

Mortalidad arbórea inducida por sequía y olas de calor: evidencias y medidas de adaptación

INTRODUCCIÓN

Las sequías intensas y las olas de calor están aumentando en frecuencia e intensidad en gran parte del mundo como consecuencia del cambio climático, desencadenando procesos de decaimiento y mortalidad en el arbolado [1-7]. La mortalidad arbórea es un indicador de los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas forestales. Entre las zonas más afectadas están las regiones templadas y mediterráneas [8-9].

Es especialmente perjudicial para las plantas la combinación de olas de calor con episodios de sequía, cuya probabilidad de ocurrencia simultánea aumenta por el cambio climático [10]. Estos eventos combinados de sequía extrema y ola de calor están detrás del 46 % de sucesos de mortalidad registrados en Europa [11], donde la mortalidad asociada a sequías se duplicó entre 1984 y 2016 [1,12], y podría generalizarse [12]. En Cataluña, el porcentaje

de árboles muertos se duplicó en 2024 respecto a 2022-2023, principalmente por la sequía acumulada y el aumento de plagas y enfermedades, agravados por el cambio climático [13].

Sin embargo, la mortalidad vegetal inducida por olas de calor parece estar subestimada [2]. En el sur de Europa el aumento de la temperatura estival y del déficit de presión de vapor favorecen la aparición de estos eventos combinados, por lo que cabe esperar un aumento de mortalidad forestal en las próximas décadas [11].

Por tanto, los procesos de decaimiento y mortalidad en el arbolado están aumentando en frecuencia e intensidad, y seguirán incrementándose en el futuro como consecuencia del cambio climático, siendo esencial entender sus causas y aplicar medidas de adaptación para minimizar sus efectos en las masas forestales.

Álvaro Enriquez de Salamanca

*Ingeniero Técnico Forestal
y Doctor en Ciencias Ambientales
Draba Ingeniería y Consultoría
Medioambiental y Universidad
Complutense de Madrid*



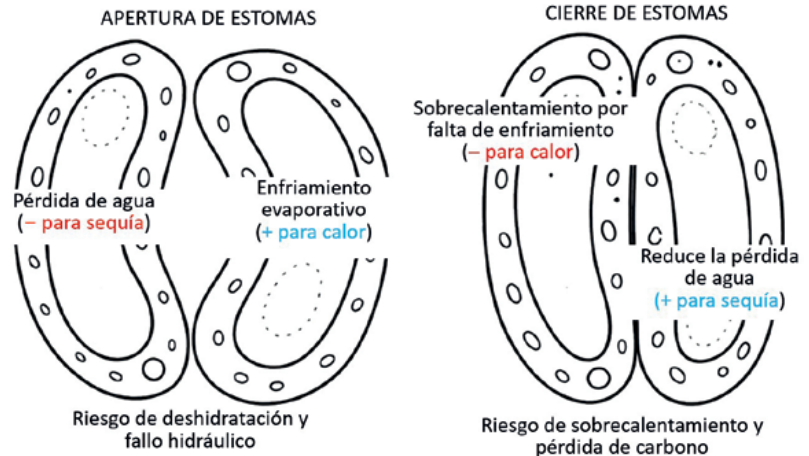
CAUSAS DE LA MORTALIDAD POR SEQUÍA Y CALOR

Las causas fisiológicas de la mortalidad por calor y sequía son una pérdida excesiva de agua por la alta permeabilidad cuticular y un elevado déficit de presión de vapor entre la hoja y el aire, que desencadenan eventos de cavitación repentinos y descontrolados; la combinación de estrés térmico e hídrico conlleva un riesgo de fallo hidráulico [14].

Un problema crítico en los vegetales ante olas de calor y sequía es la gestión de la transpiración, que permite evitar que las hojas se sobrecalienten gracias al enfriamiento evaporativo. Cuando el suministro de agua es suficiente, la transpiración permite a las plantas minimizar los daños foliares durante una ola de calor. Pero cuando se produce estrés térmico e hídrico simultáneo, si las plantas cierran los estomas para prevenir la deshidratación, se reduce la ganancia de carbono y el enfriamiento evaporativo, y si los abren para enfriar las hojas existe un riesgo de fallo hidráulico masivo y de deshidratación de los tejidos [10,15].

El desencadenamiento de estos procesos fisiológicos viene condicionado por una serie de factores intrínsecos y extrínsecos, como la especie, el tamaño de los árboles, la edad, la fenología, la densidad y competencia, el clima, la exposición solar, la orientación, la existencia de microclimas o la presencia de patógenos [16-18].

En cuanto a los factores climáticos, como se ha señalado, resulta especialmente nociva la concurrencia de olas de calor y sequía, algo habitual en los veranos mediterráneos. La duración de una sequía para desencadenar la mortalidad en diferentes especies es variable, difiriendo hasta en 20 semanas, aunque cuando coincide con una ola de calor se acelera aproximadamente una semana [5]. En condiciones de sequía, las especies de zonas



cálidas mueren antes que las de zonas frías, porque las temperaturas bajas amortiguan la pérdida de humedad, pero si se produce una ola de calor combinada con sequía, aumenta la mortalidad en especies de alta montaña [5]. En encinares se observa que la resistencia es significativamente menor en condiciones semiáridas [19]. En el Mediterráneo, los bosques dominados por fagáceas tienen mayor resiliencia estructural que los dominados por coníferas [3]. En la península ibérica, la mayor vulnerabilidad por tipo de vegetación se da en formaciones en mosaico de árboles y matorral y en bosques de coníferas, y por ubicación geográfica, en masas situadas en el centro de Portugal y en el este y noreste de España [4].

La densidad y competencia en las masas es también un factor esencial. El efecto combinado de una competencia intensa y de la sequía incrementa la intensidad de los episodios de decaimiento y mortalidad arbórea [7]. Con temperaturas elevadas, la mortalidad aumenta para la mayoría de especies, sobre todo con niveles altos de competencia y en planifolias, lo que indica que los bosques ibéricos de

Efectos de la apertura y cierre de estomas

El desencadenamiento de estos procesos fisiológicos viene condicionado por una serie de factores intrínsecos y extrínsecos, como la especie, el tamaño de los árboles, la edad, la fenología, la densidad y competencia, el clima, la exposición solar, la orientación, la existencia de microclimas o la presencia de patógenos



elevada densidad son particularmente vulnerables al cambio climático [16]. La influencia de la competencia en la mortalidad varía según la especie; un estudio en masas mixtas de pino, picea y abedul mostró que en zonas cálidas se incrementaba la mortalidad del pino y se favorecía la supervivencia del abeto y el abedul [17]. En encinares ibéricos, los efectos de la sequía fueron especialmente negativos en masas densas, por la fuerte competencia por los recursos hídricos [19].

Con referencia a la edad, se ha identificado a nivel mundial una mayor mortalidad de árboles grandes por sequía, por su mayor vulnerabilidad al estrés hidráulico, mayor exposición a la radiación y a la demanda evaporativa en copas dominantes y mayor incidencia de xilófagos [20]. Los árboles longevos o de crecimiento lento pueden sufrir mayor riesgo ante el cambio climático que las especies con recambio hidráulico más rápido [35].

Respecto al origen de las masas, las plantaciones forestales parecen ser más vulnerables al estrés inducido por factores bióticos y abióticos que los bosques regenerados de forma natural [34].

La estructura del dosel influye también en la mortalidad durante sequías. En California se detectó una mortalidad arbórea segmentada, menor en árboles jóvenes, mayor en los adultos, pero de nuevo menor en los de mayor talla; además, los árboles sombreados por vecinos más altos experimentaron menor mortalidad, por la menor exposición a la radiación solar y la menor evapotranspiración [6].

CONSECUENCIAS DE LA MORTALIDAD POR SEQUÍA Y CALOR

El aumento en la frecuencia, intensidad y duración de las sequías y olas de calor, y su concurrencia cada vez más habitual, desencadenan procesos de decaimiento y mortalidad que suponen un reto para la gestión forestal.

En primer lugar, los eventos de sequía y calor pueden desencadenar una mortalidad súbita, o un decaimiento que, según los casos, puede terminar derivando en la muerte, o permitir la recuperación del arbolado. Tras un evento de elevada mortalidad, la recuperación de las masas forestales depende de las especies, la ubicación, y la estructura previa de la masa. Las masas con mayor área basimétrica, estratos intermedios y regenerado avanzado dan lugar a menos claros y recuperan antes el dosel [3]. Un riesgo importante ante un evento masivo de decaimiento es la proliferación de plagas de insectos, que pueden desencadenar una mortalidad secundaria [3,22].

Un aspecto relevante es que la regeneración natural de las especies dominantes tras episodios de mortalidad inducida por sequía no está garantizada, aumentando de forma notable el porcentaje de zonas rasas tras estos eventos [3]. En algunas zonas, el decaimiento inducido por sequía desencadena una transición de los bosques hacia una composición vegetal adaptada a las nuevas condiciones climáticas locales derivadas del cambio climático [9].

Algunos autores han identificado efectos posi-

Tras un evento de elevada mortalidad, la recuperación de las masas forestales depende de las especies, la ubicación, y la estructura previa de la masa. Las masas con mayor área basimétrica, estratos intermedios y regenerado avanzado, dan lugar a menos claros y recuperan antes el dosel



tivos asociados al decaimiento o mortalidad de las masas forestales, como el aumento de la madera muerta, que favorece una mayor biodiversidad [8], o mayores oportunidades de expansión para especies adaptadas como *Tetraclinis articulata*, al reducirse la competencia con *Pinus halepensis* [23].

MEDIDAS DE ADAPTACIÓN

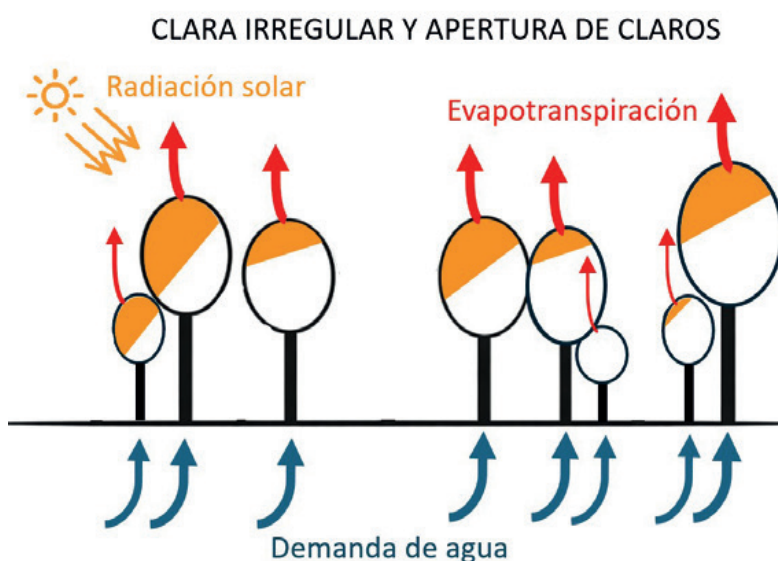
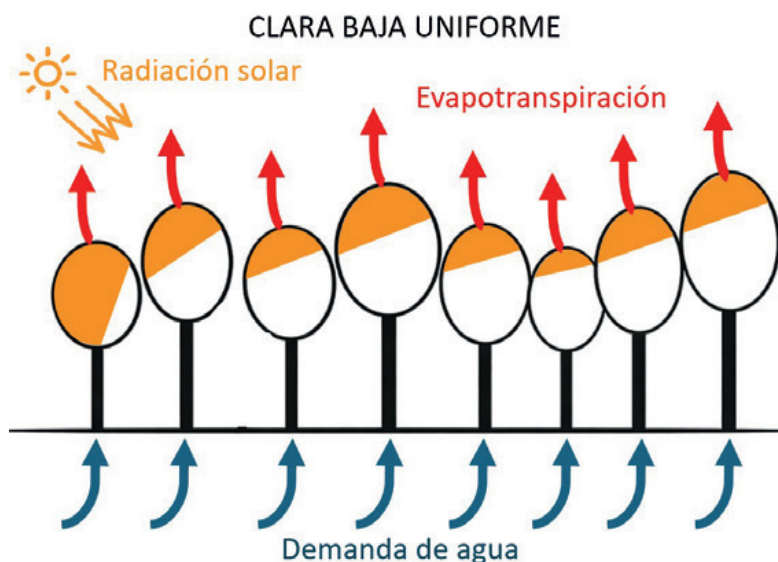
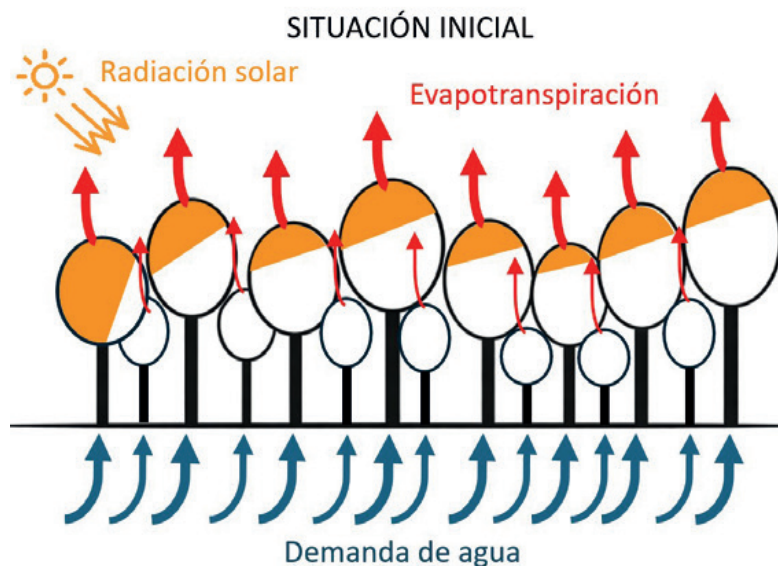
La adaptación de las masas forestales frente a la sequía y las olas de calor incluye diversas medidas, como reducir la densidad, modificar la estructura del dosel, incrementar los claros y aumentar la mezcla de especies y los genotipos adaptados al clima futuro, por medio del fomento de la regeneración natural, migración asistida y plantaciones [24,25].

Reducción de la densidad

La actuación selvícola más ampliamente propuesta para prevenir la mortalidad por sequía y calor es la reducción de la densidad, y con ello de la competencia, incrementando la disponibilidad de agua para los pies remanentes. Esta reducción de la competencia se logra mediante claras, clareos y resalveos, combinados con la apertura de huecos, que disminuyen el consumo total de agua del rodal, aumentan el vigor de los árboles dominantes y limitan el decaimiento [24]. Diversos estudios a nivel mundial certifican que estos tratamientos redujeron la mortalidad, aumentando la resistencia y resiliencia frente a la sequía, reduciendo adicionalmente la intensidad de los incendios y la susceptibilidad a insectos y patógenos [26-28]. En España se han propuesto clareos muy intensos en regenerados postincendio de *Pinus halepensis*, para reducir la competencia, mejorar la disponibilidad hídrica, aumentar el vigor y reforzar la resiliencia frente a sequías e incendios, especialmente en zonas semiáridas y secas [30]. Experiencias con varias especies de pino (*Pinus halepensis*, *P. nigra*, *P. sylvestris*) concluyen que las claras mejoran el crecimiento bajo condiciones de sequía, aumentan la resiliencia y mejoran la capacidad para afrontar el estrés hídrico [21,33].

La eficacia de las claras y los clareos depende del tipo de masa, la edad y el tiempo desde la intervención; en frondosas reducen las pérdidas durante la sequía, mientras que en coníferas favorecen sobre todo la recuperación posterior [29]. Los beneficios disminuyen con el envejecimiento de la masa y en ambientes áridos, sobre todo en masas con baja densidad [26,29].

No obstante, los clareos no deben promoverse como una herramienta universal para fomentar la resistencia y la resiliencia de los bosques [27]. La reducción de la densidad disminuye el consumo hídrico, pero aumenta la exposición a la radiación solar, un factor importante en la mortalidad [6]; no obstante, un estudio concluyó que tras las claras no se incrementa la mortalidad en los árboles dominantes, que suelen quedar más expuestos a la radiación



tras la intervención [28]. La resiliencia de las masas forestales pasa por disponer de un “banco de reemplazo” que rellene rápidamente los huecos, algo

Ejemplos de tratamientos selvícolas para adaptación a sequías y olas de calor y sus efectos

que se pierde con claras intensas que uniformicen la masa [3].

Cambios en la estructura de la masa

La estructura del dosel tiene una gran influencia a escala local en la mortalidad arbórea por sequía, debiendo buscarse una heterogeneidad estructural para aumentar la resiliencia [6]. La realización de claras, clareos y resalveos debe servir no solo para reducir la densidad de la masa, sino también para fomentar estructuras de mayor complejidad y diversidad funcional, más irregulares, que resulten más resilientes [3]. Al realizar esos tratamientos se debe fomentar la apertura de huecos, la irregularidad de la masa, y la presencia de un “banco de reemplazo” que pueda colonizar rápidamente los huecos [3,24]. Una gestión adaptativa eficaz no debe centrarse solo en reducir competencia, sino en conservar complejidad estructural y diversidad funcional antes de que ocurran eventos extremos [3].

Se ha demostrado que la eliminación del dosel superior en rodales mixtos de *Picea*, *Abies* y *Fagus* aumentó la resiliencia al estrés hídrico y redujo la mortalidad por sequía [32]. Un estudio en una zona de selva sometida a sequía durante dos décadas mostró una elevada mortalidad arbórea los primeros 15 años, pero la pérdida de los árboles de mayor tamaño incrementó la disponibilidad de agua para los restantes, haciendo que dejaran de experimentar estrés hídrico [33].

Cambios en la composición de las masas

Para gestionar masas forestales sometidas a sequía y olas de calor es preciso identificar los límites biofísicos de las especies vegetales, ya que algunas de ellas, en especial las situadas en su límite ecológico, pueden ser ya incapaces de tolerar déficits hídricos repetidos. Para lograr una adecuada adaptación de las masas a los eventos de sequía y calor puede ser preciso sustituir las especies principales, o como mínimo aumentar la diversidad de especies, y favorecer genotipos adaptados al clima futuro, para disminuir el estrés hídrico y la mortalidad [25].

Las claras y clareos pueden aprovecharse para favorecer la migración asistida [27]; en masas con mortalidad activa o en el límite meridional de su distribución, claras selectivas pueden favorecer a las especies mejor adaptadas, y facilitar una sustitución progresiva [24]. Se ha detectado que la eliminación de *Pinus sylvestris* favorece el crecimiento de *Quercus pubescens* en Cataluña [31], y que la mortalidad de *Pinus halepensis* puede favorecer a *Tetraclinis articulata* en Murcia [23].

Diversas experiencias en varios países europeos están reemplazando repoblaciones monoespecíficas de coníferas por combinaciones de frondosas y coníferas, fomentando estructuras irregulares con varios estratos y edades, y también están probando especies y procedencias más resistentes al clima futuro mediante plantaciones experimentales en zonas vulnerables [34].

Para gestionar masas forestales sometidas a sequía y olas de calor es preciso identificar los límites biofísicos de las especies vegetales, ya que algunas de ellas, en especial las situadas en su límite ecológico, pueden ser ya incapaces de tolerar déficits hídricos repetidos



CONCLUSIÓN

La concurrencia de sequías extremas y olas de calor pone a los vegetales en una situación extrema, que a menudo deriva en eventos de mortalidad arbórea extensos. El cambio climático hace cada vez más frecuente esa concurrencia, en especial en el mediterráneo, donde cabe esperar una mayor frecuencia en el futuro de estos episodios de mortalidad. Por ello, es esencial aplicar una gestión forestal encaminada a la adaptación de las masas.

La reducción de la densidad mediante claras,

clareos y resalveos, así como la desaparición de los árboles mayores, aumenta la disponibilidad de agua, aunque puede incrementar también la insolación. Estos tratamientos deben buscar crear masas irregulares y con claros, y garantizar la existencia de regenerado. Además, es preciso promover cambios en la composición de las masas, aumentando la diversidad específica y fomentando la presencia de especies y ecotipos adaptados a las condiciones climáticas futuras esperables.

Referencias

1. Senf C, Buras A, Zang CS et al. 2020. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nat Commun* 11: 6200.
2. Breshears DD, Fontaine JB, Ruthrof KX et al. 2021. Underappreciated plant vulnerabilities to heat waves. *New Phytol* 231(1): 32–39.
3. Lloret F, Jaime LA, Margalef-Marrase J et al. 2022. Short-term forest resilience after drought-induced die-off in Southwestern European forests. *Sci Total Environ* 806(4): 150940.
4. Bento VA, Russo A, Vieira I et al. 2023. Identification of forest vulnerability to droughts in the Iberian Peninsula. *Theor Appl Climatol* 152: 559–579.
5. Lalor AR, Law DJ, Breshears DD et al. 2023. Mortality thresholds of juvenile trees to drought and heatwaves: implications for forest regeneration across a landscape gradient. *Front For Glob Change* 6: 1198156.
6. Ma Q, Su Y, Niu C et al. 2023. Tree mortality during long-term droughts is lower in structurally complex forest stands. *Nat Commun* 14: 7467.
7. Rebollo P, Moreno-Fernández D, Cruz-Alonso V et al. 2024. Recent increase in tree damage and mortality and their spatial dependence on drought intensity in Mediterranean forests. *Landsc Ecol* 39: 38.
8. Chowdhury FI, Lloret F, Jaime L et al. 2024. Deadwood and tree-related microhabitat's abundance and diversity are determined by the interplay of drought-induced die-off and local climate. *For Ecol Manag* 563: 121989.
9. Chowdhury FI, Espelta JM, Margalef-Marrase J et al. 2025. Drought-induced die-off triggers species composition shift at warmer and drier edges of climate gradient in *Pinus sylvestris* forests of Catalonia (NE Spain). *Eur J For Res* 144: 727–739.
10. López R, Ramírez-Valiente JA, Pita P. 2022. How plants cope with heatwaves in a drier environment. *Flora* 295: 152148.
11. Gazol A, Camarero JJ. 2022. Compound climate events increase tree drought mortality across European forests. *Sci Total Environ* 816: 151604.
12. Senf C, Pflugmacher D, Zhiqiang Y et al. 2018. Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades. *Nat Commun* 9: 4978.
13. Rodríguez O, Heras J, Ribai JM et al. 2025. *Xarxa de seguiment dels boscos de Catalunya* 8x8CAT 2024. Generalitat de Catalunya.
14. Cochard H. 2021. A new mechanism for tree mortality due to drought and heatwaves. *Peer Community J* 1: e36.
15. Marchin RM, Backes D, Ossola A et al. 2022. Extreme heat increases stomatal conductance and drought-induced mortality risk in vulnerable plant species. *Glob Change Biol* 28(3): 1133–1146.
16. Ruiz-Benito P, Gómez-Aparicio L, Lines ER et al. 2015. Efectos del clima y la estructura del rodal sobre procesos de mortalidad en los bosques ibéricos. En: Herrero A, Zavala MA, (eds.). *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España*, pp. 225–233. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.
17. Condés, S., Bielak, K., Brazaitis, G. et al. 2025. Influence of species interactions and climate on tree mortality in mixed stands of *Pinus sylvestris*, *Betula* spp., and *Picea abies*. *Eur J For Res* 144: 909–924.
18. Sibley A, Still C, Gregory M et al. 2025. Extreme heatwave causes immediate, widespread mortality of forest canopy foliage, highlighting modes of forest sensitivity to extreme heat. *Glob Change Biol* 31(11): e70571.
19. Moreno-de-las-Heras M, Bochet E, Vicente-Serrano SM et al. 2023. Drought conditions, aridity and forest structure control the responses of Iberian holm oak woodlands to extreme droughts: large-scale remote sensing. *Sci Total Environ* 901: 165887.
20. Bennett A, McDowell N, Allen C et al. 2015. Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Nature Plants* 1: 15139.
21. Navarro-Cerrillo RM, Cachinero-Vivar AM, Pérez-Priego Ó et al. 2023. Developing alternatives to adaptive silviculture: thinning and tree growth resistance to drought in a *Pinus* species on an elevated gradient in Southern Spain. *For Ecol Manag* 537: 120936.
22. Anderegg WRL, Hicke JA, Fisher RA et al. 2015. Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytol* 208(3): 674–683.
23. Moya-Pérez JM, Carreño MF, Esteve-Selma MÁ. 2021. Enhancing the resilience of a Mediterranean forest to extreme drought events and climate change: *Pinus—Tetraclinis* forests in Europe. *Forests* 12(4): 487.
24. Coll L. 2023. Retos selvícolas para afrontar la adaptación de los bosques al cambio climático. *Cuad Soc Esp Cienc For* 49(2): 77–100.
25. Nagel LM, Janowiak MK, Clark PW et al. 2026. Ten years of adaptive silviculture for climate change: an applied, coproduced experimental framework. *BioScience* 76(2): 157–170.
26. D'Amato AW, Bradford JB, Fraver S et al. 2013. Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. *Ecol Appl* 23(8): 1735–1742.
27. Moreau G, Chagnon C, Achim A et al. 2022. Opportunities and limitations of thinning to increase resistance and resilience of trees and forests to global change. *Forestry* 95(5): 595–615.
28. Willig J, Schwarz J, Comeau P et al. 2025. No increased drought-related mortality after thinning: a meta-analysis. *Ann For Sci* 82: 6.
29. Sohn JA, Saha S, Bauhus J. 2016. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: a meta-analysis. *For Ecol Manag* 380: 261–273.
30. Díaz A, Vázquez-Camaño M, Riesco-Amurrio M et al. 2025. Silvicultura adaptativa en los bosques mediterráneos de *Pinus halepensis*. *Cuad Soc Esp Cienc For* 50(1): 185–196.
31. Buscà S, Pascual D, Pla E et al. 2025. Adapting forests to climate change: an experiment to promote different tree species in mixed Scots pine forests (*Pinus sylvestris* L.). *Ann For Sci* 82: 21.
32. Zamora-Pereira JC, Yousefpour R, Cailleret M et al. 2021. Magnitude and timing of density reduction are key for the resilience to severe drought in conifer-broadleaf mixed forests in Central Europe. *Ann For Sci* 78: 68.
33. Sánchez-Martínez P, Martius LR, Bittencourt P et al. 2025. Amazon rainforest adjusts to long-term experimental drought. *Nat Ecol Evol* 9: 970–979.
34. Lindner M, Schwarz M, Spathelf P et al. 2020. *Adaptation to climate change in sustainable forest management in Europe*. Forest Europe, Zvolen.
35. Deans RM, Meir P, Dewar RC et al. (2026). Evolutionary trade-offs under stochastic water stress shape xylem vulnerability to drought. *Proc Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 123(10): e2516579123.