltrability in overgrazed Mediterranean oak woodlands, but have little impact on ungrazed woodlands. *Forest Ecology and Management*, 569, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122186>.