



2022
Lleida

27 · 1
junio · juny
juliol · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales



Organiza

Las claras reducen la vulnerabilidad a la sequía en repoblaciones de pinares

MANRIQUE-ALBA, À.¹, BEGUERÍA, S.¹ y CAMARERO, J.J.²

¹ Experimental Aula Dei (EEAD-CSIC), Zaragoza, Spain.

² Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC), Zaragoza, Spain.

Resumen

Entre los efectos del cambio climático, se prevé una mayor frecuencia e intensidad de periodos cálidos y secos con un efecto negativo sobre la productividad y el crecimiento de los bosques. Por ello existe un gran interés en conocer su vulnerabilidad a la sequía. Para ello se calcularon índices Resistencia, Recuperación, Resiliencia y tiempo para la recuperación sobre datos de crecimiento radial de repoblaciones de tres especies de pinos (*Pinus halepensis*, *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*) sometidas a diferentes intensidades de aclareo. Se ajustaron modelos mixtos y se simuló las trayectorias de crecimiento en condiciones de sequía y sin sequía. Los resultados muestran un mayor crecimiento de las parcelas aclaradas y como el efecto positivo del aclareo, a pesar de disminuir con el tiempo, es efectivo hasta 15-20 años después del tratamiento. Las claras incrementaron la resistencia y la resiliencia, aunque la recuperación (el incremento de crecimiento posterior a la sequía) disminuyó. El tiempo necesario para la recuperación duró un año menos en las parcelas aclaradas que en las no aclaradas. En conclusión, las claras, redujeron la dependencia del crecimiento de la sequía y mejoraron la resiliencia.

Palabras clave

Crecimiento secundario, dendroecología, resiliencia, *Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris*.

1. Introducción

Entre los efectos del cambio climático, se prevé una mayor frecuencia e intensidad de los periodos cálidos y secos que podrían afectar drásticamente a la productividad y el crecimiento radial de los bosques al incrementar el estrés por sequía (Vicente-Serrano et al. 2013, Babst et al. 2019). Algunos estudios señalan la evidencia de eventos generalizados de decaimiento y mortalidad y disminución del crecimiento de los bosques provocados por la sequía en las últimas décadas, lo que sugiere una mayor vulnerabilidad de los bosques al aumento del déficit hídrico (Allen et al., 2010). Por lo tanto, se considera importante la mejora del conocimiento sobre los efectos de la sequía sobre el crecimiento de los árboles y su capacidad de recuperación o resiliencia, para tantas especies y condiciones climáticas como sea posible (Gazol et al., 2018, 2020).

Los conceptos de resistencia a la sequía (la capacidad de soportar la sequía con la mínima reducción del crecimiento), resiliencia (la capacidad de mantener el crecimiento después de la sequía) y recuperación (la capacidad de recuperar las tasas de crecimiento normales) se han utilizado para estudiar la recuperación del crecimiento tras la sequía y para inferir la vulnerabilidad de los bosques (Lloret et al., 2011; Nikinmaa et al., 2020; Schwarz et al., 2020; Castagneri et al., 2021).

Muchos estudios han utilizado variables que miden el crecimiento radial como la anchura de los anillos o el incremento anual de área basimétrica (BAI) combinadas con datos climáticos para evaluar la vulnerabilidad de los bosques a la sequía (véase la revisión en Nikinmaa et al. 2020). En los últimos años ha aumentado la literatura sobre los índices de vulnerabilidad a la sequía de los ecosistemas basados en datos dendroecológicos. Uno de los enfoques más utilizados es el de Lloret et al. (2011), donde se definen los índices de resistencia, recuperación y resiliencia a la sequía basándose en el crecimiento observado antes, durante y después de una sequía.

Este tipo de enfoques se basan en determinar las desviaciones del crecimiento de los árboles con respecto a las tasas de crecimiento anteriores, que se consideran normales. Se presupone que

los años anteriores y posteriores a la sequía representan condiciones normales, por lo que el crecimiento sólo se ve afectado por la perturbación de la sequía. Sin embargo, este enfoque no tiene en cuenta lo favorables o desfavorables que fueron climáticamente los años anteriores y posteriores a la sequía y tampoco considera que no todas las sequías son iguales, ignorando aspectos relevantes como la intensidad, el momento y la duración de la sequía (Anderegg et al., 2013). Finalmente, hay otras cuestiones que dificultan el uso de este tipo de índices, como la selección de la duración adecuada de los períodos anteriores y posteriores a la sequía. Además, estos índices son susceptibles a las diferencias en el comportamiento de las especies o la sensibilidad a la sequía (Schwarz et al., 2020). Por todo lo expuesto la comparación entre estudios resulta complicada.

Para eliminar este tipo de problemas, una alternativa utilizada en varios trabajos es el uso de modelos (Martínez-Vilalta et al., 2012; Thurm et al., 2016; Trouvé et al., 2017; Kannenberg et al., 2019; Ovenden et al., 2021), con los que se estima el crecimiento esperado sin sequía y se compara con el crecimiento observado. Aunque este enfoque parece una mejor opción, también se basa en el crecimiento observado, por lo que el efecto climático tampoco se tiene en cuenta. Otro inconveniente es que, al igual que ocurre con los índices originales, la evaluación se limita a un número reducido de episodios de sequía ocurridos durante el periodo de estudio.

Nuestra propuesta consiste en utilizar los modelos de crecimiento para, una vez ajustados, realizar predicciones de crecimiento con condiciones de sequía y sin sequía, en lugar de valores de usar datos de crecimiento observado; de esta forma se evita la variabilidad climática aleatoria. Cuando se diseñan y calibran cuidadosamente, los modelos permiten simular episodios de sequía de intensidad y duración preestablecidas, seguidos de una sucesión de años normales, controlando al mismo tiempo otros factores relevantes como las tendencias o la autocorrelación temporal. Calculando las trayectorias de crecimiento de la sequía y de la post-sequía (Figura 1A), es posible determinar la pérdida de crecimiento inducida por la sequía (R_t , resistencia), la pérdida de crecimiento posterior a la sequía (R_c , recuperación) y la recuperación posterior a la sequía (R_s , resiliencia). Además de estos tres índices propuestos por Lloret et al. (2011), las trayectorias también permiten determinar el tiempo de recuperación (TR), como el tiempo necesario para alcanzar un crecimiento normal o casi normal después de la perturbación climática (Thurm et al., 2016).

Además, los modelos de crecimiento, permiten comparar las trayectorias de crecimiento previsiblemente diferentes, entre parcelas aclaradas y no aclaradas antes y después de la gestión forestal mientras se controlan las condiciones climáticas (Figura 1B). Por ejemplo, la línea roja de la figura 1B representa una parcela gestionada que experimenta una menor reducción del crecimiento por sequía (mayor resistencia) después del tratamiento y un retorno más rápido al crecimiento normal (mayor resistencia y menor tiempo de recuperación).

Aplicamos este método a un caso de estudio que incluye diferentes condiciones climáticas y especies de pinos. Para ello, ajustamos un modelo de regresión de crecimiento radial (BAI, incremento de área basimétrica) en función del clima, el crecimiento del año anterior (autocorrelación), la tendencia de crecimiento a largo plazo y la gestión (clara). Una vez ajustados a los datos observados, los modelos permiten simular las trayectorias de crecimiento tras la clara y tras una sequía, para cada lugar y tratamiento.

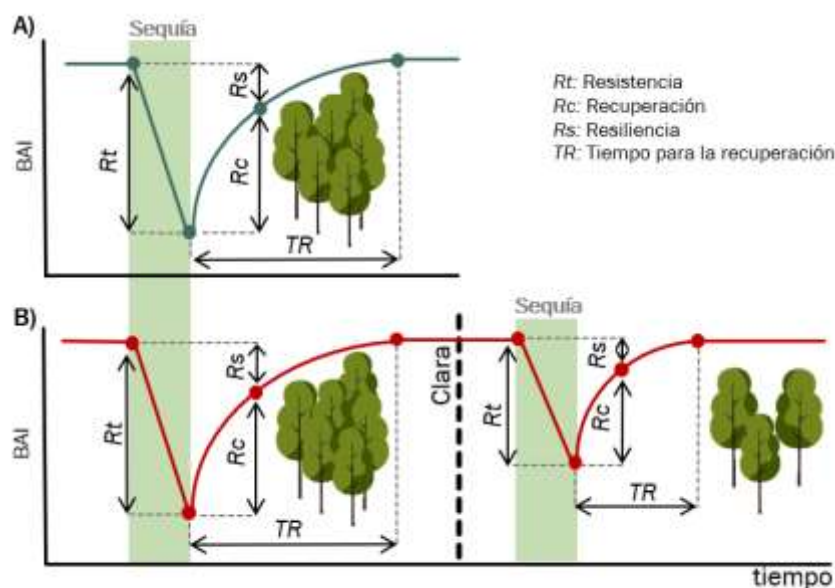


Figura 1. Modelo conceptual de vulnerabilidad a la sequía basado en las trayectorias de crecimiento de los árboles durante y después de una sequía. (1) El eje y representa el crecimiento de los árboles (BAI, incremento del área basimétrica), el eje x representa el tiempo en años. Las diferencias de crecimiento en puntos temporales específicos permiten calcular la resistencia a la sequía (R_t), la resiliencia (R_s) y la recuperación (R_c), mientras que la trayectoria ascendente permite determinar el tiempo para la recuperación (TR). (2) Se representan dos sequías de igual magnitud antes y después de un tratamiento de gestión (línea vertical discontinua) en parcelas no aclaradas (línea azul) y aclaradas (línea roja).

2. Objetivos

Los objetivos de esta investigación consisten en: (1) proponer un marco estadístico para calcular con precisión la resistencia a la sequía, la resiliencia, la recuperación y tiempo de recuperación a partir de datos de BAI; y (2) aplicar este marco a un caso de estudio para examinar las posibles diferencias entre tres especies de pinos con diferente vulnerabilidad a la sequía (*Pinus halepensis* Mill., *Pinus nigra* Arn. y *Pinus sylvestris* L.) y que habitan zonas de condiciones climáticas contrastadas (sitios xéricos vs. méxicos) en plantaciones aclaradas y no aclaradas.

3. Metodología

Diseño experimental

Se recopilaban datos de crecimiento radial de cinco sitios experimentales situados en el este de España (provincia de Zaragoza), incluyendo tres especies de pinos ampliamente distribuidos por la cuenca mediterránea: *Pinus halepensis* Mill., *Pinus nigra* Arn. y *Pinus sylvestris* L. Entre los sitios aparecen representados climas de condiciones más xéricas (balance hídrico anual de -577 mm) o méxicos (balance hídrico anual de -105 mm).

Para caracterizar las condiciones climáticas, se utilizaron la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración de referencia (ETo) cuasi-semanales (cuatro registros por mes) que abarcan el período 1961-2020 a partir de un conjunto de datos de cuadrícula de 1 km (Vicente-Serrano et al., 2017; Tomas-Burguera et al., 2019). La temperatura media anual oscila entre 11,0 y 12,4°C, siendo los sitios de *P. sylvestris* los más fríos. La precipitación media anual oscila entre 350 y 1060 mm, siendo el balance hídrico medio anual (precipitación menos evapotranspiración potencial), que varió entre -105 y -577 mm (Tabla 1), el más negativo en el sitio de *P. halepensis*. Los tratamientos de clara se realizaron en diferentes años e incluyeron diferentes intensidades (Tabla 1), lo que permitió la comparación de al menos dos tratamientos. De acuerdo con Del Río et al. (2017), los tratamientos de clara se clasificaron en base al porcentaje de área basimétrica eliminada en el clareo, como moderados (20-35%) y fuertes (>35%).

Tabla 1. Características principales de los sitios de estudio y los tratamientos (NT, no tratadas; M, intensidad tratamiento moderado; F, intensidad tratamiento fuerte). Se presentan valores medios.

Variables	Tarazona			Urriés		Monte Alto		Orcajo		Añón	
Especie	<i>P. halepensis</i>			<i>P. nigra</i>		<i>P. nigra</i>		<i>P. sylvestris</i>		<i>P. sylvestris</i>	
Tratamiento	NT	M	F	NT	F	NT	F	NT	M	NT	F
Años de clara	1998			2006		2003		2001		1998	
Edad media (años)	51			44		41		77		83	
Diámetro a 1,3 m (cm)	13,6	14,5	14,6	15,9	26,5	15,3	21	25,6	31,8	27,03	30,78
Altura (m)	9,2	9,3	8,9	12,8	13,9	12,3	12,0	9	9	10,25	10
Densidad (pies ha ⁻¹)	2000	1050	975	1879	414	1783	573	1150	570	1274	541
Area basimétrica (m ² ha ⁻¹)	31,0	21,3	15,5	80	42	68	41	59,48	45,4	74,2	38,5
Temperatura (°C)	12,2			12,4		12,2		11,0		11,0	
Precipitación (mm)	533			936		969		559		639	
ETo (mm)	1110			1086		1075		1028		1078	
Balance hídrico anual (mm)	-577			-150		-105		-469		-439	

Muestreo y análisis dendrocronológico

Se obtuvieron datos de anchura de los anillos anuales de crecimiento de *P. halepensis*, *P. nigra* y *P. sylvestris* en los cinco sitios de estudio. Se seleccionaron entre 12 y 15 árboles por tratamiento y en total se analizaron un total de 330 muestras de 165 árboles. Las muestras se tomaron de árboles dominantes y maduros que no presentaban signos visibles de daños. Se extrajeron dos testigos radiales por árbol a la altura del pecho (1,3 m) y separados por 180°. Posteriormente, los testigos se secaron, pegaron en soportes, lijaron y dataron visualmente siguiendo los procedimientos dendrocronológicos (Fritts, 2001). Después se midió su anchura con resolución de 0,01 mm usando un medidor semi-automático Lintab-TSAP. Se midió el diámetro a 1,3 m de todos los árboles extraídos y la altura total de cinco árboles seleccionados por parcela utilizando cintas y clinómetros, respectivamente, con dos mediciones por árbol para obtener los parámetros medios básicos del rodal.

Los valores de la anchura de los anillos se convirtieron en incremento en sección normal (BAI) para cuantificar las variaciones de crecimiento entre años y tratamientos. Los años anteriores a 1980 no se consideraron en el análisis estadístico debido al efecto juvenil en el BAI observado en algunos árboles.

Índice de sequía

Se ha elegido el índice SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) para caracterizar las condiciones hídricas de cada estación de crecimiento (Vicente-Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2014). El SPEI cuantifica el balance hídrico climático, que es la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración de referencia, como una variable estandarizada comparable en el tiempo y el espacio. Los datos de precipitación y evapotranspiración de referencia corresponden a los dos conjuntos de datos de cuadrícula de 1,1 km antes mencionados (Vicente-Serrano et al., 2017; Tomás-Burguera et al., 2019).

Se seleccionaron los puntos de esta cuadrícula más cercanos a las coordenadas de los sitios de estudio. A continuación, se calcularon las series temporales semanales de SPEI utilizando el paquete SPEI para R (Beguería y Vicente-Serrano, 2017), a escalas temporales entre 1-18 meses. Las escalas temporales de agregación del SPEI representan el lapso de tiempo utilizado para calcular los índices; por ejemplo, una escala temporal de 6 meses significa que los datos que incluyen los seis meses anteriores se utilizan para calcular el SPEI de una determinada semana. La combinación de la semana del año y la escala temporal de agregación permite encontrar el periodo dentro de la época de crecimiento en el que la influencia climática es más fuerte.

Los diferentes años se clasificaron como secos y húmedos según los valores del índice SPEI. Se clasificó como año seco cuando $SPEI = -1,28$, este valor corresponde a un periodo medio de retorno de diez años, y se suele considerar que define condiciones extremadamente secas; y húmedo, cuando $SPEI = 1,28$.

Modelización

Se ajustaron cinco modelos lineales generalizados de efectos mixtos (GLMM), uno por sitio de estudio, con el BAI como variable de respuesta. Como efectos fijos, se incluyeron tres variables: una variable temporal centrada y escalada (Tiempo), el logaritmo natural del BAI del año anterior (BAIprev) y el SPEI del año en curso. La variable Tiempo representa los efectos a largo plazo en el BAI, como un descenso o aumento progresivo. El BAIprev tiene en cuenta la autocorrelación temporal que suele estar presente en datos de anillos de árboles. Por último, el SPEI tuvo en cuenta el efecto de la sequía sobre el crecimiento. Una descripción más detallada del modelo se puede encontrar en Manrique-Alba et al. (2022). Los datos se introdujeron para cada árbol individualmente, y el árbol se utilizó en el modelo como efecto aleatorio, controlando así la variabilidad entre individuos. Se utilizó la distribución Gamma con un enlace logarítmico para relacionar el predictor lineal con la media condicional de la respuesta. Por lo tanto, para la observación $i = 1, \dots, I$ correspondiente al sujeto (árbol) $s = 1, \dots, S$ en el tratamiento $t = (\text{no aclarado, moderado, fuerte})$ el modelo completo toma la siguiente forma:

$$E(BAI|i, s, t) \sim \text{Gamma}(\mu_{i,s,t}, \nu) \quad (1)$$

$$\mu_{i,s,t} = e^{\beta_{0,t} + \beta_{1,t} \text{Tiempo}_i + \beta_{2,t} \log(BAI_{prev_i}) + \beta_{3,t} SPEI_i + \nu_s}$$

con $(\beta_{0,t}, \beta_{1,t}, \beta_{2,t}, \beta_{3,t}) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma)$ como coeficientes del modelo (efectos fijos), $\nu \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ como efecto aleatorio univariante y ν como parámetro de dispersión (error aleatorio). La significación de las diferencias entre los tratamientos se determinó mediante comparación por pares en las medias marginales estimadas, mediante pruebas t a un nivel de significación de $\alpha = 0,05$.

Simulación de las trayectorias de crecimiento

Después de ajustar los modelos de regresión, se simulan las trayectorias de crecimiento, BAI', utilizando los parámetros de efectos fijos ajustados y una ecuación recursiva sobre $n = 1, \dots, N$ pasos de tiempo:

$$BAI'_{n,t} = e^{\beta_{0,t} + \beta_{1,t} \text{Tiempo}_n + \beta_{2,t} \log(BAI'_{n-1,t}) + \beta_{3,t} SPEI_n} \quad (2)$$

Se simularon las trayectorias de crecimiento tras la clara utilizando unas condiciones climáticas estacionarias y neutras ($SPEI=0$). Esta simulación permite evaluar los efectos a corto y largo plazo de la clara, incluyendo la desaparición progresiva de los efectos del tratamiento con el tiempo.

También se ha modelizado la recuperación del crecimiento tras la sequía para evaluar la vulnerabilidad a la misma. La simulación se realizó con un año seco utilizando $SPEI = -1,28$ seguido de nueve años neutros ($SPEI = 0$). El valor de $-1,28$ SPEI corresponde a un periodo de retorno medio de diez años, y suele considerarse que define condiciones extremadamente secas. El efecto a largo plazo se anuló estableciendo $\text{Tiempo}=0$. Esta simulación permitió evaluar la pérdida de crecimiento debida a la sequía en el paso de tiempo inicial y las trayectorias de recuperación posteriores para diferentes niveles de tratamiento (sin tratamiento / tratamiento) y entre sitios.

Índices de vulnerabilidad a la sequía

Esta última simulación permite calcular los índices de vulnerabilidad a la sequía, que se basan en las tres cantidades siguientes:

- BAI'_0 , el crecimiento de referencia para condiciones neutras;
- BAI'_1 , el crecimiento estimado en el paso de tiempo 1, utilizando SPEI = -1,28; y
- BAI'_n , es decir, el crecimiento estimado n pasos de tiempo después del paso de tiempo inicial, utilizando SPEI = 0. Aquí utilizamos $n = 3$ años.

La resistencia a la sequía (R_t), la resiliencia (R_s) y la recuperación (R_c) se calculan entonces como los siguientes ratios:

$$R_t = BAI'_1 / BAI'_0 \quad (3)$$

$$R_c = BAI'_n / BAI'_1 \quad (4)$$

$$R_s = BAI'_n / BAI'_0 \quad (5)$$

La simulación permite también determinar el tiempo de recuperación, TR, definido como el tiempo n necesario para alcanzar el 95% del crecimiento de referencia, $BAI'_{t=\infty}$ (en años).

$$TR = \min(n) \forall BAI'_n \geq 0,95 BAI'_0 \quad (6)$$

4. Resultados

Series de crecimiento

La Figura 2 muestra la serie temporal del BAI medio en los cinco sitios de estudio para las parcelas con y sin tratamiento. Se observó un BAI más bajo en los años secos SPEI = -1,28 (p. ej., 1995, 2005, 2012 y 2017), aunque hubo variaciones entre sitios. Por otro lado, se observó un BAI excepcionalmente alto durante los años húmedos (SPEI = 1,28) (por ejemplo, 1998, 2010 y 2012-2013). Esto confirma la relevancia del control climático sobre el crecimiento de las tres especies de pinos. Las tres especies mostraron diferencias de crecimiento muy evidentes entre las parcelas sin tratamiento y con tratamiento después de este, sin embargo, las diferencias previas eran menores o nulas. Los incrementos de BAI tras la clara oscilaron entre el 35% en Urriés (*P. nigra*), donde fue menor, y el 100% en Añón (*P. sylvestris*).

Otra cuestión interesante es la persistencia a largo plazo de los efectos de la clara. Los datos muestran una convergencia progresiva entre el BAI entre tratamientos, aunque el efecto de la clara persiste en todos los casos al final del periodo de estudio. Sin embargo, este resultado deja abiertas cuestiones como la velocidad de pérdida del efecto del tratamiento o cuánto tiempo duran sus efectos. Todas estas cuestiones deben ser validadas y cuantificadas durante la modelización, que se describe ampliamente en Manrique-Alba et al. (2022).

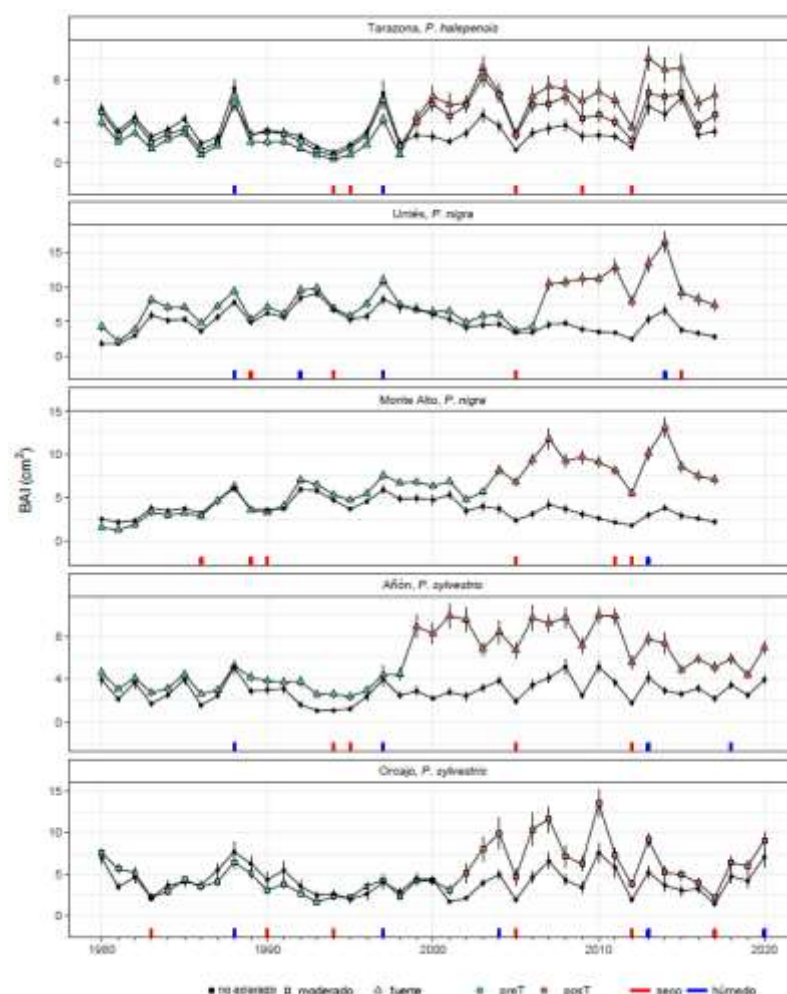


Figura 2. Valores medios y errores estándar del incremento de la sección normal (BAI) en las plantaciones de *P. halepensis*, *P. nigra* y *P. sylvestris* en los cinco sitios de estudio considerando parcelas no aclaradas (puntos negros) y parcelas aclaradas con diferentes intensidades de tratamiento: moderado (cuadrados) y fuerte (triángulos). Los diferentes colores de relleno en las parcelas aclaradas indican los periodos previos (preT, azul) y posteriores al clareo (postT, rojo). Las líneas verticales en la parte inferior de las parcelas indican los años secos (barras rojas) y húmedos (barras azules).

Trayectorias de crecimiento simuladas

Simulamos la evolución a largo plazo del BAI tras el tratamiento manteniendo los efectos de la sequía neutrales (SPEI = 0) (Figura 3). En todos los casos, el BAI aumentó tras la clara (año 1) para sufrir una reducción progresiva en los años siguientes. El BAI más alto en el año 1 alcanzó casi 15-16 cm² en *P. nigra* en Urriés y Monte Alto tras el tratamiento fuerte, mientras que el más bajo fue de unos 7 cm² en *P. halepensis* en Tarazona. En el resto de los sitios, el BAI en el momento 1 osciló entre 8 y 10 cm².

La simulación también nos da información sobre la eficacia a largo plazo de la clara. En la mayoría de los casos, el efecto persistió en la simulación mucho después de 20 años, como demuestra la diferencia de BAI entre las parcelas sin tratamiento y con tratamiento. La excepción fue Urriés, donde el efecto del tratamiento empezó a disminuir antes y desapareció después de quince años. Las simulaciones concuerdan con los datos brutos mostrados en la Figura 2, gracias a la larga duración de los experimentos en los cinco sitios analizados.

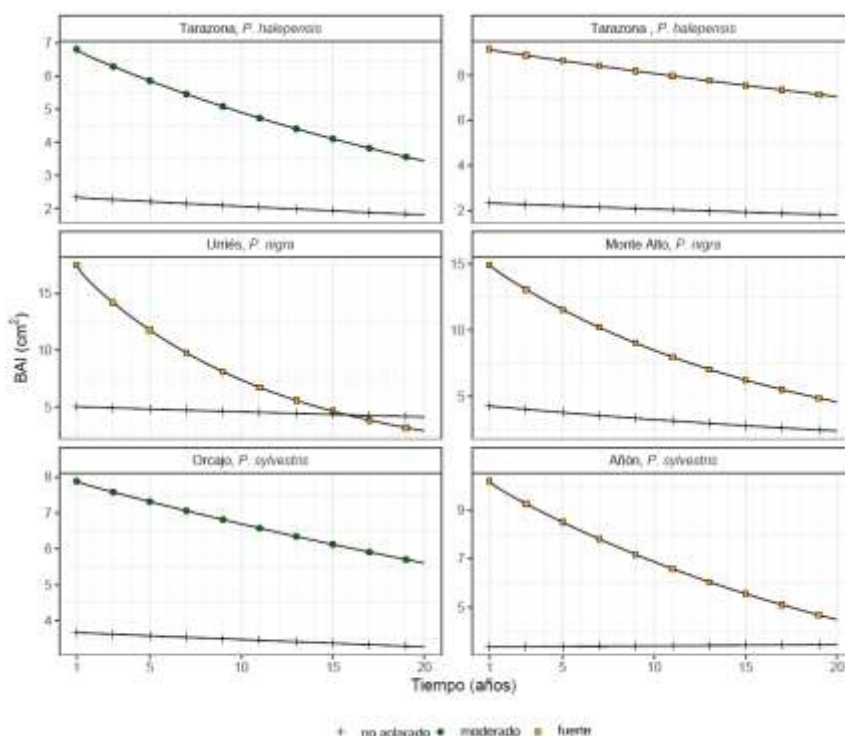


Figura 3. Trayectorias de crecimiento post-tratamiento (BAI) simuladas para parcelas no aclaradas, con tratamiento moderado y con tratamiento fuerte. El BAI se simuló durante 20 años después del tratamiento en los cinco sitios, con condiciones climáticas normales asumiendo que no había impacto de la sequía (SPEI = 0).

También se simularon las trayectorias de crecimiento después de un año de sequía (SPEI = -1,28) en parcelas sin tratamiento y con tratamiento (Figura 4). Esto permitió calcular los índices de vulnerabilidad a la sequía, como se describe en la siguiente sección.

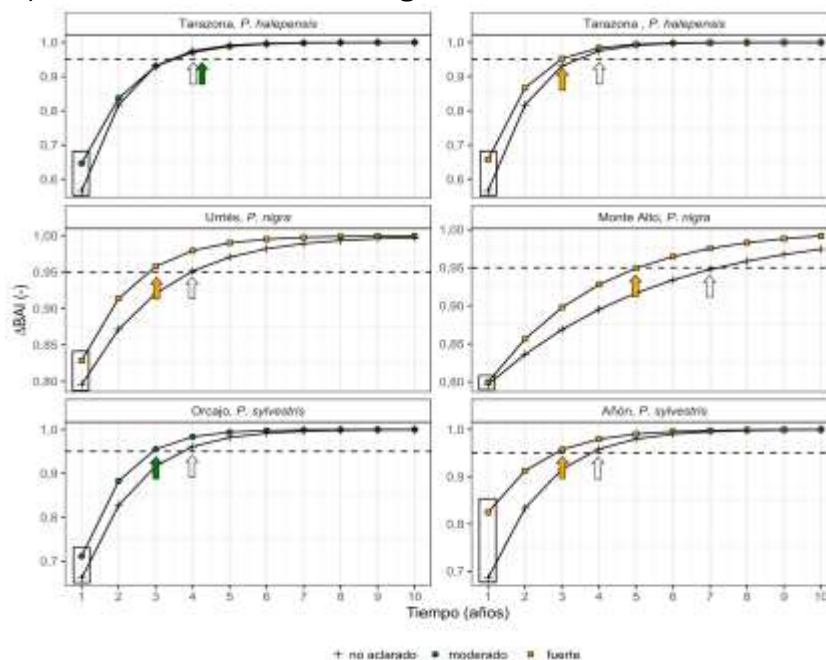


Figura 4. Trayectorias de crecimiento simuladas tras la sequía: evolución del ΔBAI (relación entre el BAI modelado y el BAI de un año normal) durante diez años después de la sequía. Los momentos en los que se alcanza el 95% del BAI de un año normal corresponden al momento de la recuperación (línea horizontal discontinua), es decir cuando se alcanza el 95% del BAI de un año normal y vienen señalados con flechas. Se muestran los valores de R_s en las parcelas sin aclarar (flechas vacías) y aclaradas (flechas de color), y los valores de R_t para ambos tratamientos (rectángulos).

El crecimiento estimado se expresa como la relación con el BAI de referencia, denominado Δ BAI. Así, un valor de Δ BAI = 1 es el máximo posible y corresponde a la recuperación total. Los valores de Δ BAI en el momento 1, resaltados con un rectángulo en la figura 4, representan la pérdida de crecimiento debida a la sequía. Las trayectorias durante los años posteriores a la sequía cuantifican la recuperación progresiva del crecimiento normal tras la perturbación. Muestran una rápida recuperación durante los primeros años y una recuperación progresivamente más lenta hacia el final.

Índices de vulnerabilidad a la sequía

En la Tabla 2 se presentan los valores de los índices de vulnerabilidad a la sequía calculados a partir de las trayectorias de crecimiento simuladas tras la sequía. Los valores de R_t corresponden a Δ BAI en el momento 1 de la figura 4. Por otra parte, R_s y R_c se calcularon a partir de las ecuaciones 4 y 5, utilizando $n = 3$ años (es decir, el BAI estimado tres años después de la sequía).

Los valores de resistencia a la sequía (R_t) oscilaron entre 0,5 veces el BAI de referencia en la parcela no aclarada de Tarazona y cerca de 0,8 en las parcelas aclaradas de los sitios de Urriés y Añón. También se apreciaron diferencias entre las parcelas aclaradas y las no aclaradas, alcanzando las primeras valores más altos de Δ BAI, indicando un efecto de la sequía menos severo (+14-16% de incremento en Tarazona; +4% en Urriés; 7% en Orcajo; +20% en Añón). La única excepción a este comportamiento fue Monte Alto *P. nigra*, donde no hubo diferencias entre los tratamientos en el tiempo cero. Los valores de recuperación de la sequía (R_c) oscilaron entre 1,1 en Urriés y Monte Alto *P. nigra* para ambos tratamientos y 1,7 en la parcela sin desbrozar de Tarazona *P. halepensis*. Analizando con más detalle la Tabla 2, se observa como las parcelas sin aclarar mostraron valores más altos de recuperación, señalando un menor incremento del crecimiento tras la sequía en las parcelas aclaradas (-13% en Tarazona; -1% en Urriés; 3% en Monte Alto; -5% en Orcajo; -15% en Añón). Esto podría estar relacionado con la mayor resistencia mostrada por las parcelas aclaradas, es decir, una menor reducción del crecimiento durante la sequía. Los valores de resistencia a la sequía (R_s) fueron cercanos a uno en todas las parcelas y sitios. De acuerdo con las trayectorias modelizadas, la resiliencia fue ligeramente mayor en las parcelas aclaradas en todos los sitios (+0-1% de incremento en Tarazona; +3% en Urriés; +4% en Monte Alto; +2% en Orcajo y Añón).

Tabla 2. Índices vulnerabilidad a la sequía: resistencia (R_t), resiliencia (R_s), recuperación (R_c) y tiempo de recuperación (TR).

Sitios y tratamiento	R_t	R_c	R_s	TR
Tarazona (<i>P. halepensis</i>)				
No aclarado	0,566	1,723	0,975	2,429
Aclarado moderado	0,646	1,502	0,971	2,489
Aclarado fuerte	0,657	1,496	0,984	1,970
Urriés (<i>P. nigra</i>)				
No aclarado	0,796	1,196	0,951	2,952
Aclarado fuerte	0,829	1,182	0,980	1,822
Monte Alto (<i>P. nigra</i>)				
No aclarado	0,797	1,124	0,895	6,216
Aclarado fuerte	0,800	1,160	0,928	4,046
Orcajo (<i>P. sylvestris</i>)				
No aclarado	0,662	1,453	0,961	2,751
Aclarado moderado	0,711	1,383	0,983	1,926
Añón (<i>P. sylvestris</i>)				
No aclarado	0,685	1,399	0,959	2,798
Aclarado fuerte	0,825	1,188	0,980	1,832

Finalmente, gracias a las trayectorias modelizadas de crecimiento posteriores a la sequía se consigue determinar de una forma más precisa el tiempo de recuperación (TR) (Figura 4). En la

mayoría de los casos, la recuperación total se alcanzó entre dos y tres años después de la sequía, excepto en Monte Alto (*P. nigra*), donde tardó entre cuatro y seis años. En las parcelas aclaradas la recuperación total se produjo generalmente entre uno y dos años antes que, en las parcelas sin aclarar, lo que representa una reducción entre el 19% (Tarazona, clara fuerte, *P. halepensis*) y el 35% (Añón, *P. sylvestris*).

5. Discusión

Un nuevo marco conceptual y estadístico para definir los índices de vulnerabilidad

Como se ha comentado en la introducción, el uso de índices de vulnerabilidad de sequía basados en datos brutos de crecimiento presenta varios problemas que pueden conducir a resultados engañosos. La falta de estandarización a la hora de definir una sequía o la duración de los periodos anteriores y posteriores a la sequía hace que la comparación entre estudios sea complicada. Y lo que es más importante, la simplificación excesiva que supone clasificar los años de sequía frente a los de no sequía (normales) sin tener en cuenta el efecto continuo del clima sobre el crecimiento introduce una gran incertidumbre en los resultados. El impacto de la sequía y la recuperación tras la misma dependen de varios factores, pero principalmente de la gravedad, la duración y el momento de la sequía, así como de las condiciones climáticas previas y posteriores a la misma (Anderegg et al., 2013; Kannenberg et al., 2020).

Aquí proponemos el uso de modelos de crecimiento en lugar de datos brutos de crecimiento para calcular los índices de vulnerabilidad a la sequía con el fin de evitar estos problemas. Una vez ajustados, los modelos permiten simular el crecimiento en condiciones controladas. En concreto, es posible definir un crecimiento de referencia (crecimiento esperado o simulado), estimar el crecimiento bajo condiciones climáticas normales y bajo sequías de diferente magnitud o duración y evaluar así las trayectorias de crecimiento posteriores a la sequía bajo condiciones climáticas neutras. Además, se definen los índices de vulnerabilidad a la sequía, resiliencia y recuperación basados en el crecimiento modelizado, e incluso se estimó el tiempo de recuperación después de una sequía, algo que es no es posible con los datos observados.

Este trabajo es un ejemplo de utilización de un nuevo marco conceptual y estadístico, aplicado en diferentes sitios de estudio experimentales, que puede servir de base para el cálculo de índices de vulnerabilidad frente a la sequía. Sin embargo, para un estudio en profundidad sobre las diferencias entre especies sería necesaria una base de datos más extensa y la cobertura de un área geográfica mayor.

6. Conclusiones

Existe un gran interés por determinar los efectos de las claras en el crecimiento de diferentes especies arbóreas bajo diferentes condiciones climáticas y de gestión. En particular, es interesante determinar los supuestos beneficios de las claras en relación con el crecimiento medio, pero también la resistencia y la resiliencia ante las principales perturbaciones climáticas, como la sequía. Nuestros resultados destacan los beneficios de las claras en términos de mejora del crecimiento medio, en un incremento medio del +110%, y una reducción del -19% de la dependencia del crecimiento del año anterior. La dependencia del crecimiento de las limitaciones climáticas (estrés por sequía) también se redujo en un -36% de media. Las simulaciones de crecimiento posteriores a las claras permitieron evaluar que los efectos de las claras persistieron durante 15-20 años, un resultado que es difícil de obtener examinando únicamente el registro de datos observados.

Los índices de resistencia a la sequía, resiliencia y recuperación basados en las trayectorias simuladas tras la sequía mostraron que la clara mejoró sistemáticamente la resistencia a la sequía (+4-20%) y la resiliencia (+1-4%). La recuperación, por el contrario, se redujo con la clara (-1 a -15%), pero esto se debió a la mayor resistencia, ya que se redujo la pérdida de crecimiento durante la sequía y la recuperación fue proporcionalmente menor. Por último, el tiempo de recuperación tras la sequía fue aproximadamente un año menor en las parcelas aclaradas.

7. Agradecimientos

La financiación de esta investigación ha sido proporcionada por la Agencia Estatal de Investigación de España (CSIC) en el marco de la convocatoria cofinanciada ERA-NET WaterWorks2015 (proyecto PCIN-2017-020/INNOMED). Esta ERA-NET es parte de las Actividades Conjuntas 2016 desarrolladas por la Iniciativa de Programa Conjunto "Retos del Agua para un Mundo Cambiante" (JPI del Agua) como resultado de una colaboración con la Iniciativa de Programación sobre Agricultura, Seguridad Alimentaria y Cambio Climático (JPI de la FACCE). También se ha contado con financiación del proyecto EFA210/16/PIRAGUA, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020) de la Unión Europea. Agradecemos a M. Colangelo y C. Valeriano su ayuda en el muestreo de campo y el procesamiento de las muestras y a E. Arrechea y Álvaro Hernández (Gob. Aragón) por su apoyo y ayuda en el estudio de los sitios experimentales.

8. Bibliografía

ANDEREGG L.D.L.; ANDEREG, W.R.L.; BERRY J.A.; 2013. Not all droughts are created equal: translating meteorological drought into woody plant mortality. *Tree Physiol.* 33: 672–683.

BABST F.; BOURIAUD O.; POULTER B.; TROUET V.; GIRARDIN M.P.; FRANK D.C. 2019. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances* 5: eaat4313.

BEGUERÍA S.; VICENTE-SERRANO S.M.; 2017. SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index. R package version 1.7. <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>.

BEGUERÍA S.; VICENTE-SERRANO S.M.; REIG F.; LATORRE B.; 2014. Standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.* 34: 3001–3023.

CASTAGNERI D.; VACCHIANO G.; HACKET-PAIN A. .; DEROSE R. J.; KLEIN T.; BOTTERO A.; 2021. Meta-analysis reveals different competition effects on tree growth resistance and resilience to drought. *Ecosystems*.

DEL RÍO M.; BRAVO-OVIEDO A.; PRETZSCH H.; LÖF M.; RUIZ-PEINADO, R.; 2017. A review of thinning effects on Scots pine stands From growth and yield to new challenges under global change. *For. Syst.* 2017, 26, eR03S.

FRITTS H.C.; 2001. *Tree Rings and Climate*. Blackburn, USA.

GAZOL A.; CAMARER, J.J.; VICENTE-SERRANO S.M.; SÁNCHEZ-SALGUERO R.; GUTIÉRREZ E.; DE LUIS M.; SANGÜESA-BARREDA G.; NOVAK K.; ROZAS V.M.; TÍSCAR P.A.; LINARES J.C.; MARTÍN-HERNÁNDEZ N.; MARTÍNEZ DEL CASTILLO E.; RIBAS K.; GARCÍA-GONZÁLEZ I.; SILLA F.; CAMISÓN A.; GÉNOVA M.; OLANO J.M.; LONGARES L.A.; HEVIA A.; TOMÁS-BURGUERA M.; GALVÁN J.D.; 2018. Forest resilience to drought varies across biomes. *Global Change Biology*
GAZOL A.; CAMARERO J.J.; SÁNCHEZ-SALGUERO R.; VICENTE-SERRANO S.M.; SERRA-MALUQUER X.; GUTIÉRREZ E.; DE LUIS M.; SANGÜESA-BARREDA G.; NOVAK K.; ROZAS V.;

2020. Drought legacies are short, prevail in dry conifer forests and depend on growth variability. *Journal of Ecology*

KANNENBERG S. A.; NOVICK K. A.; ALEXANDER M. R.; MAXWELL J. T.; MOORE D. J.; PHILLIPS R. P.; ANDEREGG W. R.; 2019. Linking drought legacy effects across scales: From leaves to tree rings to ecosystems. *Global Change Biology* 25: 2978–2992.

KANNENBERG S. A.; SCHWALM C. R.; ANDEREGG W. R.; 2020. Ghosts of the past: how drought legacy effects shape forest functioning and carbon cycling. *Ecology Letters*, 23: 891–901.

LLORET F.; KEELING E.G.; SALA A.; 2011. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120: 1909–1920.

MANRIQUE-ALBA À.; BEGUERÍA S.; CAMARERO J. J.; 2022. Long-term effects of forest management on post-drought growth resilience: An analytical framework. *Science of the Total Environment*, 810, 152374.

MARTÍNEZ-VILALTA J.; LÓPEZ BC.; LOEPFE L; LLORET F.; 2012. Stand- and tree level determinants of the drought response of Scots pine radial growth. *Oecologia* 168: 877–888.
NIKINMAA L.; LINDNER M.; CANTARELLO E.; JUMP A. S.; SEIDL R.; WINKEL G.; MUYS B.; 2020. Reviewing the use of resilience concepts in forest sciences. *Current Forestry Reports* 6: 61–80.

OVENDEN T.S.; PERKS M.P.; CLARKE T-K.; MENCUCCINI M.; JUMP A.S.; 2021. Life after recovery: Increased resolution of forest resilience assessment sheds new light on post-drought compensatory growth and recovery dynamics. *J Ecol.* XXX: 1–14.

SCHWARZ J.; SKIADARETIS G.; KOHLER M.; KUNZ J.; SCHNABEL F.; VITALI V.; BAUHUS J.; 2020. Quantifying Growth Responses of Trees to Drought—a Critique of Commonly Used Resilience Indices and Recommendations for Future Studies. *Current Forestry Reports* 6: 185–200.

THURM E. A.; UHL E.; PRETZSCH H.; 2016. Mixture reduces climate sensitivity of Douglas-fir stem growth. *Forest Ecology and Management* 376: 205–220.

TOMAS-BURGUERA M.; VICENTE-SERRANO S.M.; BEGUERÍA S.; REIG F.; LATORRE B.; 2019. Reference crop evapotranspiration database in Spain (1961–2014). *Earth Syst. Sci. Data* 11: 1917–1930.

TROUVÉ R.; BONTEMPS J-D.; COLLET C.; SEYNAVE I.; LEBOURGEOIS F.; 2017. Radial growth resilience of sessile oak after drought is affected by site water status, stand density, and social status. *Trees, Struct Funct.* 31: 517–529.

VICENTE-SERRANO S.M.; BEGUERÍA S.; LÓPEZ-MORENO J.I.; 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardised precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23: 1696–1718.

VICENTE-SERRANO S.M.; GOUVEIA C.; CAMARERO J.J.; BEGUERÍA S.; TRIGO R.; LÓPEZ-MORENO J.I.; AZORÍN-MOLINA C.; PASHO E.; LORENZO-LACRUZ J.; REVUELTO J.; 2013. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110: 52–57.

VICENTE-SERRANO S.M.; TOMÁS-BURGUERA M.; BEGUERÍA S.; REIG-GRACIA F.; LATORRE B.; PEÑA-GALLARDO M.; LUNA Y.; MORATA A.; GONZÁLEZ-HIDALGO J.C.; 2017. A high resolution dataset of drought indices for Spain. *Data* 2: 22.