



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1822

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Evaluación del impacto del cambio climático en la multifuncionalidad de las masas de *Pinus pinaster* Ait.

ALDEA, J. (1), CHAMBEL, R. (1), RODRÍGUEZ, A. (2), MADRIGAL, G. (1) y MONTES, F. (1)

(1) Instituto de Ciencias Forestales ICIFOR-INIA, CSIC, Ctra. A Coruña km 7.5, 28040 Madrid, España.

(2) CESEFOR- Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León., Soria, España

Resumen

El área mediterránea es vulnerable al cambio climático como consecuencia del aumento esperado en la frecuencia de sequías y olas de calor. La silvicultura es clave para adaptar los bosques, pero la falta de directrices claras dificulta la gestión. Las simulaciones forestales, aunque útiles, no suelen contemplar de forma conjunta aspectos como el climático, genéticos y de diversidad de especies de las formaciones forestales, lo que limita su aplicación práctica. El proyecto MULTIPINE busca abordar este problema creando modelos sensibles al clima, utilizando técnicas de machine learning para prever los impactos del cambio climático en los bosques de *Pinus pinaster* Ait. en España. Además, permitirá evaluar estrategias para mejorar la resiliencia forestal ante el cambio climático, considerando los factores genéticos y los bosques mixtos con otras especies forestales. Finalmente, se intentará poner las bases para el desarrollo de una herramienta práctica que permita evaluar los trade-offs entre diferentes objetivos de gestión, ayudando así a los gestores forestales en la toma de decisiones para una correcta adaptación al cambio climático.

Palabras clave

Simulación forestal, modelización forestal, machine learning, selvicultura adaptativa

1. Motivación

La región mediterránea es particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático, como sequías más intensas y frecuentes, olas de calor y tormentas (IPCC, 2022). Estos cambios amenazan la resiliencia y multifuncionalidad de los bosques, especialmente de *Pinus pinaster* Ait. en áreas xéricas donde en la actualidad se combinan varios agentes desfavorables: el estrés hídrico, el abandono de usos tradicionales y las grandes perturbaciones como incendios y plagas (Brotons et al. 2013; Adame et al. 2022; Prieto-Recio et al. 2015). La silvicultura se plantea como una estrategia clave para la adaptación, pero la falta de modelos sensibles al clima que estén enfocados en la gestión limita la capacidad de los gestores para afrontar estos retos.

Aunque existen diversos modelos forestales, pocos contemplan conjuntamente aspectos como el climático, factores genéticos y de diversidad de las formaciones forestales, lo que limita su aplicación práctica (Blanco et al. 2008; De Cáceres et al. 2021). Además, la mayoría se centra en la dinámica de crecimiento y producción de madera, lo que imposibilita evaluar adecuadamente los trade-off existentes entre múltiples servicios ecosistémicos (Oliver & Larson, 1996; FAO, 2020). Dos estrategias de adaptación destacan por su potencial:

1. Migración asistida: Apoyar la selección de procedencias genéticamente adaptadas utilizando datos de ensayos en campo para evaluar la interacción entre clima y genética (Alfaro et al. 2014; Alía et al. 2024).



2. Rodales mixtos: Aprovechar los beneficios de las masas mixtas que, dependiendo de la identidad de las especies coexistentes, tienen el potencial para incrementar la resistencia a la sequía y a otras perturbaciones (van Halder et al. 2022; Fichtner, 2017).

Por último, involucrar a las partes interesadas desde el inicio del proceso de modelado es crucial. Esto permitirá desarrollar herramientas accesibles para los gestores forestales y aumentar el uso práctico de los resultados (Blanco & Lo, 2023).

2. Objetivos

MULTIPINE tiene como objetivo evaluar el efecto del cambio climático sobre varios servicios ecosistémicos de las masas de *P. pinaster* en España. Contribuirá a evaluar el efecto de diferentes estrategias de manejo forestal sostenible mediante la evaluación de los trade-offs existentes entre diferentes objetivos de gestión. El proyecto se centrará en cuatro objetivos específicos:

1. Integrar el clima en modelos de crecimiento forestal: Incorporar variables climáticas como predictores en modelos empíricos de crecimiento, dinámica estructural y mortalidad de *P. pinaster*, ajustados con algoritmos de aprendizaje automático. Esto permitirá obtener predicciones precisas a nivel de árbol y rodal.
2. Explorar estrategias de gestión para aumentar la resiliencia: Evaluar el impacto de dos estrategias clave en la resiliencia forestal: i) procedencias genéticamente seleccionadas y ii) rodales mixtos. Se estudiará cómo interactúan estas estrategias con el clima en la estructura y dinámica de las masas forestales.
3. Evaluar la multifuncionalidad forestal frente al cambio climático: Analizar cómo el equilibrio entre producción de madera y otros servicios ecosistémicos (biomasa, fijación de carbono y producción de resina y hongos) se ve afectado por diferentes escenarios climáticos y de gestión. Esto permitirá diseñar estrategias para mantener la multifuncionalidad de los pinares bajo condiciones cambiantes.
4. Difusión y transferencia de resultados: Identificar las necesidades de gestores forestales, propietarios y administración forestal para desarrollar una herramienta práctica de simulación (aplicación web o software) que facilite la toma de decisiones. Este objetivo incluye actividades de transferencia mediante reuniones y encuestas con los usuarios finales.

3. Metodología

Para conseguir los objetivos planteados en el proyecto, se tomarán datos dasométricos y climáticos de parcelas experimentales en España (ICIFOR-INIA, USC-UXFS), incluyendo inventarios previos y nuevos muestreos. Los dispositivos experimentales a emplear son parcelas permanentes, ensayos de claras, parcelas temporales de mezcla de especies y ensayos genéticos (procedencias y progenies). Los anillos de crecimiento serán medidos mediante técnicas dendrocronológicas estándar, y los datos climáticos (temperatura, precipitación, radiación, etc.) se obtendrán de la AEMET para caracterizar las áreas de estudio y analizar su impacto en el crecimiento y la dinámica forestal.

Utilizando técnicas de machine learning se construirán modelos predictivos para evaluar la dinámica de crecimiento y mortalidad en función del clima. Estos modelos serán adaptados para incorporar la variabilidad genética y la competencia intra/interespecífica en rodales mixtos y puros. Además, se modelará la producción de madera, captura de carbono, resina y setas, empleando datos ya



recopilados por el grupo, junto con otros de nueva adquisición. Se analizará la relación entre estas variables y los factores climáticos y estructurales de los rodales, incluyendo para ello técnicas LiDAR para caracterizar la diversidad estructural y espacial de las formaciones forestales.

Finalmente, se sentarán las bases para el desarrollo de una plataforma de simulación para predecir la multifuncionalidad forestal bajo distintos escenarios climáticos y de gestión. Este visor interactivo facilitará la transferencia de resultados y permitirá a gestores y propietarios forestales tomar decisiones informadas sobre estrategias de adaptación y resiliencia forestal.

4. Resultados esperados

El proyecto MULTIPINE persigue contribuir a la adaptación de los pinares autóctonos de *P. pinaster* al cambio climático, mejorando su resiliencia y multifuncionalidad bajo distintos escenarios de gestión y cambio climático. Concretamente, se espera:

1. Avanzar en el conocimiento sobre servicios ecosistémicos: Evaluar el impacto del cambio climático en el crecimiento forestal, fijación de carbono, producción de madera, resina y setas, así como en la biodiversidad estructural.
2. Modelos predictivos sensibles al clima: Incorporar datos meteorológicos y estructurales para predecir la dinámica de crecimiento de la masa forestal, permitiendo simulaciones precisas para escenarios futuros.
3. Soluciones basadas en ecología forestal: Desarrollar estrategias de gestión forestal adaptadas a condiciones climáticas inciertas, integrando información genética, competencia intra/interespecífica y técnicas innovadoras de modelización.
4. Evaluar de impactos socioeconómicos: Analizar cómo los cambios climáticos afectan la bioeconomía forestal y proponer medidas para mitigar riesgos en áreas rurales.
5. Herramientas de transferencia: Crear una plataforma interactiva de simulación para gestores forestales que facilite la toma de decisiones basada en datos y fomente la transición hacia una bioeconomía sostenible.

MULTIPINE se desarrollará mediante un enfoque colaborativo entre científicos, propietarios forestales, gestores y otros actores clave. Este enfoque garantizará que los resultados respondan a necesidades reales, promoviendo cambios transformadores en la gestión forestal que favorezcan la adaptación frente al cambio climático.

5. Agradecimientos

El proyecto MULTIPINE (PID2023-149226OA-I00) está financiado por MCIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE. Gracias a todo el personal del ICIFOR-INIA (CSIC), de CESEFOR y de la Universidad de Valladolid por la contribución en el establecimiento y mantenimiento de los ensayos experimentales objeto de estudio en el proyecto. El trabajo de Jorge Aldea fue financiado por la ayuda Ramón y Cajal RYC2021-033031-I, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades MCIN/AEI/10.13039/501,100,011,033 y por la Unión Europea mediante las ayudas "NextGenerationEU/PRTR".

6. Bibliografía

ADAME, P.; SERRADA, R.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, T.; CUADRADO, J.; SAN MIGUEL, A.; 2022. Modelling cork production in Quercus suber forests under climate change. FOREST ECOL MANAG 503: 119840.



ALFARO, R.I.; FADY, B.; VENDRAMIN, G.G.; DAWSON, I.K.; FLEMING, R.A.; SÁENZ-ROMERO, C.; LINDGREN, D.; MURDOCK, T.; VINCETI, B.; 2014. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *FOREST ECOL MANAG* 333: 76–87.

ALÍA, R.; CHAMBEL, M.R.; NOTIVOL, E.; GARCÍA-GIL, M.R.; BONTEMPS, A.; KLEIN, T.; MARTÍNEZ-MEIER, A.; 2024. Genetic variability and phenotypic plasticity in Mediterranean pines: adaptation to climate change. *BMC PLANT BIOL* 24: 121.

BLANCO, J.A.; LO, Y.H.; 2023. Addressing forest multifunctionality in a changing climate: the role of forest management and mixed-species stands. *CURR. FOR. REP.* 9: 45–57.

BLANCO, J.A.; ZAVALA, M.A.; IMBERT, J.B.; CASTILLO, F.J.; 2008. Sustainability of forest management practices under climate change in the Mediterranean region: insights from process-based models. *CAN J FOREST RES* 38(10): 2537–2549.

BROTONS, L.; AQUILUÉ, N.; DE CÁCERES, M.; FORTIN, M.-J.; FALL, A.; 2013. How fire history, fire suppression practices and climate change affect wildfire regimes in Mediterranean landscapes. *PLOS ONE* 8(5): e62392.

DE CÁCERES, M.; MARTIN-STPAUL, N.; TURCO, M.; CABON, A.; GRANDA, V.; CASALS, P.; COLL, L.; 2021. Mechanistic models for predicting forest responses to drought and climate change: the MEDFATE platform. *AGR.FOR.METEO.* 304–305: 108384.

FAO; 2020. The state of the world's forests 2020: forests, biodiversity and people. FAO – UNEP.

FICHTNER, A.; SCHNABEL, F.; VON OHEIMB, G.; HÄRDTLE, W.; 2017. Functional diversity of mixed forests enhances resistance to drought and insect pest outbreaks. *ECOL. LETT.* 20(6): 823–832.

IPCC; 2022. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. *Climate Change 2022* (Cambridge University Press).

OLIVER, C.D.; LARSON, B.C.; 1996. *Forest stand dynamics*. Wiley.

PRIETO-RECIO, C.; BRAVO, F.; KRAMER, K.; 2015. Evaluating climate change impacts on European forests through simulation. *FOREST ECOL MANAG* 342: 111–120.

VAN HALDER, I.; ROLO, V.; BARBEITO, I.; CAMARERO, J.J.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; PARDOS, M.; CONDÉS, S.; 2022. Mixed forests in Mediterranean mountains: a synthesis of effects on resilience to climate change. *AN. FOR. SCI.* 79: 14.