



**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Huelva**

Máster Oficial en Ingeniería de Montes

Trabajo Fin de Máster

La influencia de la edad en la sensibilidad y la
resistencia del *Pinus pinaster* al cambio climático

M.^a Llanos García López
Febrero 2026

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Antecedentes.....	8
1.2. Hipótesis.....	10
1.3. Objetivos.....	11
2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	12
2.1. Área de estudio.....	12
2.2. La especie.....	15
2.3. Métodos dendrocronológicos.....	16
2.3.1. Diseño del muestreo.....	16
2.3.2. Extracción de cores.....	18
2.3.3. Procesamiento de muestras.....	19
2.3.4. Datación.....	20
2.3. Medición y validación.....	21
2.3.1. Medición dendrocronológica.....	21
2.3.2. Validación estadística.....	22
2.4. Análisis del crecimiento.....	24
2.5. Análisis de sensibilidad climática y resiliencia.....	25
2.5.1. Análisis de datos climáticos (T° y Precip).....	25
2.5.2. Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI).....	26
2.5.3. Sensibilidad climática.....	26
2.5.4. Resistencia, recuperación y resiliencia.....	27
3. RESULTADOS.....	29
3.1. Crecimiento de <i>Pinus pinaster</i> frente al clima en función de la edad.....	29
3.2. Sensibilidad climática.....	32
3.3. Respuesta del crecimiento a eventos climáticos extremos.....	37
4. DISCUSIÓN.....	39
5. CONCLUSIONES.....	42
6. BIBLIOGRAFÍA.....	44
7. ANEXOS.....	50
ANEXO I: Ejemplo de medición de anillos (en formato .rwl).....	50
ANEXO II: Resultados COFECHA final.....	53
ANEXO III: Tablas resumen datos de los pies analizados.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Caracterización de la zona de estudio y de los principales parámetros medios de los árboles jóvenes y viejos, como la edad mínima y la período temporal de estudio.....18

Tabla 2: Valores medios y desviaciones estándar (sd) del diámetro normal (DBH), la altura (H) y la edad de los individuos clasificados como jóvenes y viejos, incluyendo la edad mínima, máxima y la ventana temporal de establecimiento.....29

Tabla 3: Número de árboles y radios iniciales y de estudio, área basal (IAB), coeficiente de interrelación (Rbt), autocorrelación (AC), sensibilidad media (MS) y porcentaje de varianza explicada por el primer componente principal (PC1) para los grupos de individuos jóvenes y viejos.....30

Índice de figuras

Figura 1: Red de Espacios Naturales Protegidos en el ámbito de la Sierra de Cazorla y su entorno, con indicación del área de estudio.....	12
Figura 2: Localización del área de estudio dentro del monte público donde se realizó el muestreo de <i>Pinus pinaster</i>	14
Figura 3: Distribución natural de <i>Pinus pinaster</i> en Europa occidental y distribución de la sp. en la Península Ibérica, con localización del área de estudio en la Sra. de Cazorla.....	16
Figura 4: Localización espacial de los árboles muestreados en el área de estudio, diferenciando entre pies jóvenes (rojo) y pies viejos (azul).....	17
Figura 5: Trabajo de campo para el muestreo dendrocronológico de <i>Pinus pinaster</i> en el área de estudio, mostrando la extracción de testigos (cores).....	18
Figura 6: Core de <i>Pinus pinaster</i> extraído mediante barrena de Pressler y montado sobre soporte de madera para su preparación y posterior análisis dendrocronológico.....	20
Figura 7: Sistema de medición dendrocronológica utilizado para la cuantificación de la anchura de los anillos de crecimiento, lupa binocular acoplada a una mesa de medición LINTAB.....	22
Figura 8: Evolución temporal del incremento de área basal (IAB, cm ²) de <i>Pinus pinaster</i> en el área de estudio diferenciando árboles jóvenes y viejos.....	31
Figura 9: Evolución de la temperatura media anual (°C) en la Sierra de Cazorla durante el periodo 1950–2024.....	32
Figura 10: Evolución de la precipitación total anual (mm) en la Sierra de Cazorla durante el periodo 1950–2024.....	33
Figura 11: Evolución temporal del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración a 12 meses (SPEI-12) para la Sierra de Cazorla durante el periodo aproximado 1950–2023.....	34

Figura 12: Coeficientes de correlación de Pearson entre el incremento de área basal (IAB) y las variables climáticas de T^a media, precipitación e índice SPEI para *Pinus pinaster*, diferenciando entre árboles jóvenes y viejos.....35

Figura 13: Valores de resistencia, recuperación y resiliencia del crecimiento radial en árboles viejos (verde) y árboles jóvenes (naranja) para los años de sequía severa identificados (1995, 1999, 2005 y 2012).....37

RESUMEN

El cambio climático se ha convertido en uno de los principales factores de presión sobre los ecosistemas forestales mediterráneos, debido principalmente al aumento de las temperaturas y a la mayor frecuencia e intensidad de los episodios de sequía. En este marco, el presente Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo analizar cómo la edad de los individuos influye en la sensibilidad climática y en la resiliencia del crecimiento radial de *Pinus pinaster* Aiton en la Sierra de Cazorla (Jaén), a partir del empleo de técnicas dendrocronológicas.

Para ello, se muestrearon 40 individuos de *P. pinaster*, clasificados en dos clases de edad (árboles jóvenes y árboles viejos), de los que se extrajeron testigos de crecimiento. Las series dendrocronológicas obtenidas fueron datadas, medidas y sometidas a validación estadística, transformándose posteriormente en incremento de área basal (IAB) con el fin de analizar el crecimiento radial. La relación entre el crecimiento y las principales variables climáticas —precipitación, temperatura media y el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI-12)— se evaluó mediante análisis de correlación a escalas mensual y estacional. Además, se estudió la respuesta del crecimiento frente a episodios de sequía severa a través de los índices de resistencia, recuperación y resiliencia.

Los resultados muestran que el crecimiento radial de *Pinus pinaster* está estrechamente condicionado por la disponibilidad hídrica, presentando correlaciones positivas significativas con la precipitación, mientras que las temperaturas elevadas ejercen un efecto limitante durante el periodo estival. La comparación entre clases de edad pone de manifiesto que los árboles jóvenes presentan una mayor sensibilidad climática y una mayor variabilidad interanual del crecimiento, mientras que los árboles viejos muestran una respuesta más amortiguada y estable. Frente a los episodios de sequía, los individuos jóvenes tienden a mostrar una mayor resistencia inicial, aunque con una recuperación más variable, mientras que los árboles viejos presentan una resiliencia más constante.

En conjunto, los resultados confirman que la edad constituye un factor determinante en la modulación de la sensibilidad climática y de la resiliencia del crecimiento radial de *Pinus pinaster*, con implicaciones relevantes para la gestión forestal y para la adaptación de los pinares mediterráneos al actual escenario de cambio climático.

Palabras clave: dendrocronología, crecimiento radial, clases de edad, sensibilidad climática, resiliencia.

ABSTRACT

Climate change has become one of the main sources of pressure on Mediterranean forest ecosystems, largely driven by rising temperatures and the increasing frequency and severity of drought events. Within this context, this Master's Thesis aims to examine how tree age influences climatic sensitivity and the resilience of radial growth in *Pinus pinaster* Aiton in the Sierra de Cazorla (southern Spain), using dendrochronological approaches.

To this end, 40 *P. pinaster* trees were sampled and grouped into two age classes (young and old trees), from which increment cores were extracted. The resulting tree-ring series were dated, measured and statistically validated, and subsequently converted into basal area increment (BAI) to assess radial growth patterns. Growth–climate relationships were analysed through correlation analyses with the main climatic variables—precipitation, mean temperature and the Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI-12)—at both monthly and seasonal scales. In addition, tree growth responses to severe drought events were evaluated using resistance, recovery and resilience indices.

The results indicate that radial growth in *Pinus pinaster* is strongly constrained by water availability, showing significant positive relationships with precipitation, whereas high temperatures exert a limiting effect during the summer period. Comparisons between age classes reveal that young trees exhibit higher climatic sensitivity and greater interannual growth variability, while old trees display a more buffered and stable response. During drought events, young trees tend to show higher initial resistance but more variable post-drought recovery, whereas old trees maintain more consistent resilience levels.

Overall, these findings confirm that tree age plays a key role in modulating climatic sensitivity and radial growth resilience in *Pinus pinaster*, with important implications for forest management and for the adaptation of Mediterranean pine forests under current climate change conditions.

Keywords: dendrochronology, radial growth, age classes, climatic sensitivity, resilience

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El cambio climático se ha definido como la modificación del clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (CMNUCC, 1992). En este sentido, el último informe de evaluación del Grupo de Trabajo I del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático afirma que *el calentamiento global del planeta se observa de manera inequívoca*, con cambios generalizados y rápidos en la atmósfera, el océano, la superficie terrestre, la criosfera y la biosfera, sin precedentes en siglos anteriores (IPCC, 2021).

Asimismo, la Ley Europea del Clima califica el cambio climático como una “amenaza existencial”, destacando sus efectos sobre los ecosistemas, las personas y las economías, derivados del incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos como olas de calor, sequías, escasez hídrica, incendios forestales e inundaciones, entre otros (Unión Europea, 2021).

En este contexto, los ecosistemas forestales se encuentran entre los más directamente afectados por el cambio climático, dado su papel fundamental en la regulación climática, la conservación del suelo y la provisión de agua y otros servicios ecosistémicos (Lindner et al., 2010). Además, los bosques desempeñan una función clave en el ciclo global del carbono, actuando como sumideros capaces de reducir la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero, una función especialmente relevante en regiones climáticamente sensibles como el ámbito mediterráneo (Ruiz-Peinado et al., 2011). En consecuencia, los bosques pueden considerarse reservorios naturales de carbono de elevado valor estratégico, cuya dinámica de acumulación resulta esencial para comprender su papel en la mitigación del cambio climático (IPCC, 2014; FAO, 2018).

Desde una perspectiva ecológica, el crecimiento de las especies forestales constituye un indicador clave del estado de salud y la productividad de los bosques. En este sentido, la dendrocronología, disciplina científica que estudia el crecimiento de los árboles a partir de sus anillos anuales, permite interpretar la información contenida en estos registros naturales y analizar la respuesta del crecimiento radial frente a la variabilidad ambiental (Fritts, 1976). Los anillos de crecimiento conservan la huella de las condiciones climáticas y de las perturbaciones sufridas a lo largo del tiempo, proporcionando registros anuales de eventos como sequías, temperaturas extremas o incendios (Schweingruber, 1996).

La anchura de los anillos de crecimiento, así como indicadores derivados como el incremento de área basal (IAB), reflejan de forma integrada las condiciones ambientales

durante cada ciclo vegetativo, constituyendo herramientas especialmente útiles para evaluar la influencia de factores climáticos sobre el crecimiento radial a distintas escalas temporales (Sánchez-Salguero et al., 2013). Por ello, la dendrocronología se ha consolidado como una metodología de gran valor para reconstruir la respuesta histórica de las especies forestales frente a la variabilidad climática (Gutiérrez, 2009; Constante-García et al., 2009; Lloret, 2022).

En este contexto, la edad de los individuos emerge como un factor clave que puede modular la respuesta del crecimiento radial frente a la variabilidad climática y, en particular, frente a los episodios de sequía (Camarero et al., 2013; Sánchez-Salguero et al., 2013; Navarro-Cerrillo et al., 2014). El crecimiento secundario de los árboles permite diferenciar periodos secos y húmedos a lo largo de su historia vital, y el uso de técnicas dendrocronológicas facilita el análisis de los factores climáticos que condicionan el crecimiento radial y la evaluación de la respuesta de los bosques ante el aumento en la frecuencia, intensidad y duración de las sequías extremas (Sánchez-Salguero et al., 2012), empleando índices integradores del balance hídrico, como el SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración; Lloret et al., 2011; Gazol et al., 2018).

El régimen climático mediterráneo, caracterizado por veranos secos e inviernos relativamente fríos, ejerce una influencia determinante sobre la actividad cambial, concentrando el crecimiento radial principalmente en primavera y, en menor medida, en otoño, siempre que la disponibilidad hídrica lo permita (Camarero et al., 2010). En estas condiciones, los años climáticamente favorables generan anillos más anchos, mientras que los periodos de estrés hídrico prolongado o temperaturas extremas se traducen en anillos estrechos o incluso en la formación de anillos falsos o años ausentes (Fritts, 1976; Schweingruber, 1996).

En especies mediterráneas como *Pinus pinaster*, la estructura anatómica del xilema permite una delimitación clara de los anillos de crecimiento, facilitando una datación anual precisa y la reconstrucción de las condiciones ambientales experimentadas durante cada ciclo vegetativo (Gutiérrez, 2009). En zonas montañosas como la Sierra de Cazorla, la variabilidad interanual del crecimiento radial puede verse además modulada por factores locales como la altitud, la orientación, las características edáficas o la competencia intra e interespecífica (Camarero et al., 2018, Sánchez-Salguero et al., 2018).

Por último, en bosques maduros, las perturbaciones naturales han favorecido el establecimiento de cohortes de distintas edades, dando lugar a estructuras forestales con edades desiguales (Di Filippo et al., 2017). Estos sistemas constituyen laboratorios naturales idóneos para analizar cómo individuos jóvenes y viejos de una misma especie responden a los impulsores del cambio global (Petritan et al., 2014). No obstante, la respuesta diferencial de árboles jóvenes y viejos frente al calentamiento y a la intensificación de las sequías sigue siendo un aspecto poco explorado, especialmente en el ámbito mediterráneo (Colangelo et

al., 2021).

En conjunto, el análisis del impacto del cambio climático sobre el crecimiento forestal, y en particular sobre la respuesta diferencial a la sequía en función de la edad, resulta fundamental para avanzar en la comprensión de los procesos ecológicos que gobiernan los ecosistemas forestales y para afrontar los retos derivados del actual escenario de cambio global. Este enfoque proporciona información clave para la gestión forestal sostenible, la conservación de la biodiversidad y la adaptación de los bosques mediterráneos a condiciones climáticas futuras.

1.2. Hipótesis

La actividad cambial y, en consecuencia, la formación de los anillos de crecimiento, responden de forma sensible a la variabilidad climática interanual y estacional, de modo que las fluctuaciones de las principales variables climáticas dentro de una misma área geográfica se reflejan en el crecimiento radial de los árboles que la integran (Fritts, 1976; Schweingruber, 1996). Sobre esta base, se plantea que los registros dendrocronológicos permiten analizar de forma comparativa la relación entre el crecimiento radial y las variables climáticas, así como evaluar la respuesta de las especies forestales frente a la variabilidad climática en el área de estudio, sin reiterar los fundamentos teóricos ya expuestos en la introducción.

Bajo este planteamiento, se asume que los registros dendrocronológicos proporcionan un reflejo fiable de las condiciones climáticas pasadas, al integrar en el crecimiento radial anual los efectos combinados de la precipitación y la temperatura. En este sentido, el análisis conjunto del crecimiento radial y de variables climáticas, así como del índice SPEI como indicador del balance hídrico, permite profundizar en la comprensión de la respuesta histórica del crecimiento forestal a los procesos de sequía y mejorar la interpretación de los mecanismos que regulan la productividad forestal en un contexto de cambio climático (Cook y Kairiukstis, 1990; Gutiérrez, 2009).

Finalmente, se plantea que la respuesta del crecimiento radial frente a la sequía no es homogénea entre individuos, sino que puede variar en función de la edad de los árboles. En este sentido, se espera que los árboles jóvenes presenten una mayor sensibilidad y variabilidad interanual del crecimiento en comparación con los árboles viejos, lo que permite evaluar diferencias en la respuesta climática asociadas a la etapa de desarrollo y contribuir a una mejor comprensión de la dinámica de los bosques bajo escenarios futuros de aumento de la frecuencia e intensidad de las sequías.

1.3. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar la respuesta del crecimiento radial de *Pinus pinaster* a la variabilidad climática, con especial atención a los procesos de sequía, así como evaluar las posibles diferencias en la sensibilidad climática entre árboles jóvenes y viejos mediante el uso de técnicas dendrocronológicas.

Para ello, se plantean como objetivos específicos:

- ✓ Evaluar la relación entre el crecimiento radial (IAB) y las principales variables climáticas (precipitación, temperatura media y SPEI) a distintas escalas temporales (mensual y estacional).
- ✓ Analizar la respuesta del crecimiento radial a los episodios de sequía, empleando el índice SPEI como variable integradora del balance hídrico.
- ✓ Comparar la sensibilidad climática del crecimiento entre árboles jóvenes y árboles viejos, identificando posibles diferencias en la magnitud y estabilidad de la respuesta.
- ✓ Determinar el papel relativo de la disponibilidad hídrica y la temperatura en el control del crecimiento radial de *Pinus pinaster* en un contexto de cambio climático.

Con este fin, se seleccionaron pies representativos de *P. pinaster* en el Parque Natural Sierra de Cazorla, Segura y Las Villas, siendo el espacio protegido de mayor superficie en la Península Ibérica. Mediante la aplicación de técnicas dendrocronológicas, se obtuvieron series anuales de crecimiento radial, diferenciando entre árboles jóvenes y viejos, con el propósito de caracterizar y comparar sus patrones de crecimiento y su respuesta diferencial climática (T^a media y Precipitación), así como su sensibilidad y resiliencia frente a los eventos de sequía extrema.

Este enfoque permite evaluar cómo las condiciones climáticas cambiantes, y en particular la ocurrencia de eventos extremos como las sequías, influyen en el crecimiento radial y en la capacidad de recuperación de la especie a lo largo de sus distintas etapas de desarrollo. De este modo, el estudio contribuye a mejorar la comprensión de la respuesta diferencial de los individuos jóvenes y viejos de *Pinus pinaster* ante un escenario de cambio climático progresivo, proporcionando información clave para una gestión adaptativa de la especie en el área mediterránea.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La Sierra de Cazorla, situada en el extremo oriental de la provincia de Jaén, forma parte del conjunto de las Cordilleras Béticas, un territorio reconocido por su elevada diversidad biológica y geológica, considerada de importancia global (Blanca et al., 2001; Gómez Mercado et Valle Tendero, 2008). Esta singularidad es el resultado de una compleja interacción de factores históricos, biogeográficos y ecológicos, que se ve reforzada por la notable heterogeneidad edáfica, altitudinal y climática que caracteriza a la región (Rivas-Martínez et al., 2004).

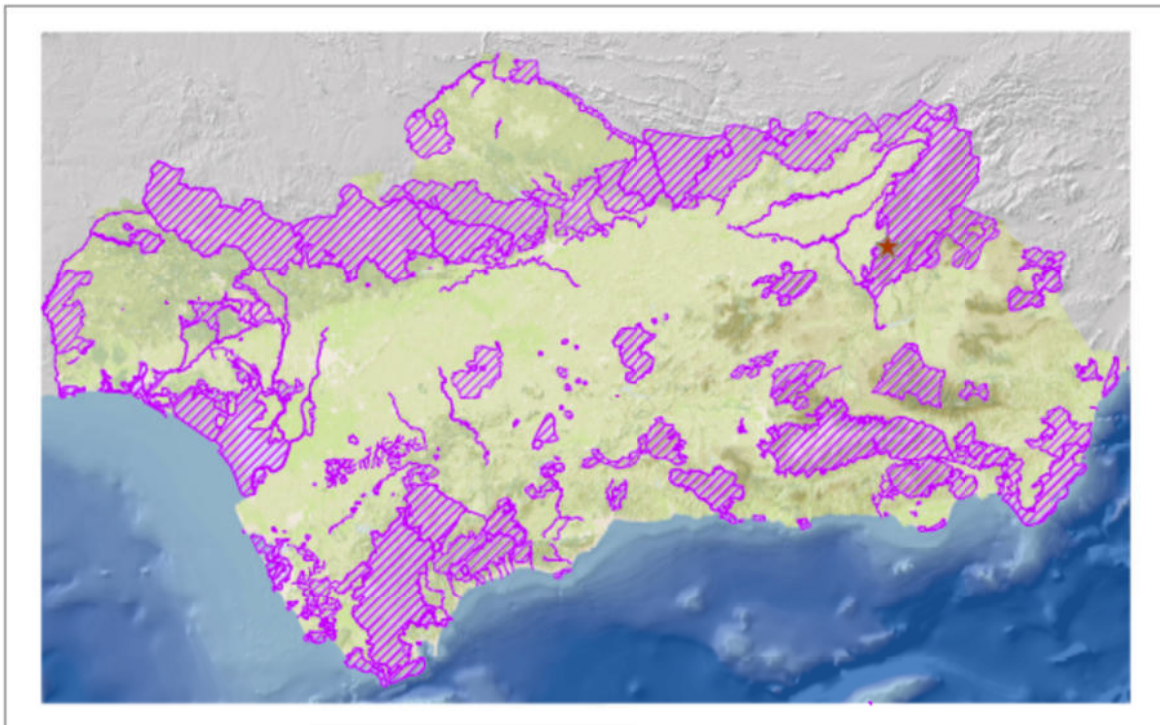


Figura 1: Red de Espacios Naturales Protegidos en el ámbito de la Sierra de Cazorla y su entorno, con indicación del área de estudio. El mapa muestra la delimitación de los espacios protegidos y su distribución espacial, permitiendo contextualizar la zona de trabajo dentro del marco de protección ambiental vigente. *Fuente: elaboración propia a partir de cartografía oficial de Espacios Naturales Protegidos. REDIAM (Red de Información Ambiental de Andalucía), <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>, consulta: 5 de noviembre de 2025).*

La Sierra de Cazorla se integra dentro del Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas, un espacio natural protegido de gran extensión (Figura 1), con una superficie aproximada de 209.000 ha, cuya gestión corresponde a la Junta de Andalucía (Junta de Andalucía, 2011). La mayor parte de este territorio es de titularidad pública y presenta un elevado grado de conservación de sus sistemas naturales, contando además con áreas sometidas a regímenes de protección específicos, como la Reserva Natural de Navahondona-Guahornillos o el Perímetro Experimental de Guahornillos (Valle et al., 2003; Junta de Andalucía, 2011). En estas zonas, los usos públicos y las actividades antrópicas se encuentran prohibidos o estrictamente regulados, lo que ha favorecido la preservación de sus valores ambientales y ecológicos.

Desde el punto de vista paisajístico y forestal, la comarca jiennense de la Sierra de Cazorla y Segura, localizada en el sector nororiental de la provincia, se caracteriza por la presencia de extensos y continuos bosques de pinar que cubren gran parte de su abrupta topografía. En la actualidad, este paisaje es valorado principalmente por su elevado interés ambiental y por su contribución significativa a la superficie del mayor espacio natural protegido de España (Europarc España, 2020). No obstante, esta valoración contemporánea no debe ocultar la intensa explotación forestal a la que fue sometida históricamente, especialmente en lo relativo al aprovechamiento maderero. Dicha actividad alcanzó su máximo desarrollo entre finales del siglo XIX y mediados del siglo XX, periodo temporal que constituye el marco histórico de referencia del presente trabajo.

De acuerdo con el Decreto 191/2017, de 28 de noviembre, por el que se aprueba el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del Parque Natural, el territorio presenta una elevada heterogeneidad orográfica, en la que se distinguen diferentes unidades naturales, como valles fluviales, áreas de media montaña y sectores de alta montaña. El conjunto de sierras que conforman el Parque Natural se adscribe al sistema Prebético, lo que explica el predominio de materiales geológicos de naturaleza calcárea, fundamentalmente calizas de edad mesozoica. Según el citado decreto, los suelos de estas zonas montañosas se caracterizan por fuertes pendientes y relieves escarpados, lo que limita su desarrollo edáfico más allá de la roca madre. En contraste, los suelos de los fondos de valle presentan una mayor fertilidad y han sido tradicionalmente destinados a usos agrícolas, destacando el cultivo del olivar. De hecho, como señalan Fernández et al. (2005), el olivar ocupa la mayor parte de las superficies agrícolas del Parque Natural.

La hidrografía del Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas está dominada por la presencia de dos grandes cuencas fluviales: la del río Guadalquivir y la del río Segura. Esta red hidrográfica es especialmente densa, en relación con la elevada pluviosidad registrada en la zona (Gómez, 2011), lo que favorece la existencia de numerosos cursos de agua permanentes y estacionales, tanto independientes como tributarios de los principales ríos. Esta riqueza hídrica desempeña un papel fundamental en la configuración de los ecosistemas forestales y en la elevada diversidad biológica del

territorio.

Por otra parte, el clima del Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas presenta una notable heterogeneidad espacial, consecuencia de la compleja configuración orográfica del territorio. Tal y como señala el Decreto 191/2017, de 28 de noviembre, las marcadas diferencias altitudinales, junto con la presencia de masas de agua y valles interiores, influyen de manera decisiva en la variabilidad climática del Parque, dando lugar a condiciones microclimáticas diferenciadas. No obstante, a escala general, el territorio se enmarca dentro del dominio climático mediterráneo, caracterizado por precipitaciones relativamente abundantes en primavera y otoño y por veranos secos y cálidos (Ballesteros, 2008).

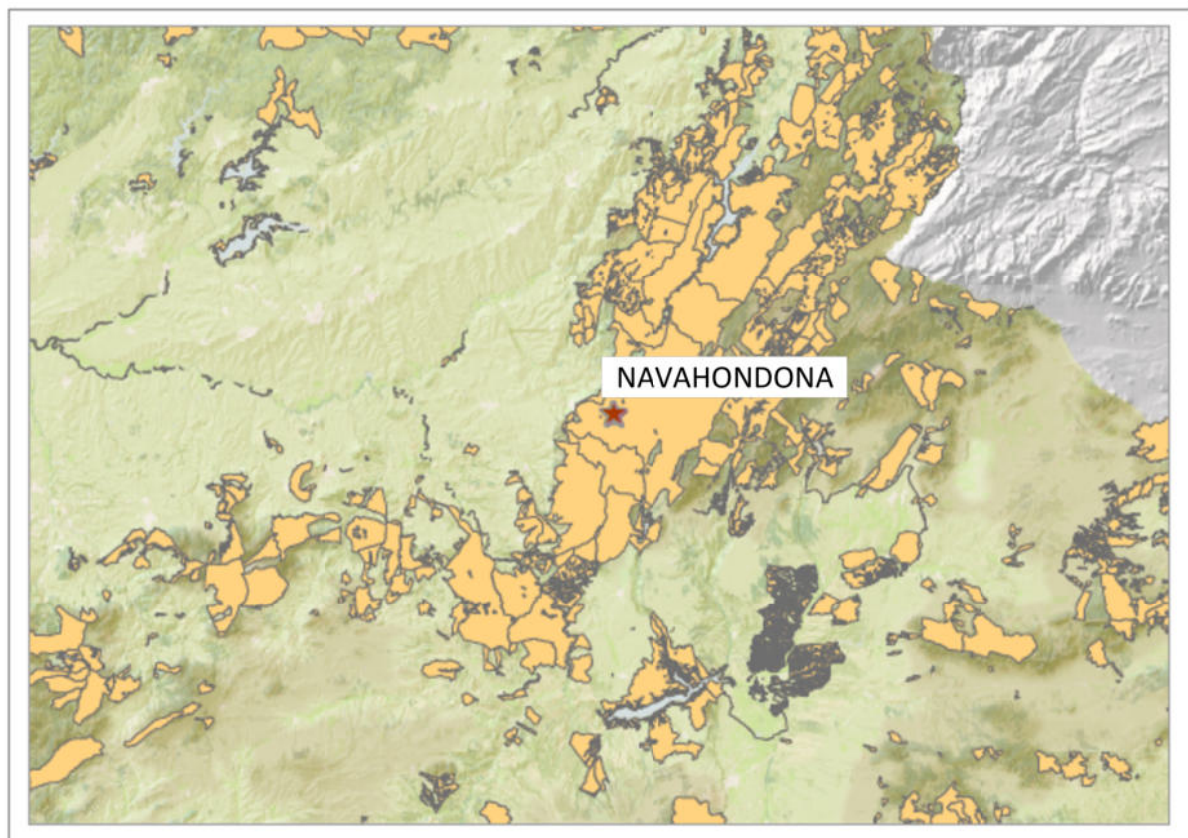


Figura 2: Localización del área de estudio dentro del monte público donde se realizó el muestreo de *Pinus pinaster*. El mapa muestra el ámbito del monte y su contexto territorial, permitiendo situar espacialmente la zona de trabajo dentro del entorno forestal de la Sierra de Cazorla. *Fuente: elaboración propia a partir de bases cartográficas oficiales de REDIAM (Red de Información Ambiental de Andalucía), <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>, consulta: 5 de noviembre de 2025).*

El área de estudio se localiza concretamente en el término municipal de Cazorla, dentro del Monte de Navahondona (código JA-10001-JA), de titularidad pública y propiedad de la Junta de Andalucía (Figura 2). Este monte fue inscrito el 1 de febrero de 1901 como el número 1 del Catálogo de Montes de Utilidad Pública de la provincia de Jaén, con una superficie forestal total de 16.235,41 ha, según los datos del Sistema de Información Geográfica de Montes de Andalucía (SIGMA). El primer Proyecto de Ordenación del Monte de Navahondona fue redactado por el ingeniero de montes D. Carlos Castel y aprobado mediante Real Orden de 16 de noviembre de 1893. En la actualidad, se encuentra vigente la séptima revisión del Plan de Ordenación, aprobada el 13 de enero de 2014, que constituye el marco normativo de referencia para la gestión forestal del área.

2.2. La especie

Pinus pinaster Aiton, conocido comúnmente como pino marítimo, es una especie arbórea característica de la región mediterránea occidental, ampliamente distribuida en la Península Ibérica, el sur de Francia y el norte de África (Gil et al., 1990; Ruiz de la Torre, 2006); como se muestra en la Figura 3. Se trata de una conífera de crecimiento relativamente rápido, capaz de alcanzar alturas de hasta 30 m, con un fuste generalmente recto y una corteza gruesa, profundamente fisurada y de tonalidad marrón rojiza. Sus hojas son aciculares, rígidas y dispuestas en pares, mientras que sus estróbilos femeninos son grandes y alargados, rasgos que facilitan su identificación en campo (Ceballos et Ruiz de la Torre, 1979).

Desde el punto de vista ecológico, *P. pinaster* presenta una notable plasticidad ambiental, lo que le permite desarrollarse en suelos pobres, ácidos y descarbonatados, así como tolerar condiciones climáticas adversas, incluidas sequías estivales y episodios térmicos extremos (Tapias et al., 2004). Estas características han favorecido su uso extensivo en programas de repoblación forestal y su aprovechamiento histórico en la producción de madera (Hevia, 2013) y resina, siendo esta última actividad especialmente relevante durante los siglos XIX y XX, aunque actualmente se encuentra prácticamente en desuso (Génova et Camarero, 2008).

En el ámbito de la Sierra de Cazorla, *Pinus pinaster* se distribuye principalmente en los pisos bioclimáticos mesomediterráneo y supramediterráneo, donde aparece asociado a suelos profundos, frescos y descarbonatados, bajo un ombroclima subhúmedo. Su presencia es más abundante en enclaves de orientación umbría y condiciones microclimáticas favorables, como las laderas occidentales de macizos montañosos relevantes (por ejemplo, Gilillo y Rayal), donde alcanza mayores tasas de crecimiento y portes considerables. En estos ambientes forma comunidades mixtas junto a especies como *Quercus ilex* y *Quercus faginea*, aunque en determinadas áreas puede constituir pinares densos y relativamente monoespecíficos (Blanco et al., 2005). El origen de estas masas en la zona sigue siendo objeto de debate, si bien diversos autores apuntan a una introducción antigua y posterior

expansión subespontánea favorecida por la gestión forestal histórica (García Latorre et al., 1996).

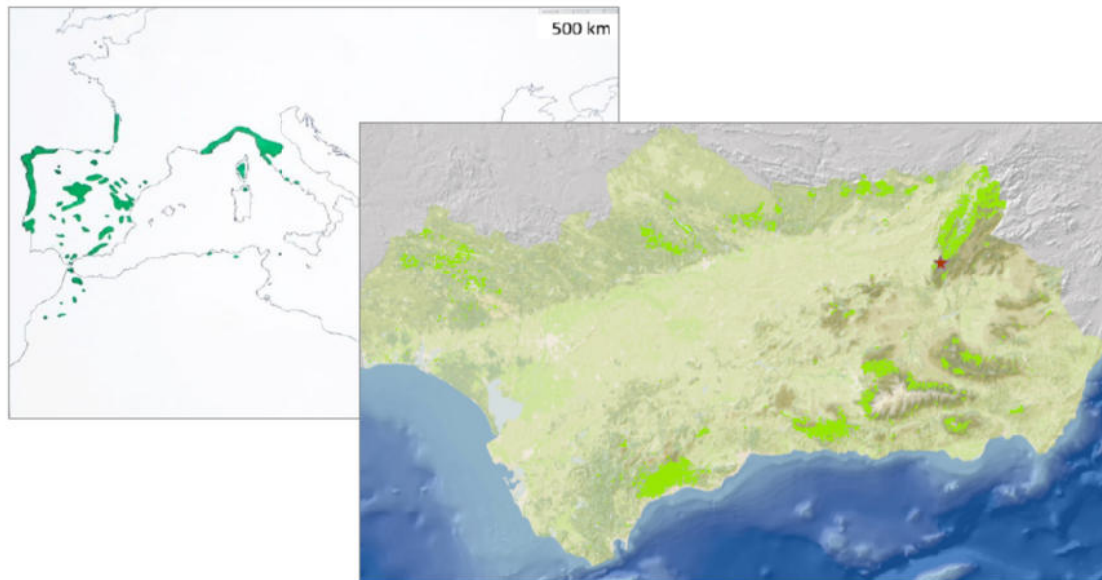


Figura 3: Distribución natural de *Pinus pinaster* en Europa occidental (mapa superior izquierdo) y distribución de la especie en la Península Ibérica, con localización del área de estudio en la Sierra de Cazorla (mapa principal). La distribución de la especie se representa en color verde. *Fuente: elaboración propia a partir de Ferriol Molina (s.f.) y bases cartográficas oficiales de REDIAM (Red de Información Ambiental de Andalucía), <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>, consulta: 5 de noviembre de 2025).*

2.3. Métodos dendrocronológicos

2.3.1. Diseño del muestreo

La selección del área de muestreo se realizó en coordinación con los gestores del Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas, quienes señalaron una zona próxima a la población de Vadillo-Castril con presencia de ejemplares de *Pinus pinaster* de elevada edad aparente. El trabajo de campo se llevó a cabo el 3 de abril de 2024, recorriéndose a pie el rodal de estudio para identificar individuos representativos (Figura 4).

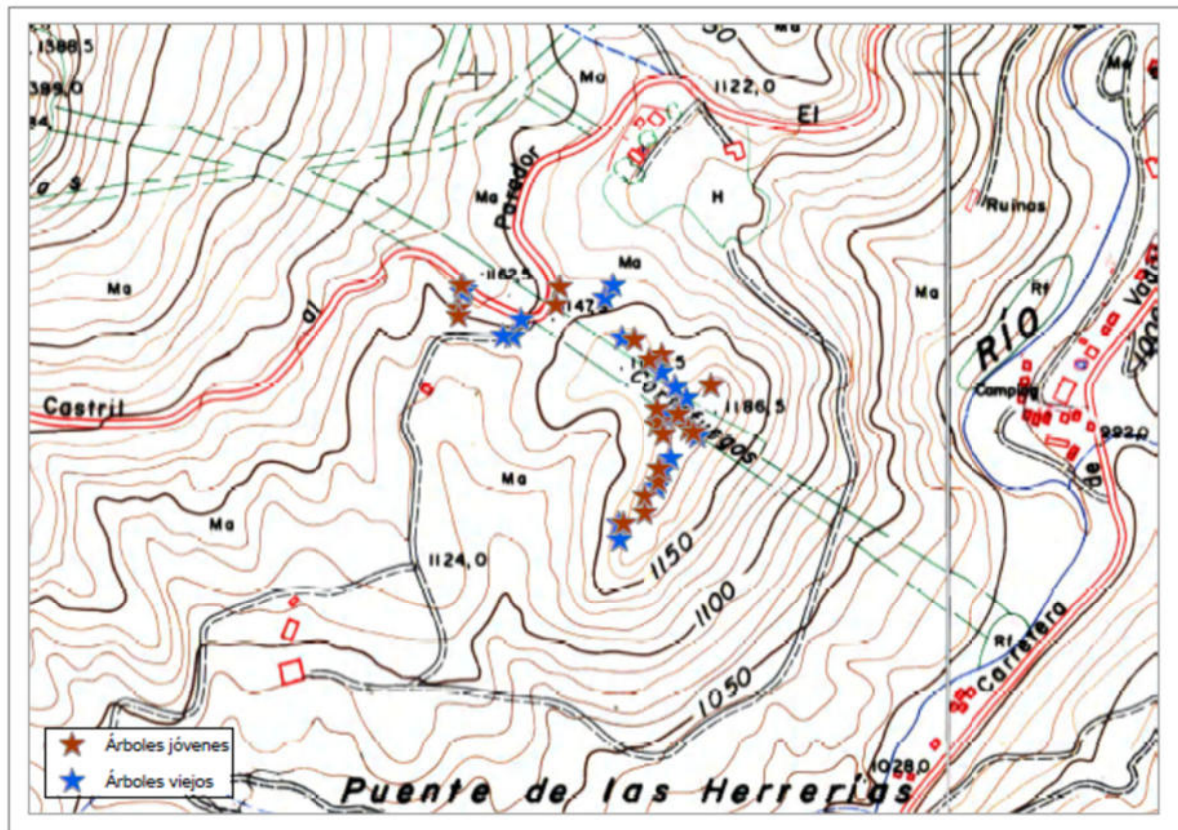


Figura 4: Localización espacial de los árboles muestreados en el área de estudio, diferenciando entre pies jóvenes (rojo) y pies viejos (azul). Los puntos representan la posición de cada individuo sobre cartografía topográfica, permitiendo visualizar su distribución y proximidad espacial dentro del rodal de muestreo. *Fuente: elaboración propia a partir de bases cartográficas oficiales de REDIAM (Red de Información Ambiental de Andalucía), <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>, consulta: 5 de noviembre de 2026).*

Se muestrearon un total de 40 árboles, diferenciados en dos grupos de edad aparente: 20 individuos jóvenes y 20 individuos viejos. Los criterios de selección incluyeron un buen estado fitosanitario, ausencia de heridas o resinación; ni deformaciones en el fuste y representatividad estructural dentro del rodal. En cada individuo se midió el diámetro normal mediante cinta pi, la altura total con un hipsómetro Vertex y se registró su posición geográfica mediante GPS (Tabla 1).

De cada árbol se extrajeron dos testigos de crecimiento (cores) a la altura estándar de 1,30 m, utilizando barrenas de Pressler de distinta longitud (40 cm para individuos de menor diámetro y 60 cm para individuos de mayor diámetro), con el objetivo de alcanzar la médula o zonas próximas a ella y garantizar una correcta estimación de la edad y del crecimiento radial. El número de series analizadas es superior al de individuos muestreados debido a

que se extrajeron dos radios por árbol; posteriormente, en el laboratorio, alguno de estos cores no superaron el control de calidad y tuvieron que ser descartados.

NOMBRE MONTE	Navahondona	COORDENADAS	Lat (N)	37,90622988
TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	13,9 °C		Long (E)	-2,94173
PRECIP. TOTAL ANUAL (mm)	420 mm	ALTITUD		1160 m
ÁRBOLES JÓVENES		ÁRBOLES VIEJOS		
Nº DE PIES	20	Nº DE PIES		21
DBH	42,56 cm	DBH		61,71 cm

Tabla 1: Caracterización de la zona de estudio y de los principales parámetros medios de los árboles jóvenes y viejos, como la edad mínima y la período temporal de estudio. *Fuente: elaboración propia.*

2.3.2. Extracción de cores



Figura 5: Trabajo de campo para el muestreo dendrocronológico de *Pinus pinaster* en el área de estudio, mostrando la extracción de testigos (cores). La imagen ilustra las condiciones del terreno y la estructura del rodal durante la fase de muestreo. *Fuente: Javier Vázquez Piqué.*

La extracción de los testigos de crecimiento se realizó mediante barrenas forestales de Pressler de 6 mm de diámetro (Haglöf®), compuestas por mango, asta perforadora y extractor. La barrena se introdujo de forma perpendicular al fuste y paralela a la pendiente del terreno, procurando alcanzar el centro del árbol para maximizar la representatividad del registro dendrocronológico (Figura 5).

Una vez alcanzada la profundidad deseada, el core fue separado del tejido leñoso mediante el extractor y extraído cuidadosamente. Todas las muestras se obtuvieron sin causar daños significativos a los árboles. Los testigos se almacenaron en pajitas de papel debidamente etiquetadas, conservando la corteza siempre que fue posible para facilitar la identificación del último anillo de crecimiento.

2.3.3. Procesamiento de muestras

El procesamiento de los cores se llevó a cabo en laboratorio DendrOlavide de dendrocronología, ciencias de la madera, ecología y gestión forestal de la Universidad Pablo de Olavide (Figuras 6 y 7) y la Universidad de Huelva, siguiendo los protocolos dendrocronológicos estandarizados. En primer lugar, los testigos se montaron sobre soportes de madera acanalados (Figura 6), asegurando una correcta orientación radial y una adecuada identificación mediante el etiquetado del código cada muestra y fecha de extracción (necesario para una correcta datación). Los cores fueron pegados a los soportes de madera y se dejaron secar durante un mínimo de 24 horas antes de su manipulación.

Una vez fijadas, las muestras fueron individualizadas y sometidas a un proceso de lijado progresivo para mejorar la visibilidad de los anillos de crecimiento. El lijado se realizó inicialmente de forma mecánica mediante lijadora de banda, empleando granos abrasivos decrecientes (desde 80 hasta 400), y se completó con un lijado manual en las zonas que requerían mayor definición (600 a 2000). Este procedimiento permitió identificar con claridad los límites entre anillos, así como posibles anillos estrechos, dobles o anillos falsos, especialmente frecuentes en especies mediterráneas (Gutiérrez, 2009).

El resultado final fue un conjunto de testigos de madera adecuadamente preparados para su posterior datación, medición y análisis dendrocronológico como se aprecia en la Figura 6.

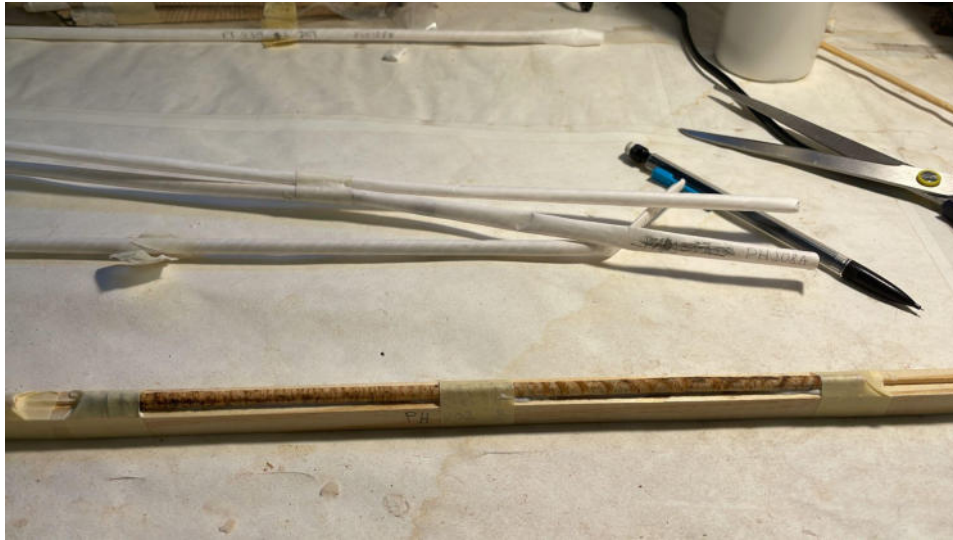


Figura 6: Core de *Pinus pinaster* extraído mediante barrena de Pressler y montado sobre soporte de madera para su preparación y posterior análisis dendrocronológico. Trabajo de laboratorio desarrollado en DendrOlavide (Universidad Pablo de Olavide) y los laboratorios de la Universidad de Huelva. El testigo se encuentra fijado y etiquetado, permitiendo la correcta identificación y el análisis de los anillos de crecimiento. *Fuente: M^a Llanos García López.*

2.3.4. Datación

Para la datación de las muestras de cores, previamente preparadas, se empleó el método de las secuencias de anillos, que facilita el conteo y la asignación cronológica de los anillos de crecimiento. De acuerdo con Stokes y Smiley, (1968), el anillo más externo de una secuencia corresponde siempre al año de crecimiento más reciente. En este estudio, dicho anillo se asignó al año 2023, dado que las muestras fueron extraídas en abril de 2024, antes del inicio del crecimiento anual de la especie en esa anualidad.

Esta datación también se llevó a cabo en el laboratorio DendrOlavide de dendrocronología, ciencias de la madera, ecología y gestión forestal de la Universidad Pablo de Olavide; que puso a disposición tanto los materiales, instrumentos y el software necesario para todo este proceso.

Esta característica permite realizar una asignación cronológica inicial de los anillos mediante un proceso de retro-datación, avanzando desde el anillo más externo hacia el interior del core. El conteo y la identificación de los anillos se llevaron a cabo con la ayuda de un microscopio estereoscópico Leica S APO Greenough del laboratorio DendrOlavide, dotado de una elevada calidad óptica y una adecuada profundidad de campo, lo que permitió una visualización clara y detallada de las estructuras anatómicas de la madera. Este equipo resultó especialmente adecuado para la diferenciación precisa entre madera temprana y

madera tardía, así como para la detección de anillos estrechos, falsos o ausentes (Fritts, 1976).

Con el fin de facilitar la verificación y el control de calidad del proceso de datación, cada década fue marcado con un punto de lápiz sobre el core; los años terminados en 50 se señalaron con dos puntos y los cambios de siglo terminados en 00 con tres puntos, siguiendo un criterio sistemático de señalización.

A través de este código de puntos para cada árbol, se llevó a cabo un proceso de datación cruzada o interdatación, consistente en la comparación sistemática de las cronologías individuales previamente obtenidas con la secuencia de puntos media de la población, con el objetivo de evaluar el grado de sincronización y coherencia entre los patrones de crecimiento de los distintos individuos analizados en una misma población. Tal y como señala Gutiérrez (2009), *“la interdatación se basa en la sincronía existente en los patrones de anillos característicos de los árboles que han crecido bajo las mismas condiciones climáticas durante un periodo común”*.

Mediante este procedimiento se identificaron y documentaron anillos con rasgos singulares, caracterizados por variaciones significativas en su anchura, atribuibles a la respuesta de los árboles frente a factores ambientales como el clima como principal y de forma secundaria a, la topografía o las condiciones edáficas, así como a episodios de crecimiento anómalo, tanto restrictivos como favorables. Estos anillos destacados fueron señalizados mediante marcas laterales en los testigos, registrando el año correspondiente para su posterior análisis.

2.3. Medición y validación

2.3.1. Medición dendrocronológica

Una vez completada la datación visual individual de las series y verificada su coherencia mediante el proceso de interdatación, se procedió a la medición de la anchura de los anillos de crecimiento. Para ello se empleó una mesa de medición Rinntech LINTAB™ 6 Tree-Ring Station, diseñada específicamente para aplicaciones dendrocronológicas en cores, secciones y discos de madera. Este sistema proporciona la precisión necesaria para el análisis del crecimiento radial y garantiza la obtención de datos fiables para su posterior tratamiento estadístico.

La mesa LINTAB™ (Figura 7) ubicada en el laboratorio DendrOlavide de dendrocronología, ciencias de la madera, ecología y gestión forestal, permitió la medición continua de los cores a lo largo de toda su longitud. Su estructura mecánica robusta, equipada con un husillo protegido, aseguró estabilidad y exactitud durante el proceso de medición. Asimismo, incorpora un sistema de iluminación puntual mediante luz LED que facilitó la correcta

identificación de los límites entre anillos de crecimiento. Las mediciones se realizaron con el apoyo de un microscopio estereoscópico Leica S APO Greenough, descrito en el apartado anterior. Dos ejemplos del resultado de la medición de los anillos de crecimiento de los cores extraídos durante el muestreo, se recoge en el *Anexo I*; el primero de un pie joven y el segundo de un pie viejo.

El registro y tratamiento de los datos se llevó a cabo mediante el software TSAP-Win™, utilizando su módulo específico de medición. Este programa permitió cuantificar la anchura total de los anillos de crecimiento. Los valores obtenidos se almacenaron como series temporales en formato ASCII de Tucson (.RWL), formato estándar en estudios dendrocronológicos y plenamente compatible con análisis estadísticos posteriores.

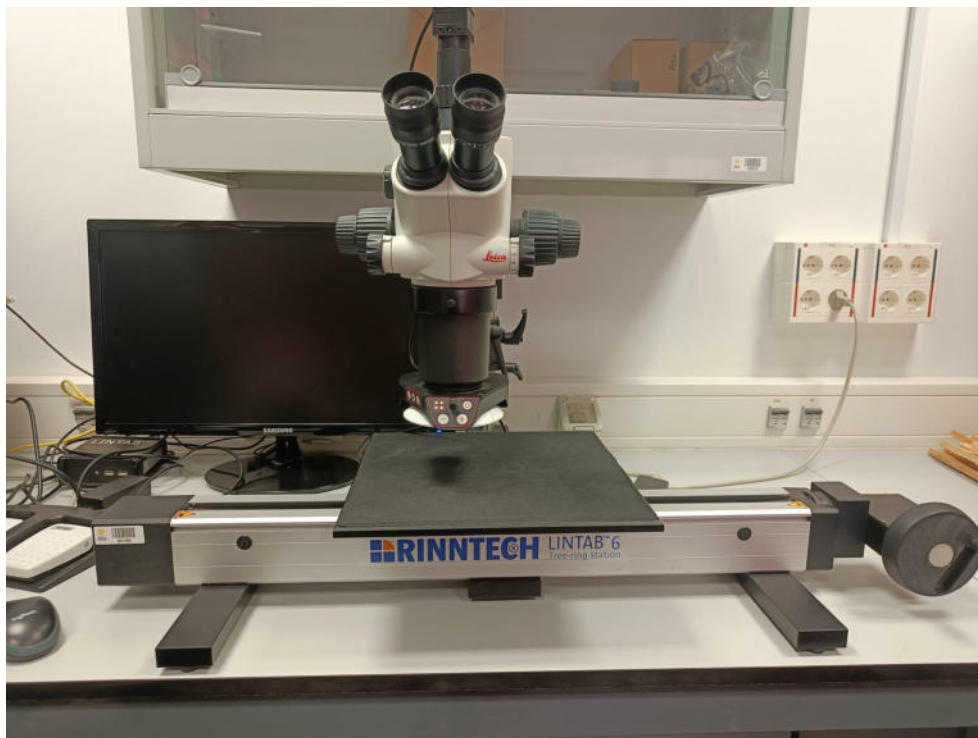


Figura 7: Sistema de medición dendrocronológica utilizado para la cuantificación de la anchura de los anillos de crecimiento, compuesto por una lupa binocular acoplada a una mesa de medición LINTAB, en el laboratorio DendrOlavide. El equipo permite la observación y medición precisa de los anillos de crecimiento en los testigos de madera obtenidos durante el muestreo. *Fuente: M^a Llanos García López.*

2.3.2. Validación estadística

La datación visual cruzada de los anillos de los árboles, una vez medidos se verificó estadísticamente mediante el programa COFECHA Versión 6.06P (Holmes, 1983) en las

instalaciones del laboratorio DendrOlavide, con el objetivo de verificar la correcta asignación temporal de los anillos de crecimiento y evaluar la coherencia interna del conjunto de series analizadas en la misma población. Este procedimiento permitió detectar posibles errores de datación y cuantificar la fortaleza de la señal común compartida entre las series, identificando segmentos temporales con inconsistencias y evaluando la adecuación de cada serie respecto a una cronología de referencia.

En una primera fase, COFECHA elimina la tendencia asociada al crecimiento relacionado con la edad del árbol, transformando las series originales en residuos para obtener registros estacionarios y comparables. Posteriormente, cada serie individual se contrasta con una cronología maestra o media de la población construida a partir del resto de las series disponibles, excluyendo siempre la serie evaluada. Esta comparación se basa en el cálculo del coeficiente de correlación (r), que cuantifica la similitud entre las variaciones interanuales del crecimiento.

El programa evalúa la calidad del fechado mediante un esquema de media móvil, dividiendo cada serie en intervalos de 50 años con un solapamiento de 25 años entre ellos. Cada segmento se compara con la cronología maestra correspondiente, lo que permite identificar inconsistencias anuales en cada individuo a lo largo del tiempo.

Los segmentos que presentan una baja correlación se consideran problemáticos. La aparición de alguno de estos segmentos no invalida una serie completa, pero cuando estos problemas se repiten indican que el registro no es fiable y debe revisarse o descartarse.

Los indicadores generales obtenidos en el análisis, como la correlación media entre los segmentos y el porcentaje de segmentos bien correlacionados, permiten valorar de forma objetiva la calidad del fechado cruzado. Valores altos indican que la cronología es coherente internamente, lo que resulta fundamental para realizar análisis dendroclimáticos fiables posteriormente.

Desde una perspectiva dendroclimática, una cronología con altos niveles de coherencia y un número reducido de inconsistencias detectadas mediante COFECHA refleja que el crecimiento radial está dominado por una señal común de origen climático. Por tanto, la validación del fechado cruzado constituye un paso previo esencial para la estandarización de las series, la construcción de cronologías y el análisis formal de las relaciones clima-crecimiento.

Con el objetivo de alcanzar valores adecuados de correlación basados en el propio estudio, los segmentos temporales problemáticos identificados durante este proceso fueron revisados de manera individual. En función de los resultados obtenidos, se aplicaron los siguientes criterios:

- ✓ Cuando un mismo individuo presentaba varios diámetros, se descartó el testigo con menor correlación.
- ✓ En los casos en los que se detectaron anillos ausentes o falsos, se corrigieron las dataciones correspondientes.
- ✓ Aquellas series o tramos que no alcanzaron un nivel aceptable de correlación fueron excluidos del conjunto final, dado que una sincronización deficiente compromete la fiabilidad de la cronología resultante.

En el Anexo II se recogen parte de los dos COFECHA finales obtenidos tras la validación estadística del fechado, la verificación de la correcta asignación temporal de los anillos de crecimiento y la evaluación de la coherencia interna del conjunto de series analizadas, para árboles jóvenes y viejos.

2.4. Análisis del crecimiento

Para la estimación del crecimiento radial de *Pinus pinaster*, las series de anchura de anillos se transformaron en incremento del área basal (IAB), con el fin de reducir el efecto geométrico asociado al aumento del radio del tronco y a la edad de los individuos. Este procedimiento asume un crecimiento concéntrico del fuste y permite eliminar la tendencia a la disminución progresiva del ancho de los anillos con el tamaño del árbol, facilitando la comparación del crecimiento entre individuos de distinta edad (Biondi et Qeadan, 2008).

El IAB se considera una medida adecuada del crecimiento radial anual, ya que refleja de forma más directa la producción de biomasa leñosa y resulta menos dependiente de la edad que la anchura de anillos, siendo ampliamente utilizado en estudios dendroclimáticos (Biondi et Hartsough, 2010). El incremento del área basal se calculó mediante la expresión:

$$IAB_t = \pi (r_t^2 - r_{t-1}^2)$$

donde IAB_t corresponde al Incremento de Área Basal en un determinado año t , r_t al radio acumulado del tronco en el año t y r_{t-1} al radio del año anterior.

Con el objetivo de analizar la variabilidad interanual del crecimiento y facilitar su comparación temporal, las series de IAB fueron normalizadas estadísticamente. Dado que los valores de incremento del área basal presentan una variabilidad interanual influida por factores estructurales y ambientales, se aplicó una estandarización tipo anomalía o *z-score*, procedimiento habitual en estudios dendroclimáticos para expresar el crecimiento como desviaciones relativas respecto al comportamiento medio de la serie (Cook et Kairiukstis,

1990; Biondi, 2014). La normalización se realizó mediante la expresión:

$$IA B_{norm} = \frac{IA B_t - \overline{IAB}}{\sigma_{IAB}}$$

donde $IA B_{norm}$ representa el incremento anual del área basal normalizado en el año t , $IA B_t$ corresponde al incremento de Área Basal en un determinado año t , $\overline{IAB}$ a la media de la serie y σ_{IAB} su desviación estándar.

De este modo, los valores positivos de la serie normalizada indican años con crecimiento superior a la media, mientras que los valores negativos reflejan años con crecimiento inferior al promedio, permitiendo identificar anomalías de crecimiento y evaluar su relación con la variabilidad climática interanual (Sánchez-Salguero et al., 2013).

2.5. Análisis de sensibilidad climática y resiliencia

2.5.1. Análisis de datos climáticos (T° y Precip)

Para evaluar la sensibilidad climática y la resiliencia del crecimiento radial de *Pinus pinaster*, se emplearon datos climáticos mensuales de precipitación y temperatura procedentes de la base de datos mundial del Climate Research Unit (CRU) de la University of East Anglia, (consultado en junio de 2025), correspondientes al entorno del área de Cazorla. La serie climática utilizada abarca el periodo 1950–2024, lo que proporciona una cobertura temporal amplia y continua, adecuada para el análisis de la variabilidad climática interanual y para la identificación de eventos extremos potencialmente relevantes para el crecimiento forestal.

Las variables climáticas consideradas incluyeron la temperatura media mensual (tg) y la precipitación acumulada mensual (prec). A partir de estas series diarias se generaron agregados mensuales y estacionales, calculando valores medios para las variables térmicas y acumulados para la precipitación. Este procedimiento permitió adaptar la resolución temporal de los datos climáticos a la escala anual del crecimiento radial registrada en los anillos, facilitando su comparación con las series dendrocronológicas.

Para la precipitación, se analizaron acumulados correspondientes a los mismos periodos temporales considerados para las variables térmicas, lo que permitió evaluar de forma integrada los efectos combinados de temperaturas elevadas y déficit hídrico sobre el crecimiento radial, así como su papel en la sensibilidad y capacidad de resiliencia de la especie frente a condiciones climáticas adversas.

2.5.2. Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)

De manera complementaria al análisis de la precipitación y la temperatura, se utilizó el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) con una escala temporal de 12 meses (SPEI-12) para caracterizar la dinámica de las sequías en el área de estudio. Este índice permite evaluar el balance hídrico climático a partir de datos mensuales de precipitación y temperatura, incorporando explícitamente el efecto de la demanda evaporativa atmosférica y, por tanto, el papel modulador de la temperatura en la aparición e intensificación de las sequías (Vicente-Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2014).

El SPEI-12 presenta valores positivos y negativos, donde los primeros indican condiciones húmedas y los segundos reflejan situaciones de déficit hídrico, permitiendo además clasificar la severidad de los episodios secos. La escala temporal anual utilizada resulta especialmente adecuada para el análisis del crecimiento radial de *Pinus pinaster*, ya que integra condiciones climáticas acumuladas relevantes para los procesos fisiológicos y cambiales que controlan la actividad del cambium y la formación de los anillos de crecimiento (Fritts, 1976; Rossi et al., 2008; Lloret et al., 2011; Camarero et al., 2018; Sánchez-Salguero et al., 2018).

2.5.3. Sensibilidad climática

El análisis de la sensibilidad climática se realizó en el contexto de un marco climático caracterizado por una marcada estacionalidad térmica y una elevada variabilidad interanual de la precipitación, condiciones típicas de los ecosistemas forestales mediterráneos de montaña (Ballesteros, 2008; Vicente-Serrano et al., 2010).

Para el análisis de la sensibilidad climática mensual del crecimiento radial de *Pinus pinaster* se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, que permite cuantificar la fuerza y el sentido de la relación estadística entre el incremento de área basal (IAB) medio de los árboles muestreados en el área de estudio, y las distintas variables climáticas analizada —temperatura media, precipitación y el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI-12)— (Camarero et al., 2018).

Estos coeficientes toman valores comprendidos entre -1 y $+1$, donde los valores positivos indican que ambas variables varían en el mismo sentido, mientras que los valores negativos reflejan una relación inversa. Las correlaciones positivas suelen interpretarse como la respuesta del crecimiento a condiciones climáticas favorables, lo que permite identificar factores que actúan como limitantes del crecimiento cuando su disponibilidad es baja. Por el contrario, las correlaciones negativas reflejan la influencia de factores de estrés, cuyo aumento restringe la actividad cambial y reduce el crecimiento radial. Es importante destacar que el signo de la correlación no implica causalidad directa, sino que debe interpretarse

como un resultado estadístico en el marco ecológico y climático del área de estudio (Fritts, 1976; Cook y Kairiukstis, 1990; Speer, 2010). .

En el contexto del presente trabajo, una correlación positiva implica que el crecimiento radial aumenta cuando lo hace la variable climática considerada, mientras que una correlación negativa indica que el incremento de dicha variable se asocia a una reducción del crecimiento.

Destacar que para el cálculo del crecimiento acumulado se consideraron los meses comprendidos entre agosto y diciembre del año previo al crecimiento del anillo (t-1) y entre enero y septiembre del año de crecimiento (t). Esta selección se basa en que la formación de los anillos de crecimiento depende tanto de los recursos almacenados el año anterior como de los asimilados durante el periodo vegetativo en curso, de modo que el crecimiento radial puede verse influido por las condiciones climáticas de ambos años (Creber et al., 1984; Camarero et al., 2018; Lloret, 2022).

2.5.4. Resistencia, recuperación y resiliencia

Con el objeto de analizar la respuesta del crecimiento del *Pinus pinaster* a eventos climáticos extremos en función de la edad, se evaluaron tres índices dendroecológicos ampliamente utilizados en estudios de crecimiento: resistencia, recuperación y resiliencia (Lloret et al., 2011).

La resistencia (R_t) expresa el grado de reducción del crecimiento durante un evento de perturbación concreto (en nuestro caso la sequía) y se calcula mediante la proporción entre el crecimiento tras la sequía y el crecimiento durante el respectivo periodo de sequía

La recuperación (R_c) cuantifica la capacidad del árbol para incrementar su crecimiento tras la perturbación, estima como la relación entre el rendimiento posterior y antes de la perturbación.

La resiliencia (R_s) refleja la capacidad de los árboles para alcanzar niveles de crecimiento similares a los registrados con anterioridad al evento perturbador (Lloret et al., 2011; Van der Maaten-Theunissen et al., 2021).

Al diferenciar árboles viejos de árboles jóvenes y estudiar su crecimiento por separado, fue posible evaluar las diferencias en la respuesta al estrés climático según la edad del árbol. En primer lugar, se identificaron varios años de las últimas décadas con crecimiento extremadamente bajos respecto a la serie total de crecimiento (Sánchez-Salguero et al., 2018). Estos años se combinaron posteriormente con los cuatro años más secos registrados desde 1950, que se definieron a partir de la precipitación acumulada entre los meses de

mayo y agosto, considerados críticos para el crecimiento radial de la especie estudiada.

Posteriormente, se calcularon los índices de resistencia, recuperación y resiliencia a partir de las series de crecimiento en valores normalizados siguiendo las siguientes formulas:

✓ R_t :

$$R_t = \frac{IAB_{dr}}{IAB_{pre}}$$

donde R_t es la Resistencia, IAB_{dr} corresponde al incremento del área basal de los años identificados como secos y IAB_{pre} sería el incremento del área basal de los tres años anteriores a la perturbación.

✓ R_c :

$$R_c = \frac{IAB_{post}}{IAB_{dr}}$$

donde R_c es la Recuperación, IAB_{post} corresponde al incremento del área basal de los tres años posteriores a la sequía y IAB_{dr} sería el incremento del área basal de los años identificados como secos.

✓ R_s :

$$R_s = \frac{IAB_{post}}{IAB_{pre}}$$

donde R_s es la Resiliencia, IAB_{post} corresponde al incremento del área basal de los tres años antes de la sequía y IAB_{pre} sería el incremento del área basal de los tres años anteriores a la perturbación.

De tal forma que:

$$\textbf{Resiliencia = Resistencia \times Recuperación}$$

El cálculo de los índices se realizó en los mismos años, pero se analizaron de forma independiente para árboles viejos y jóvenes, considerando una ventana temporal de cuatro años anteriores y cuatro años posteriores al año de perturbación, según Sánchez-Salguero et al., (2018) en esta especie. Este enfoque permitió evaluar comparativamente la magnitud

del impacto de los eventos extremos, así como la capacidad de recuperación y estabilidad del crecimiento en función de la edad de los árboles.

3. RESULTADOS

3.1. Crecimiento de *Pinus pinaster* frente al clima en función de la edad

El análisis dendrocronológico permitió caracterizar el crecimiento radial de *Pinus pinaster* diferenciando entre pies jóvenes y pies viejos, atendiendo a la longitud de las series, la coherencia interserie y la sensibilidad media del crecimiento, parámetros comúnmente utilizados para evaluar la calidad y la representatividad de las cronologías dendrocronológicas (Fritts, 1976; Schweingruber, 1996) (Tabla 2).

Clases	DBH (cm)	H (m)	Edad media (años)	Edad mínima (años)	Edad máxima (años)	Ventana temporal
Jóvenes	42,56	13,84	59,62	32	81	1943-2023
sd	14,76	3,47	15,81			
Viejos	61,71	16,87	145,77	83	300	1723-2023
sd	15,61	3,83	57,15			

Tabla 2: Valores medios y desviaciones estándar (sd) del diámetro normal (DBH), la altura (H) y la edad de los individuos clasificados como jóvenes y viejos, incluyendo la edad mínima, máxima y la ventana temporal de establecimiento.

En el caso de los pies jóvenes, el análisis se realizó sobre un total de 49 series datadas, con un periodo común comprendido entre 1943 y 2023 y una longitud total de 81 años en la cronología maestra. El número total de anillos analizados fue de 2615, de los cuales 2611 fueron verificados durante el control de calidad. La longitud media de las series fue de 53,4 años, lo que indica una adecuada extensión temporal y una buena replicación del crecimiento durante el periodo de estudio, condición necesaria para obtener una señal climática robusta. El coeficiente de correlación alcanzó en el COFECHA un valor de 0,752, reflejando una alta sincronización del crecimiento radial entre individuos y una señal común muy consistente, asociada a un factor climático de escala regional. La sensibilidad media fue de 0,241, lo que indica una variabilidad interanual moderada del crecimiento radial,

característica de cronologías con una respuesta climática bien expresada pero parcialmente amortiguada por factores biológicos.

Para los pies viejos, el análisis incluyó 33 series fechadas, que conformaron una cronología maestra con un periodo común comprendido entre 1724 y 2023, abarcando un total de 300 años. El número total de anillos analizados fue de 4256, de los cuales 4175 fueron verificados durante el proceso de control de calidad. La longitud media de las series fue de 129,0 años, lo que evidencia una elevada extensión temporal de los registros individuales y una adecuada representación de la variabilidad del crecimiento a escalas interanuales y decenales. El coeficiente de intercorrelación entre series alcanzó un valor de 0,602, considerado adecuado y estadísticamente robusto en estudios dendrocronológicos de larga duración. La sensibilidad media fue de 0,237, reflejando una variabilidad interanual moderada del crecimiento (Tabla 3).

Clases	Nº árboles Iniciales	Nº radios Iniciales	Nº Árboles Estudio	Nº radios Estudio	IAB (cm2)	Rbt	AC	MS	PC1 (%)
Jóvenes	20	53	21	49	3,266	0,752	- 0,034	0,241	33,73 %
Viejos	21	39	20	34	14,809	0,602	- 0,025	0,237	24,82%
Total	41	92	41	83					

Tabla 3: Número de árboles y radios iniciales y de estudio, área basal (IAB), coeficiente de interrelación (Rbt), autocorrelación (AC), sensibilidad media (MS) y porcentaje de varianza explicada por el primer componente principal (PC1) para los grupos de individuos jóvenes y viejos.

Los valores de la correlación media entre series (AC) fueron más altos en los árboles viejos que en los jóvenes, lo que indica una limitada dependencia temporal entre las series individuales y el clima de los años previos. No obstante, los valores elevados de la correlación entre árboles (Rbt) y del primer componente principal (PC1) ponen de manifiesto la existencia de una señal común consistente compartida por las series, presumiblemente de origen climático (Tabla 3). Estos resultados indican que, aunque las series individuales no presentan una alta autocorrelación, sí responden de forma similar a los factores climáticos que controlan el crecimiento radial a escala interanual.

En cuanto al incremento de área basal (IAB, cm²), en la Figura 8 que se expone a

continuación, se muestra la evolución temporal a lo largo del periodo comprendido entre los años 1725 y 2023, diferenciando entre árboles jóvenes y árboles viejos.

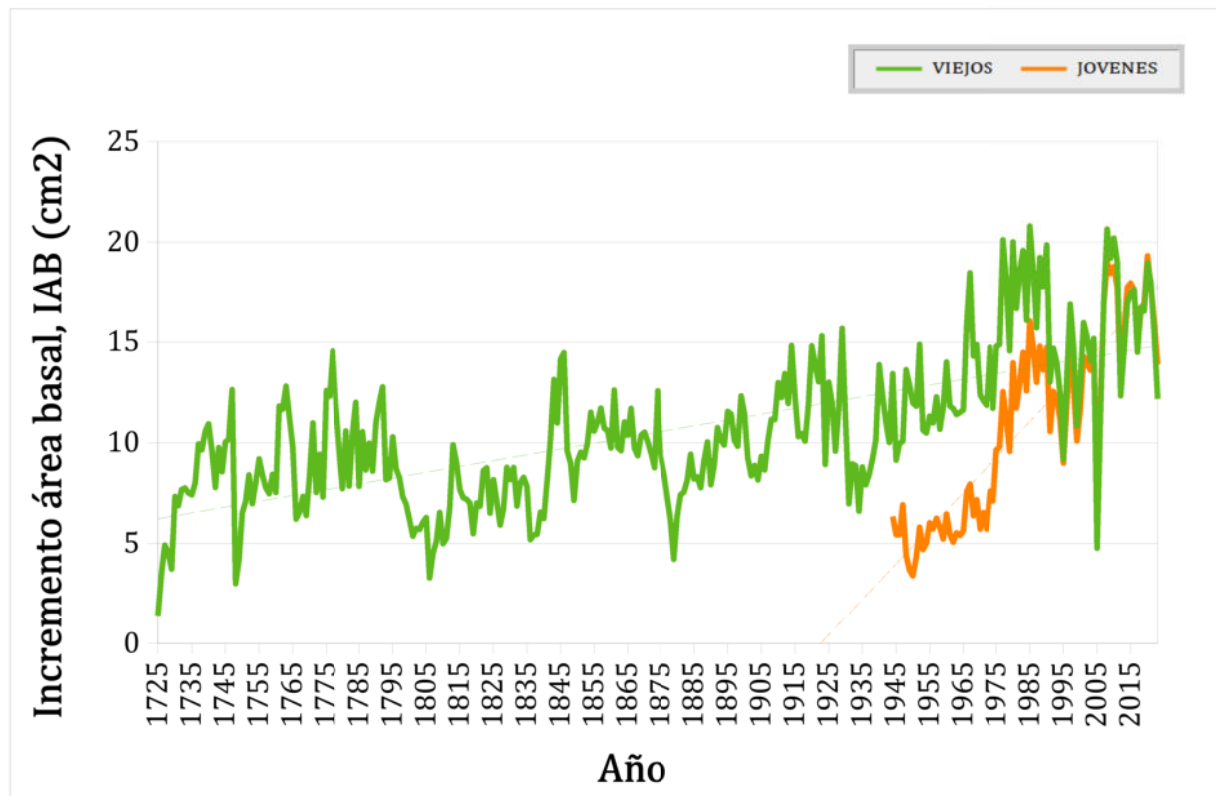


Figura 8: Evolución temporal del incremento de área basal (IAB, cm²) de *Pinus pinaster* en el área de estudio diferenciando árboles jóvenes y viejos. Fuente: datos obtenidos de las mediciones de los cores.

Como se aprecia en la Figura 8, a largo plazo la serie de árboles viejos presenta una tendencia positiva moderada del incremento de área basal, reflejada en la línea de regresión. No obstante, esta tendencia ascendente se ve interrumpida por descensos abruptos recurrentes del IAB.

La serie de árboles jóvenes muestra una elevada variabilidad interanual; especialmente a partir de finales del siglo XX donde se observa un incremento tanto en la amplitud de las oscilaciones como en la frecuencia de descensos bruscos.

La serie de árboles jóvenes, presenta valores de IAB generalmente inferiores a la de los árboles viejos en las primeras décadas, pero muestra una pendiente positiva más acusada. Sin embargo, esta serie también evidencia una alta sensibilidad a episodios de estrés, con descensos pronunciados en años concretos (coincidentes con los años de sequía).

En el *Anexo III* se presentan las tablas que recogen los datos iniciales empleados en el estudio, correspondientes a los individuos de *Pinus pinaster* seleccionados para el análisis dendrocronológico. Estos datos incluyen las principales variables dendrométricas y cronológicas, organizadas en función de las clases de edad consideradas (pies jóvenes y pies viejos).

3.2. Sensibilidad climática

La temperatura media anual del área de estudio presentó un valor aproximado de 13,9 °C, con máximos estivales que superan los 40 °C y mínimos invernales inferiores a -10 °C. El análisis temporal (Figura 9) mostró una tendencia creciente clara y estadísticamente significativa de la temperatura media anual durante el periodo 1950–2024 ($R = 0,80$; $p < 0,001$), en concordancia con los patrones de calentamiento observados a escala regional y global. Este incremento térmico resulta especialmente relevante desde el punto de vista dendroclimático, ya que intensifica la demanda evaporativa y amplifica el estrés hídrico durante la estación de crecimiento.

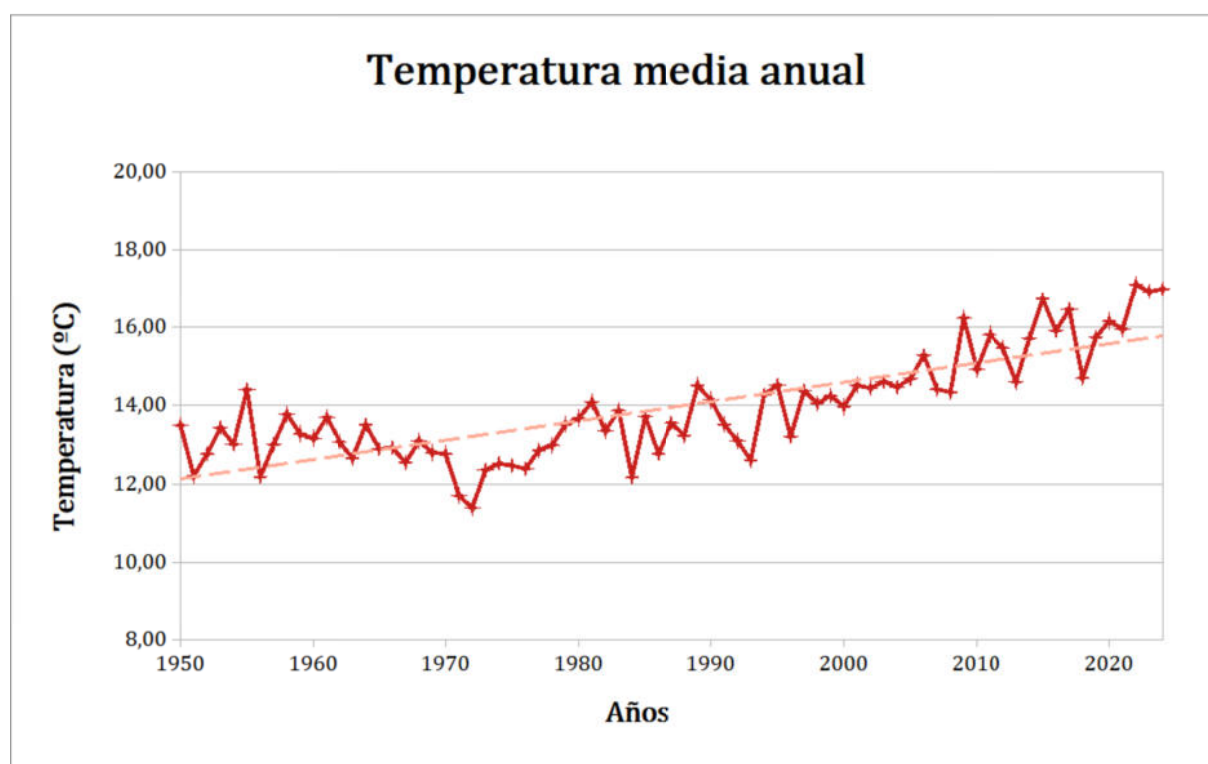


Figura 9: Evolución de la temperatura media anual (°C) en la Sierra de Cazorla durante el periodo 1950–2024. La línea continua representa los valores anuales, mientras que la línea discontinua muestra la tendencia lineal. *Fuente: datos climáticos CRU.*

La precipitación anual se caracterizó por una elevada variabilidad interanual y una acusada estacionalidad, sin una tendencia significativa a largo plazo, patrón habitual en climas mediterráneos. La concentración de las lluvias en primavera y otoño, junto con el acusado déficit hídrico estival, condiciona de forma directa la disponibilidad de agua durante los periodos clave del crecimiento radial de *Pinus pinaster* (Figura 10).

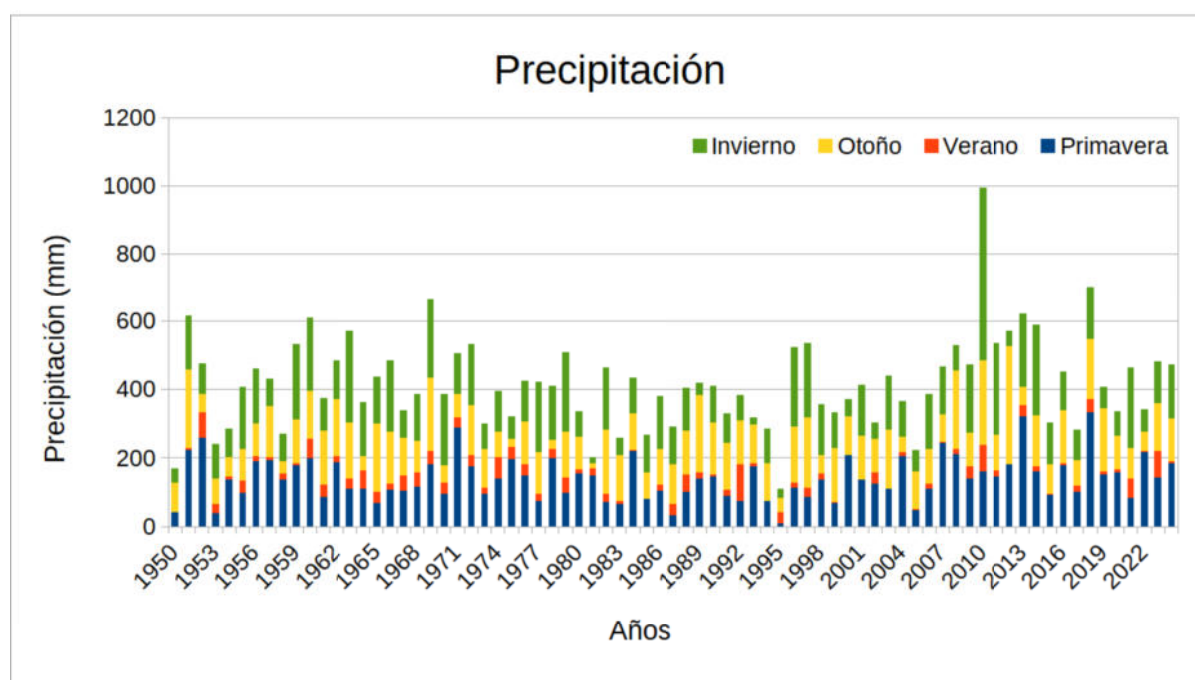


Figura 10: Evolución de la precipitación total anual (mm) en la Sierra de Cazorla durante el periodo 1950–2024, desagregada por estaciones (invierno, primavera, verano y otoño). Las barras representan la contribución estacional a la precipitación anual. *Fuente: elaboración propia con datos climáticos CRU. Fuente: datos climáticos CRU.*

El análisis del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración a 12 meses (SPEI-12) en Cazorla representado en la Figura 11, puso de manifiesto la alternancia de fases húmedas y secas, destacando episodios de sequía severa y extrema en los años 1995, 1999, 2005 y 2012.

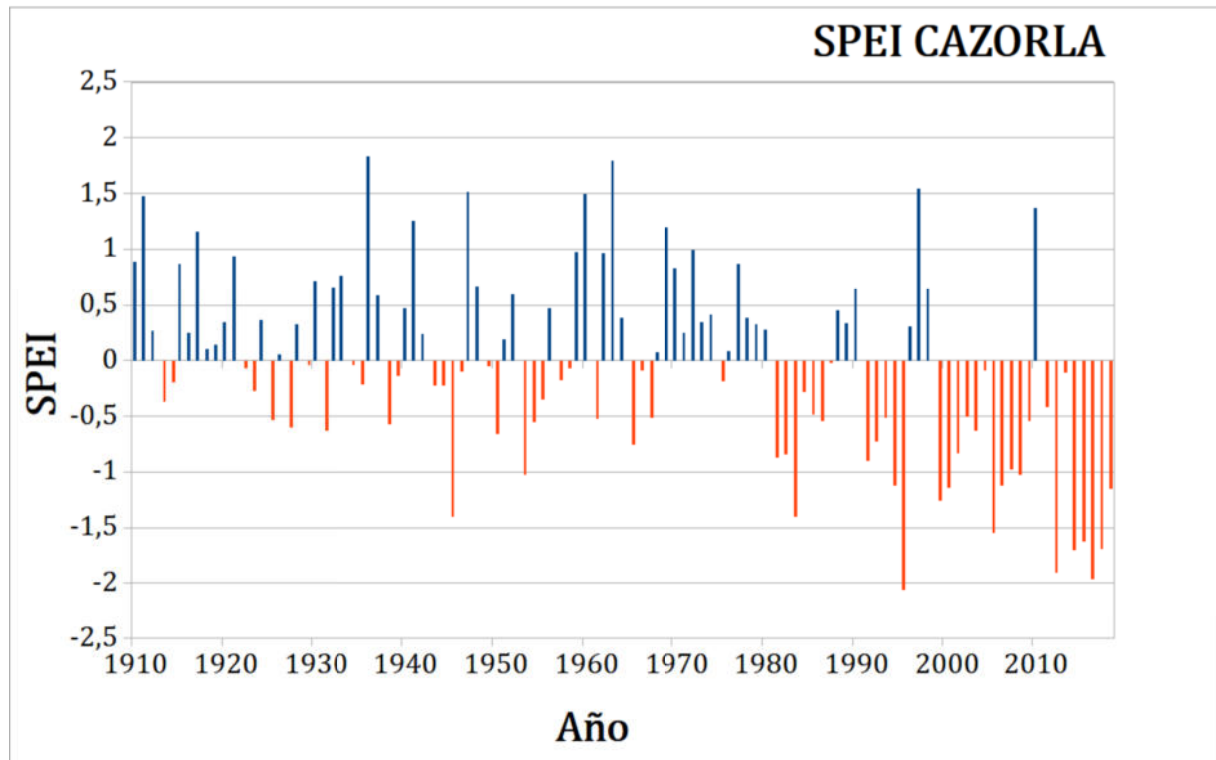


Figura 11: Evolución temporal del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración a 12 meses (SPEI-12) para la Sierra de Cazorla durante el periodo aproximado 1950–2023. Los valores positivos (azul) indican condiciones húmedas, mientras que los valores negativos (rojo) reflejan situaciones de déficit hídrico. *Fuente: datos climáticos CRU.*

Con las variables anteriores se hizo el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson del crecimiento de de árboles jóvenes y viejos con la temperatura, precipitación e índice SPEI para el estudio de la respuesta climática diferenciada del crecimiento radial de *Pinus pinaster* en función de la edad y de la escala temporal considerada, como se puede observar en la Figura 12.

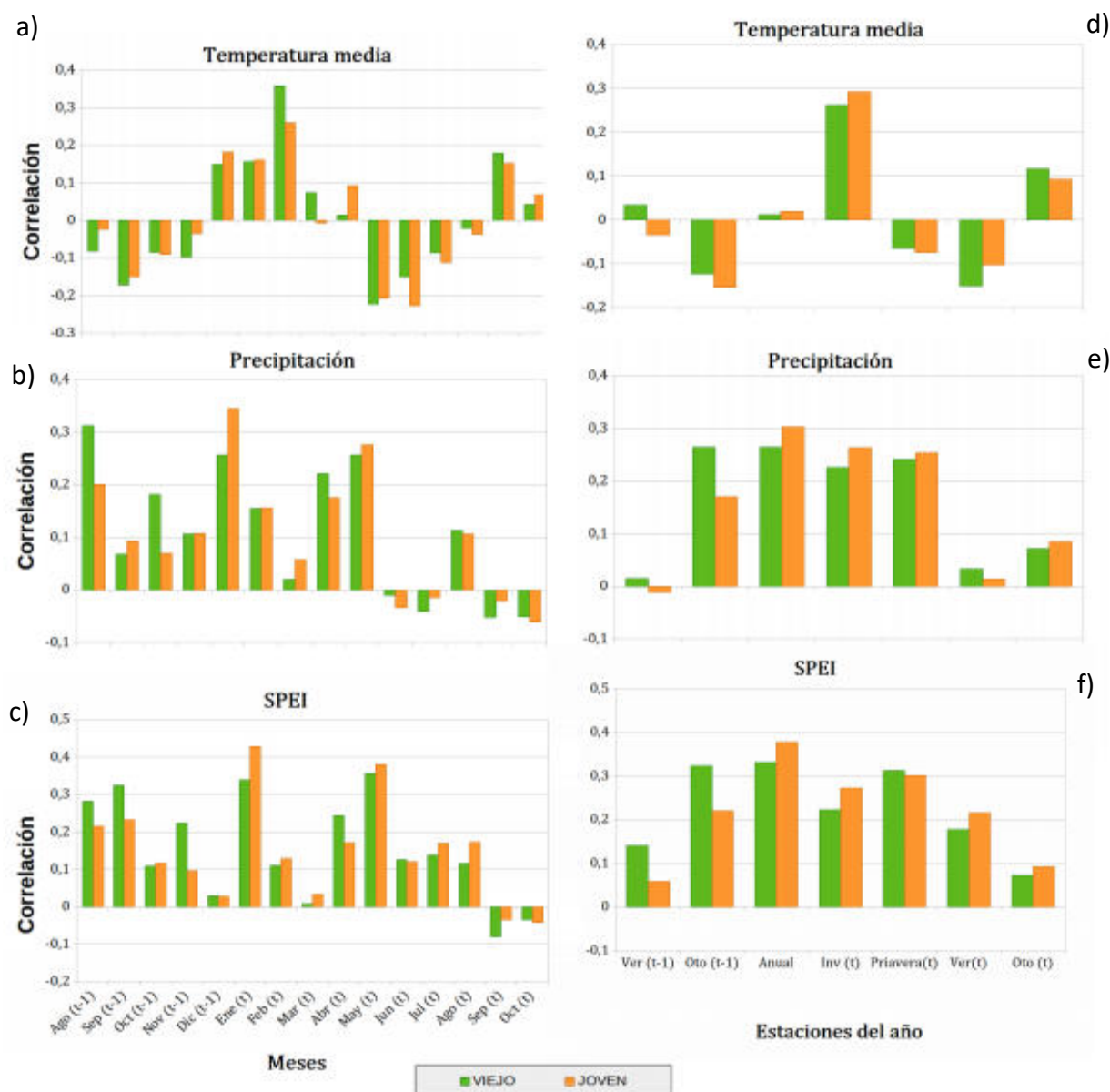


Figura 12: Coeficientes de correlación de Pearson entre el incremento de área basal (IAB) y las variables climáticas de T^a media, precipitación e índice SPEI para *Pinus pinaster*, diferenciando entre árboles jóvenes y viejos. Los paneles a)–c) corresponden al análisis con datos anuales: a) T^a media, b): precipitación, c) SPEI, mientras que los paneles d)–f) muestran los resultados del análisis con datos estacionales: d) T^a media, e) precipitación, f) SPEI.

Tras el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson, se observa que, aunque ambas clases de edad presentan patrones de respuesta similares, los árboles jóvenes tienden a mostrar coeficientes de correlación de mayor magnitud que los árboles viejos (Figura 12).

La precipitación muestra una relación mayoritariamente positiva con el crecimiento radial en ambas clases de edad, aunque con diferencias claras según el momento del año. A escala mensual (Figura 12.a), los valores máximos de correlación se registran en los meses de octubre, noviembre y diciembre del año previo ($t-1$) y en marzo, abril y mayo del año de crecimiento (t). Por el contrario, los valores mínimos, próximos a cero, se concentran en los meses de junio, julio y agosto, coincidiendo con el periodo estival. Este patrón mensual es común a árboles jóvenes y viejos; sin embargo, los árboles jóvenes presentan coeficientes sistemáticamente más elevados, lo que indica una mayor dependencia del crecimiento respecto a la disponibilidad hídrica. A escala estacional (Figura 12.b), las correlaciones se refuerzan, destacando el efecto positivo de la precipitación anual y de las estaciones de otoño, invierno y primavera, con una respuesta nuevamente más intensa en los árboles jóvenes.

En el caso de la temperatura media, el análisis mensual (Figura 12.c) muestra un patrón más contrastado. Los valores mínimos de correlación, de signo negativo, se concentran en los meses de julio y agosto, prolongándose parcialmente a septiembre, y son más acusados en los árboles jóvenes. Por el contrario, los valores máximos, positivos, se registran en los meses invernales (enero y febrero) y a comienzos de la primavera (marzo), especialmente en los individuos jóvenes. El análisis estacional (Figura 12.d) confirma este comportamiento, con correlaciones negativas en verano y positivas en primavera y en el valor anual, mostrando una señal térmica más marcada en los árboles jóvenes y una respuesta más amortiguada en los árboles viejos.

El índice SPEI es la variable climática que presenta las correlaciones positivas más elevadas y consistentes con el crecimiento radial en ambas clases de edad. A escala mensual (Figura 12.e), los valores máximos de correlación se registran principalmente en los meses de enero y mayo, mientras que las correlaciones disminuyen progresivamente durante el verano del año de crecimiento. Los valores mínimos se observan en septiembre y octubre, donde las correlaciones son ligeramente negativas en ambas clases de edad, lo que indica una pérdida de la relación positiva entre crecimiento y balance hídrico al final del periodo vegetativo. En general, los árboles jóvenes presentan coeficientes más elevados durante la mayor parte del año, especialmente en los meses invernales y primaverales.

A escala estacional (Figura 12.f), las correlaciones con el SPEI son positivas en todas las estaciones, con máximos en la escala anual y durante el invierno y la primavera, y valores progresivamente menores en verano y otoño, alcanzando los mínimos en esta última estación. En esta escala, las diferencias entre edades se mantienen: los árboles jóvenes

muestran coeficientes sistemáticamente más altos, mientras que los árboles viejos presentan una respuesta positiva pero más moderada y estable.

3.3. Respuesta del crecimiento a eventos climáticos extremos

La respuesta del crecimiento arbóreo frente a los años de sequía severa identificados (1995, 1999, 2005 y 2012) mostró diferencias claras entre árboles viejos y jóvenes para los índices de resistencia, recuperación y resiliencia (Figura 13).

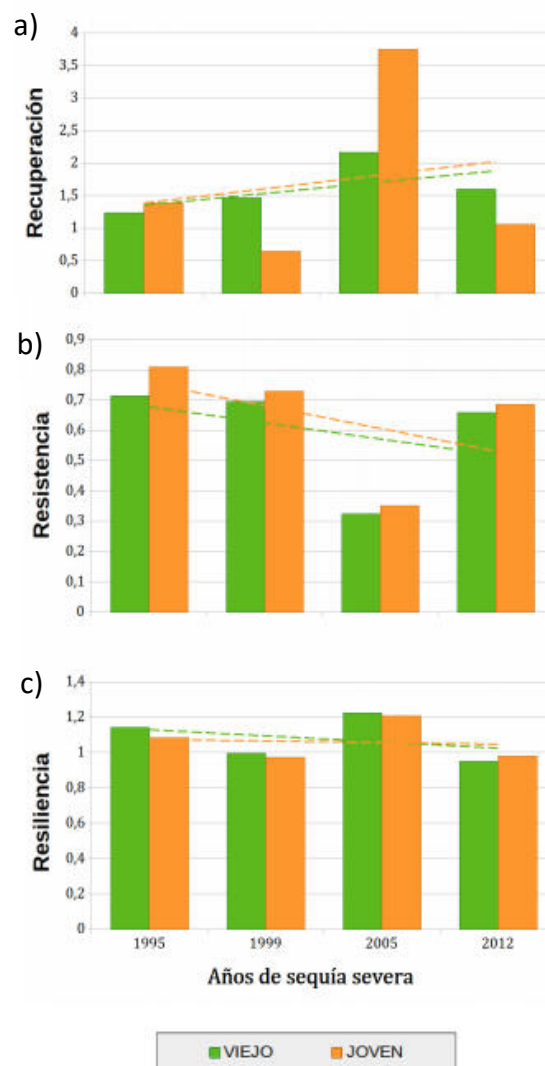


Figura 13: Valores de resistencia, recuperación y resiliencia del crecimiento radial en árboles viejos (verde) y árboles jóvenes (naranja) para los años de sequía severa identificados (1995, 1999, 2005 y 2012).

Como se observa en la Figura 13.a, la resistencia presentó valores relativamente elevados en ambas clases de edad, aunque con diferencias consistentes entre árboles viejos y jóvenes. En general, los árboles jóvenes mostraron valores de resistencia superiores a los de los árboles viejos en todos los eventos de sequía analizados, lo que indica una menor reducción relativa del crecimiento durante los años de perturbación. El año 2005 destacó por presentar los valores de resistencia más bajos en ambos grupos, especialmente en los árboles viejos, evidenciando un impacto más intenso de esta sequía sobre el crecimiento radial. Por el contrario, los años 1995 y 1999 mostraron valores de resistencia más elevados, sugiriendo un efecto menos severo de la sequía.

El análisis de la recuperación mostró una elevada variabilidad interanual y diferencias más marcadas entre clases de edad, según la Figura 13.b. Los árboles viejos presentaron valores de recuperación moderados y relativamente estables a lo largo de los distintos eventos de sequía. En contraste, los árboles jóvenes mostraron una respuesta más variable, destacando un valor de recuperación notablemente alto tras la sequía de 2005, lo que indica una fuerte capacidad de incremento del crecimiento posterior al evento extremo. Sin embargo, en otros años, como 1999 y 2012, los árboles jóvenes presentaron valores de recuperación inferiores a los observados en los árboles viejos.

La resiliencia presentó valores cercanos o superiores a la unidad en ambas clases de edad, lo que indica una capacidad general de los árboles para alcanzar niveles de crecimiento similares a los registrados antes de la sequía (Figura 13.c). Los árboles viejos mostraron valores de resiliencia ligeramente superiores y más estables entre los distintos eventos de sequía analizados. En los árboles jóvenes, aunque la resiliencia también fue elevada, se observó una mayor variabilidad interanual, con valores más bajos en los años 1999 y 2012. El año 2005 destacó nuevamente por presentar los valores de resiliencia más altos en ambos grupos.

En conjunto, los resultados indican que los árboles jóvenes presentan una mayor resistencia inmediata frente a los eventos de sequía severa, pero una respuesta posterior más variable, especialmente en términos de recuperación. Por el contrario, los árboles viejos muestran una menor resistencia inicial, pero una mayor estabilidad en la recuperación y resiliencia, lo que sugiere una respuesta más amortiguada y consistente frente a perturbaciones climáticas extremas.

La respuesta diferenciada entre individuos jóvenes y viejos respalda la hipótesis de que la edad modula la sensibilidad climática y la resiliencia, siendo los árboles más estables pero con menor capacidad de incremento relativo, y los jóvenes más dinámicos pero potencialmente más sensibles al estrés hídrico.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que el crecimiento radial de *Pinus pinaster* en la Sierra de Cazorla está fuertemente influido por la variabilidad climática, especialmente por la disponibilidad hídrica, y que dicha respuesta se encuentra modulada por la edad de los individuos (Navarro-Cerrillo et al., 2014). Los patrones observados en el incremento de área basal (IAB), junto con los análisis de sensibilidad climática y resiliencia, reflejan la importancia del régimen climático mediterráneo de montaña, caracterizado por una marcada sequía estival y una elevada irregularidad interanual de las precipitaciones, como principal factor limitante del crecimiento forestal (Sánchez-Salguero et al., 2013) (Figuras 8 y 12).

Como se observa en la Figura 8, el patrón general sugiere un aumento progresivo del crecimiento radial medio a lo largo del periodo de estudio, compatible con procesos de liberación estructural y con cambios históricos en la gestión forestal (Tiscar et Linares, 2011).

No obstante, se identifican descensos abruptos y recurrentes del IAB, que ponen de manifiesto la influencia de eventos climáticos adversos, principalmente episodios de sequía severa. La elevada variabilidad interanual observada en la serie correspondiente a los árboles jóvenes evidencia una alta sensibilidad del crecimiento radial a la variabilidad climática, siendo los mínimos pronunciados del IAB interpretables como respuestas a eventos de sequía.

Asimismo, el incremento observado a partir de finales del siglo XX, tanto en la amplitud de las oscilaciones como en la frecuencia de los descensos bruscos, sugiere una mayor inestabilidad del crecimiento en décadas recientes (Camarero et al., 2013; Sánchez-Salguero et al., 2018). Este patrón podría estar asociado al aumento de la variabilidad climática y a una mayor ocurrencia de eventos extremos en el contexto del cambio climático.

Tal y como se aprecia en la Figura 8, los valores de IAB son generalmente inferiores en la serie de árboles jóvenes en comparación con la de los árboles viejos durante las primeras décadas del periodo analizado, aunque presentan una pendiente positiva más acusada. Este comportamiento indica una mayor capacidad de incremento relativo del área basal en los individuos jóvenes, coherente con fases iniciales del desarrollo y con una mayor plasticidad fisiológica (Colangelo et al., 2021).

Sin embargo, esta serie también muestra una elevada sensibilidad a episodios de estrés, con descensos pronunciados en años concretos, coincidentes con episodios de sequía. Ello sugiere que, aunque los árboles jóvenes pueden presentar tasas de crecimiento más elevadas bajo condiciones favorables, también son más vulnerables a eventos climáticos

extremos, especialmente a sequías intensas (Camarero et al., 2018).

En conjunto, el patrón observado indica que, bajo un escenario de cambio climático caracterizado por un aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías, la estabilidad del crecimiento radial de *Pinus pinaster* podría verse comprometida, especialmente en los individuos más jóvenes, con implicaciones relevantes para la dinámica futura de estas masas forestales.

El análisis dendroclimático (Figura 12) pone de manifiesto el papel determinante de la precipitación y del balance hídrico climático en el control del crecimiento radial. Las correlaciones positivas entre el IAB y la precipitación, así como con el índice SPEI, tanto a escala mensual como estacional, indican que unas condiciones hídricas favorables durante los meses fríos y de transición hacia el periodo vegetativo favorecen la actividad cambial. Este comportamiento es consistente con lo descrito para *P. pinaster* en otros sectores de la Península Ibérica, donde la recarga hídrica previa al inicio del crecimiento anual resulta clave para el desarrollo radial (Bogino et Bravo, 2008; Nabais et al., 2014; Camarero et al., 2018).

Como se ha comentado en el apartado de el análisis de la sensibilidad climática los resultados ponen de manifiesto una respuesta climática clara del crecimiento radial de *Pinus pinaster*, modulada tanto por la variable climática analizada como por la escala temporal y, de forma destacada, por la clase de edad de los individuos (Figura 12).

En términos generales, los árboles jóvenes presentan coeficientes de correlación más elevados que los árboles viejos, lo que indica una mayor sensibilidad del crecimiento radial al aumento de la variabilidad climática. En el caso de la precipitación, el análisis estacional (Figura 12.b) muestra correlaciones positivas más consistentes en ambas clases de edad, con valores ligeramente superiores en los individuos jóvenes, en concordancia con estudios previos que señalan la disponibilidad hídrica como un factor determinante del crecimiento radial en especies mediterráneas (Fritts, 1976; Sánchez-Salguero et al., 2013, 2018; Camarero et al., 2018).

En relación con la temperatura media, el análisis mensual (Figura 12.c) pone de manifiesto la existencia de correlaciones negativas durante los meses estivales y comienzos del otoño, siendo estas más acusadas en los árboles jóvenes. Por el contrario, durante el invierno y el inicio de la primavera se observan correlaciones positivas, especialmente en los individuos jóvenes. El análisis estacional (Figura 12.d) confirma este patrón, mostrando una señal térmica más intensa en los árboles jóvenes, tanto a escala estacional como en el valor anual, un comportamiento ampliamente documentado en ecosistemas mediterráneos (Peñuelas et al., 2008; Sánchez-Salguero et al., 2012).

El índice SPEI presenta un patrón de respuesta similar en árboles viejos y jóvenes; no

obstante, los individuos jóvenes muestran coeficientes de correlación de mayor magnitud, lo que evidencia una mayor sensibilidad del crecimiento al balance hídrico. En el análisis estacional (Figura 12.f), las correlaciones positivas se mantienen en todas las estaciones del año, con valores más elevados en invierno y primavera, especialmente en los árboles jóvenes, mientras que los árboles viejos presentan una respuesta más moderada y estable. Estos resultados confirman la capacidad del SPEI para captar los efectos de la sequía sobre el crecimiento forestal, tal y como ha sido descrito en estudios previos (Vicente-Serrano et al., 2010; Camarero et al., 2018; Gazol et al., 2018).

En conjunto, los resultados representados en la Figura 12.a–f indican que el crecimiento radial de *Pinus pinaster* está fundamentalmente asociado a la disponibilidad hídrica, mientras que la temperatura actúa como un factor modulador que intensifica los efectos del déficit de agua, especialmente durante los periodos cálidos, en concordancia con lo descrito en la literatura existente (Fritts, 1976; Camarero et al., 2010). La diferenciación por clases de edad permitió identificar respuestas climáticas contrastadas, caracterizadas por una mayor sensibilidad y variabilidad interanual del crecimiento en los árboles jóvenes, frente a una respuesta más amortiguada en los individuos viejos, tal y como ha sido señalado en estudios previos (Carrer et Urbinati, 2004; McDowell et al., 2010; Colangelo et al., 2021).

El uso del índice SPEI como variable integradora permitió captar de forma más precisa la respuesta del crecimiento a la sequía, al considerar simultáneamente los efectos de la precipitación y la temperatura. La fuerte señal positiva observada entre el IAB y el SPEI refuerza la idea de que el crecimiento de *P. pinaster* responde de manera más clara al balance hídrico que a las variables climáticas analizadas de forma aislada, tal y como han señalado estudios previos en ecosistemas mediterráneos (Vicente-Serrano et al., 2010; Sánchez-Salguero et al., 2018; Vieira et al., 2017).

Por el contrario, la temperatura media mostró un efecto predominantemente negativo sobre el crecimiento, especialmente durante los meses y estaciones más cálidas (Sánchez-Salguero et al., 2012, 2018). Este patrón puede atribuirse al incremento de la demanda evaporativa atmosférica y al consiguiente aumento del estrés hídrico, incluso en años con precipitaciones moderadas. Este efecto limitante de las temperaturas estivales elevadas ha sido ampliamente documentado en bosques mediterráneos, donde el calentamiento intensifica los episodios de déficit hídrico y reduce la actividad cambial (Peñuelas et al., 2008; Sánchez-Salguero et al., 2012).

La diferenciación por clases de edad permitió identificar respuestas climáticas contrastadas entre árboles jóvenes y viejos. Los individuos jóvenes presentaron una mayor variabilidad interanual del crecimiento y una mayor sensibilidad tanto a las condiciones hídricas como térmicas, lo que sugiere una mayor vulnerabilidad frente a episodios de sequía y calor extremo (Navarro-Cerrillo et al., 2014; Colangelo et al., 2021). Este comportamiento podría estar relacionado con sistemas radiculares menos desarrollados y una mayor dependencia

de las condiciones climáticas superficiales. En contraste, los árboles viejos mostraron una respuesta más amortiguada y estable, con cronologías más largas y una menor sensibilidad relativa, lo que apunta a una mayor capacidad de aclimatación a largo plazo, aunque acompañada de menores tasas de crecimiento relativo (Carrer et Urbinati, 2004; McDowell et al., 2010).

La respuesta del crecimiento frente a los episodios de sequía severa seleccionados (1995, 1999, 2005 y 2012) puso de manifiesto estrategias diferenciadas entre clases de edad a través de los índices de resistencia, recuperación y resiliencia (Figura 13). Mientras que la resistencia refleja la reducción inmediata del crecimiento durante el año de sequía, la resiliencia evalúa la capacidad de los árboles para recuperar niveles de crecimiento similares a los previos a la perturbación (Lloret et al., 2011). En este sentido, los árboles jóvenes mostraron, en general, una mayor resistencia inicial, indicando una menor reducción relativa del crecimiento durante los eventos de sequía, aunque acompañada de una recuperación posterior más variable entre episodios. Por el contrario, los árboles viejos presentaron una menor resistencia inicial, pero valores de resiliencia más estables y próximos a la unidad, lo que indica una mayor capacidad para alcanzar niveles de crecimiento similares a los previos a la sequía.

Este patrón concuerda con el marco conceptual propuesto por Lloret et al. (2011), quienes señalaron que la frecuencia creciente de perturbaciones climáticas puede reducir progresivamente la resiliencia de los árboles al agotar sus reservas internas. Asimismo, la mayor estabilidad observada en los individuos viejos podría estar relacionada con procesos de aclimatación fisiológica y estructural a largo plazo, a pesar de las limitaciones hidráulicas asociadas al aumento de la edad (Ryan et Yoder, 1997; Hubbard et al., 1999).

En conjunto, los resultados obtenidos confirman la hipótesis planteada en este trabajo, evidenciando que la edad constituye un factor clave en la modulación de la sensibilidad climática y la resiliencia del crecimiento radial de *Pinus pinaster*. Bajo un escenario de cambio climático caracterizado por un aumento de las temperaturas y una mayor frecuencia e intensidad de las sequías, estos patrones podrían comprometer especialmente la estabilidad del crecimiento en los individuos más jóvenes, con implicaciones relevantes para la dinámica, productividad y capacidad de almacenamiento de carbono de estas masas forestales mediterráneas provocando casos de decaimiento forestal (Sánchez-Salguero et al., 2012).

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido analizar la respuesta del crecimiento radial de *Pinus pinaster* frente a la variabilidad climática en la Sierra de Cazorla, prestando especial atención a las diferencias existentes entre individuos jóvenes y viejos. A partir del uso de técnicas

dendrocronológicas y del análisis del incremento de área basal (IAB), se ha evaluado tanto la sensibilidad climática del crecimiento como su comportamiento frente a eventos de sequía extrema.

Los resultados obtenidos confirman que el crecimiento radial de *Pinus pinaster* está fuertemente influenciado por las condiciones climáticas, siendo la disponibilidad hídrica el principal factor limitante en el área de estudio. En este sentido, la precipitación y, especialmente, el balance hídrico integrado reflejado por el índice SPEI mostraron correlaciones positivas consistentes con el crecimiento, tanto a escala mensual como estacional. Por el contrario, las temperaturas elevadas, particularmente durante el periodo estival, ejercieron un efecto negativo sobre el crecimiento, incrementando el estrés hídrico y limitando la actividad cambial.

El análisis diferenciado por clases de edad puso de manifiesto una respuesta climática contrastada entre árboles jóvenes y viejos. Los individuos jóvenes presentaron una mayor variabilidad interanual del crecimiento y una mayor sensibilidad a las fluctuaciones climáticas, lo que indica una mayor vulnerabilidad frente a episodios de sequía y temperaturas extremas. En cambio, los árboles viejos mostraron una respuesta más amortiguada y estable, con cronologías más largas y una menor sensibilidad relativa, lo que sugiere una mayor capacidad de aclimatación a largo plazo, aunque con menores tasas de crecimiento.

El estudio de la respuesta a eventos de sequía severa, a través de los índices de resistencia, recuperación y resiliencia, evidenció estrategias de respuesta diferenciadas en función de la edad. Los árboles jóvenes tendieron a mostrar una mayor resistencia inicial al impacto de la sequía, pero una recuperación posterior más variable. Por su parte, los árboles viejos presentaron una menor resistencia durante los años de sequía, aunque valores de resiliencia más estables, alcanzando en muchos casos niveles de crecimiento similares a los previos a la perturbación. Estos resultados sugieren que la edad constituye un factor clave en la capacidad de los individuos para afrontar y superar episodios climáticos extremos.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten confirmar la hipótesis planteada en este Trabajo Fin de Máster, poniendo de manifiesto que la edad de los individuos desempeña un papel clave en la modulación de la sensibilidad climática y de la capacidad de resiliencia del crecimiento radial de *Pinus pinaster*. Las diferencias observadas entre árboles jóvenes y viejos evidencian estrategias de respuesta contrastadas frente a la variabilidad climática y, en particular, frente a los episodios de sequía.

Asimismo, los resultados sugieren que, en un contexto de cambio climático caracterizado por un aumento progresivo de las temperaturas y una mayor frecuencia e intensidad de las sequías, la estabilidad del crecimiento radial de *Pinus pinaster* podría verse comprometida,

especialmente en los individuos más jóvenes. Este escenario podría tener implicaciones relevantes para la dinámica futura de estas masas forestales, afectando tanto a su productividad como a su papel en el almacenamiento de carbono en esta especie.

Los resultados sugieren que las masas forestales con una mayor proporción de individuos jóvenes pueden presentar una mayor vulnerabilidad frente a sequías severas, mientras que la presencia de individuos maduros contribuye a estabilizar la respuesta del crecimiento a la variabilidad climática

Desde una perspectiva aplicada, los resultados de este estudio ponen de relieve la importancia de considerar la estructura de edades como un factor fundamental en la gestión de los pinares mediterráneos. La implementación de estrategias de gestión forestal adaptativa orientadas a reducir la competencia por los recursos hídricos y a favorecer la resiliencia de los individuos frente a la sequía se perfila como una herramienta clave para mitigar los efectos negativos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de estas formaciones forestales, debiendo tener en cuenta toda la dinámica forestal.

Finalmente, desde una perspectiva personal, la realización de este Trabajo Fin de Máster ha permitido conocer más profundamente el uso de metodologías dendrocronológicas y el análisis integrado de datos climáticos y de crecimiento, así como adquirir una visión más completa sobre la respuesta de los sistemas forestales mediterráneos frente al escenario de cambio climático en curso.

6. BIBLIOGRAFÍA

Ballesteros, E. (2008). Climatología de Andalucía. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.

Beguiría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., et Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited. *International Journal of Climatology*, 34, 3001–3023.

Biondi, F., et Qeadan, F. (2008). A theory-driven approach to tree-ring standardization. *Tree-Ring Research*, 64, 81–96.

Biondi, F., et Hartsough, P. C. (2010). *Using automated point dendrometers to analyze tropical tree growth at hourly time scales*. *Trees*, 24(4), 641–655.

Biondi, F. (2014). Dendrochronology, statistics and dynamics. In M. Mencuccini, J. Grace, J. Moncrieff et K. McNaughton (Eds.), *Size- and age-related changes in tree structure and function* (pp. 35–56). Dordrecht: Springer.

- Blanca, G., Cabezudo, B., Hernández-Bermejo, J. E., Herrera, C. M., Molero, J., et Muñoz, J. (2001). *Libro rojo de la flora silvestre amenazada de Andalucía*. Junta de Andalucía.
- Blanco, E., Casado, M. A., Costa, M., Escribano, R., García Antón, M., Génova, M., Gómez Manzaneque, F., Moreno, J. C., Morla, C., Regato, P., et Sainz Ollero, H. (2005). Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica. Barcelona: Planeta.
- Bogino, S. M., et Bravo, F. (2008). Growth response of *Pinus pinaster* to climate. *Annals of Forest Science*, 65, 506.
- Camarero, J. J., Olano, J. M., et Parras, A. (2010). Plastic bimodal xylogenesis in Mediterranean conifers. *New Phytologist*, 185, 471–480.
- Camarero, J. J., Manzanedo, R. D., Sánchez-Salguero, R., et Navarro-Cerrillo, R. M. (2013). *Growth response to climate predicts tree vulnerability to drought in a Mediterranean forest*. *Global Change Biology*, 19(12), 3791–3804.
- Camarero, J. J., Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Oliva, J., et Vicente-Serrano, S. M. (2018). *To die or not to die: Early warnings of tree dieback in response to a severe drought*. *Journal of Ecology*, 106(4), 1633–1649.
- Carrer, M., et Urbinati, C. (2004). Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. *Ecology*, 85(3), 730–740.
- Ceballos, L., et Ruiz de la Torre, J. (1979). *Árboles y arbustos de la España peninsular*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes.
- Climate Research Unit, University of East Anglia. (2023). *CRU TS gridded climate dataset (1700–2023)*.
- Colangelo, M., Camarero, J. J., Borghetti, M., Gazol, A., Gentilesca, T., Ripullone, F., et Sánchez-Salguero, R. (2021). *Drought legacies and resilience of Mediterranean forests*. *Forest Ecology and Management*, 496, 119440.
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., et Stahle, D. W. (2009). Análisis dendroclimático y reconstrucción climática. *Ciencia Forestal en México*, 34, 89–108.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Nueva York: Naciones Unidas.

Creber, G. T., Chaloner, W. G., et Scott, A. C. (1984). The environment of tree growth. In M. H. Dickson et E. M. Walker (Eds.), *Tree rings, climate and ecology* (pp. 3–14). Oxford: Blackwell Scientific Publications.

Cook, E. R., et Kairiukstis, L. A. (Eds.). (1990). *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Di Filippo, A., Biondi, F., Maugeri, M., Schirone, B. and Piovesan, G. (2012), Bioclimate and growth history affect beech lifespan in the Italian Alps and Apennines. *Glob Change Biol*, 18: 960-972.

Europarc España (2020). *Anuario del estado de los espacios naturales protegidos en España*. Fundación Fernando González Bernáldez.

FAO (2018). *National Forest Monitoring Systems*. FAO.

Fernández, J., Garrido, J., et Ruiz, F. (2005). Respuesta del crecimiento radial de coníferas mediterráneas a la variabilidad climática. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 14(3), 389–402.

Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press.

García Latorre, J., García Latorre, J., et Sánchez Picón, A. (1996). De la aridez al secano: agricultura y medio ambiente en el sureste de España. Granada: Universidad de Granada.

Gazol, A., Camarero, J. J., Vicente-Serrano, S. M., Sánchez-Salguero, R., et Gutiérrez, E. (2018). Growth resilience to drought. *Global Ecology and Biogeography*, 27, 141–151.

Génova, M., et Camarero, L. (2008). Influencia del clima en el crecimiento radial de *Pinus pinaster* Aiton en el centro de la Península Ibérica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 17(1), 36–48.

Gil, L., Díaz-Fernández, P., et Jiménez, M. P. (1990). *Pinus pinaster* Aiton en la Península Ibérica. Madrid: ICONA.

Gómez, J. A. (2011). *Cambio climático y ecosistemas forestales mediterráneos*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Gómez-Mercado, F., et Valle-Tendero, F. (2008). Biodiversidad y conservación en Cazorla. *Acta Botanica Malacitana*, 33, 7–28.

Gutiérrez, E. (2009). *Dendroecología*. Mundi-Prensa.

Hevia, A. 2013. Influencia de la poda en el desarrollo de masas de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus pinaster* Aiton en Asturias. PhD Thesis, Santiago de Compostela: USC

Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78.

Hubbard, R. M., Bond, B. J., et Ryan, M. G. (1999). Hydraulic limits to photosynthesis. *Tree Physiology*, 19, 165–172.

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. IPCC.

IPCC (2021). *Sixth Assessment Report. Working Group I*. Cambridge University Press.

Junta de Andalucía (2011). *PORN y PRUG del Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas*.

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbat, A., García-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., et Kolström, M. (2010). *Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems*. Forest Ecology and Management, 259(4), 698–709.

Lloret, F., Keeling, E. G., et Sala, A. (2011). Components of tree resilience. *Oikos*, 120, 1909–1920.

Lloret, F. (2022). *Ecología forestal*. Síntesis.

Nabais, C., Campelo, F., Vieira, J., et Cherubini, P. (2014). Climatic signals in *Pinus pinaster*. *Trees*, 28, 201–213.

Navarro-Cerrillo, R. M., Sánchez-Salguero, R., Manzanedo, R. D., et Camarero, J. J. (2014). *Site and age-related effects on the growth responses of Pinus halepensis to climate variability*. Forest Ecology and Management, 324, 62–72.

McDowell, N. G., Allen, C. D., Marshall, L., et al. (2010). *Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought?* New Phytologist, 178(4), 719–739.

McDowell, N. G., Allen, C. D., Marshall, L., et Kolb, T. (2010). Growth, carbon isotope

discrimination, and drought-associated mortality across a *Pinus ponderosa* elevational transect. *Global Change Biology*, 16(1), 399–415.

Peñuelas, J., Oyaga, R., Boada, M., et Jump, A. S. (2008). Global change in Mediterranean forests. *Forest Ecology and Management*, 254, 491–500.

Petritan, A. M., Bouriaud, O., Frank, D. C., et Petritan, I. C. (2014). Old-growth forest disturbance history. *Forest Ecology and Management*, 325, 117–125.

Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). (año). Datos de caracterización del territorio de Andalucía [Base de datos].

Rivas-Martínez, S., Penas, A., et Díaz-González, T. (2004). *Biogeographic map of Europe*. Universidad de León.

Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T., et Carrer, M. (2008). Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. *New Phytologist*, 177(1), 199–208.

Ruiz de la Torre, J. (2006). *Flora mayor*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.

Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M., et Montero, G. (2011). Carbon sink capacity of Spanish forests. *Forest Systems*, 20, 176–188.

Ryan, M. G., et Yoder, B. J. (1997). Hydraulic limits to tree height. *BioScience*, 47, 235–242.

Sánchez-Salguero, R., Camarero, J. J., Dobbertin, M., et al. (2012). Vulnerability of Mediterranean pines to drought. *Global Change Biology*, 18, 2703–2714.

Sánchez-Salguero, R., Navarro-Cerrillo, R. M., Camarero, J. J., et Fernández-Cancio, Á. (2013). *Selective drought-induced decline of pine species in southeastern Spain*. *Forest Ecology and Management*, 308, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.036>

Sánchez-Salguero, R., Camarero, J. J., Carrer, M., Gutiérrez, E., Alla, A. Q., Andreu-Hayles, L., Linares, J. C. (2018). *Climate extremes and predicted warming threaten Mediterranean Holocene firs forests refugia*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(47), E10142–E10150.

Schweingruber, F. H. (1996). *Tree rings and environment: Dendroecology*. Paul Haupt.

Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. Tucson: University of Arizona Press.

Stokes, M. A., et Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. Chicago: University of Chicago Press.

Tapias, R., Gil, L., Fuentes-Utrilla, P., et Pardos, J. A. (2004). Canopy seed banks in Mediterranean pines of south-eastern Spain: A comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Aiton and *P. nigra* Arn. *Journal of Ecology*, 92(5), 824–835.

Tíscar, P. A., et Linares, J. C. (2011). *Structure and regeneration patterns of Pinus nigra subsp. salzmannii forests in the Cazorla Mountains (Spain)*. *Forest Systems*, 20(2), 305–317.

Unión Europea (2021). *Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo*.

Van der Maaten-Theunissen, M., Bouriaud, O., et van der Maaten, E. (2021). pointRes: An R package. *Dendrochronologia*, 67, 125–138.

Valle, F., Mota, J. F., Gómez Mercado, F., et Cabello, J. (2003). *Biogeografía y vegetación*. Granada: Universidad de Granada.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., et López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index. *Journal of Climate*, 23, 1696–1718.

Vieira, J., Campelo, F., et Nabais, C. (2017). Age-dependent growth responses. *Trees*, 31, 537–550.

7. ANEXOS

ANEXO I: Ejemplo de medición de anillos (en formato .rwl)

Árbol joven 01, radio A y radio B

J01A 1963 795 580 2149 2847 2617 2383 2663

J01A 1970 2690 3187 2060 2293 1689 2912 2869 3202 2706 2653

J01A 1980 3614 3302 3249 4217 4497 4521 4906 3563 4419 4313

J01A 1990 3907 2779 3563 3368 2690 2027 2692 3713 3249 1753

J01A 2000 2417 3551 3108 2776 2693 490 1615 3180 4343 3201

J01A 2010 3029 2779 1731 1634 1765 1561 1563 986 1843 2202

J01A 2020 2110 2116 1707 1169 -9999

J01B 1977 6084 4497 4918

J01B 1980 5911 4420 4237 4215 4291 5468 4207 3993 5311 4333

J01B 1990 4168 2260 3140 3260 2648 1783 2863 3288 2898 1649

J01B 2000 2153 2981 3147 2467 2554 433 1286 2860 3833 3122

J01B 2010 2326 2637 1710 1406 1716 1688 1804 1168 1618 2052

J01B 2020 2216 2280 1716 1209 -9999

Árbol viejo 17, radio B

V17B 1724 3286 4164 5451 5069 3673 2587

V17B 1730 4411 3595 3591 3293 2944 2717 2755 3217 2940 3042

V17B 1740 2988 2516 1959 2375 2016 2289 2251 2700 628 860

V17B 1750 1330 1421 1653 1347 1517 1713 1534 1396 1323 1470

V17B 1760 1294 1994 1928 2074 1787 1533 959 1000 1109 958

V17B 1770 1243 1607 1090 1347 1033 1760 1695 1973 1573 1274

V17B 1780 1010 1370 1006 1323 1507 974 1300 1057 1208 1031

V17B 1790 1308 1411 1489 944 947 1172 984 927 816 772

V17B 1800 683 590 630 621 657 679 424 453 508 665

V17B 1810 345 358 497 476 509 407 488 560 521 605

V17B 1820 685 638 529 543 459 685 735 592 676 680

V17B 1830 597 700 570 780 692 698 593 682 731 617

V17B 1840 675 694 497 805 644 595 736 549 578 515

V17B 1850 623 529 555 567 626 510 560 642 670 680

V17B 1860 400 529 458 491 606 693 612 709 704 750

V17B 1870 813 765 640 670 1048 994 1045 1041 857 352

V17B 1880 591 574 834 980 1088 891 723 583 726 905

V17B 1890 627 537 879 632 685 1050 958 667 507 656

V17B 1900 850 556 571 499 506 683 703 713 950 821

V17B	1910	838	793	649	625	717	713	707	570	553	573
V17B	1920	407	323	522	486	352	642	628	413	545	741
V17B	1930	429	394	593	773	509	521	551	467	411	710
V17B	1940	847	719	614	811	1074	573	489	249	411	382
V17B	1950	212	191	289	247	139	181	187	332	388	261
V17B	1960	354	388	445	526	584	448	584	688	432	445
V17B	1970	551	563	590	623	447	623	977	892	928	593
V17B	1980	783	751	622	562	644	838	696	957	802	758
V17B	1990	714	351	585	729	788	984	796	905	598	675
V17B	2000	884	842	1041	905	616	222	509	806	1283	1040
V17B	2010	1037	1125	916	1034	911	717	896	966	1099	1294
V17B	2020	1175	952	1087	1159	-9999					

ANEXO II: Resultados COFECHA final

Árboles jóvenes

□ Dendrochronology Program Library
10:24 Wed 11 Jun 2025 Page 1

Run PPCAZ Program COF

□
□ PROGRAM COFECHA
6.06P 33036

Version

QUALITY CONTROL AND DATING CHECK OF TREE-RING MEASUREMENTS

File of DATED series: PPCAZ77J.RWL

CONTENTS:

- Part 1: Title page, options selected, summary, absent rings by series
- Part 2: Histogram of time spans
- Part 3: Master series with sample depth and absent rings by year
- Part 4: Bar plot of Master Dating Series
- Part 5: Correlation by segment of each series with Master
- Part 6: Potential problems: low correlation, divergent year-to-year changes, absent rings, outliers
- Part 7: Descriptive statistics

RUN CONTROL OPTIONS SELECTED

VALUE

- | | |
|--|--|
| 1 Cubic smoothing spline 50% wavelength cutoff for filtering | |
| 32 years | |
| 2 Segments examined are | 50 years lagged successively by 25 years |
| 3 Autoregressive model applied | A Residuals are used in master dating series and testing |
| 4 Series transformed to logarithms | Y Each series log-transformed for master dating series and testing |
| 5 CORRELATION is Pearson (parametric, quantitative) | |
| Critical correlation, 99% confidence level | .3281 |
| 6 Master dating series saved | N |
| 7 Ring measurements listed | N |
| 8 Parts printed | 1234567 |
| 9 Absent rings are omitted from master series and segment correlations | (Y) |

Time span of Master dating series is 1943 to 2023 81 years

Continuous time span is 1943 to 2023 81 years

Portion with two or more series is 1947 to 2023 77 years

```

*****
*C* Number of dated series      49 *C*
*O* Master series 1943 2023  81 yrs *O*
*F* Total rings in all series  2615 *F*
*E* Total dated rings checked  2611 *E*
*C* Series intercorrelation    .752 *C*
*H* Average mean sensitivity   .241 *H*
*A* Segments, possible problems  0 *A*
*** Mean length of series      53.4 ***
*****

```

Árboles viejos

[] Dendrochronology Program Library
Wed 11 Jun 2025 Page 1

Run PPCAZ Program COF 11:25

[]

[] P R O G R A M C O F E C H A
33036

Version 6.06P

QUALITY CONTROL AND DATING CHECK OF TREE-RING MEASUREMENTS

File of DATED series: PPCAZ78V.RWL

CONTENTS:

- Part 1: Title page, options selected, summary, absent rings by series
- Part 2: Histogram of time spans
- Part 3: Master series with sample depth and absent rings by year
- Part 4: Bar plot of Master Dating Series
- Part 5: Correlation by segment of each series with Master
- Part 6: Potential problems: low correlation, divergent year-to-year changes, absent rings, outliers
- Part 7: Descriptive statistics

RUN CONTROL OPTIONS SELECTED

VALUE

- 1 Cubic smoothing spline 50% wavelength cutoff for filtering
32 years

2 Segments examined are 50 years lagged successively by 25 years
 3 Autoregressive model applied A Residuals are used in master dating series and testing
 4 Series transformed to logarithms Y Each series log-transformed for master dating series and testing
 5 CORRELATION is Pearson (parametric, quantitative)
 Critical correlation, 99% confidence level .3281
 6 Master dating series saved N
 7 Ring measurements listed N
 8 Parts printed 1234567
 9 Absent rings are omitted from master series and segment correlations (Y)

Time span of Master dating series is 1724 to 2023 300 years
 Continuous time span is 1724 to 2023 300 years
 Portion with two or more series is 1805 to 2023 219 years

```
*****
*C* Number of dated series    33 *C*
*O* Master series 1724 2023 300 yrs *O*
*F* Total rings in all series 4256 *F*
*E* Total dated rings checked 4175 *E*
*C* Series intercorrelation   .602 *C*
*H* Average mean sensitivity   .237 *H*
*A* Segments, possible problems 15 *A*
*** Mean length of series    129.0 ***
*****
```

ANEXO III: Tablas resumen datos de los pies analizados

J/V	Número	Long	Lat	DBH (cm)	H (m)	Edad	Date begin	Date end
J01	322	2,94134	37,90558	54	17,5	61	1963	2023
J02	325	2,9418	37,90562	30,1	11,3	40	1984	2023
J03	326	2,94198	37,90482	30,3	10,7	63	1961	2023
J04	328	2,94177	37,90498	35,8	12,3	38	1986	2023
J05	329	2,94176	37,90513	42,8	13,1	77	1947	2023
J06	332	2,94229	37,9045	25	11,7	69	1955	2023
J08	338	2,94175	37,90566	29	11,7	50	1974	2023
J09	339	2,9417	37,90552	36,8	17,4	69	1955	2023
J10	340	2,94179	37,9058	38,7	11,8	50	1974	2023
J11	342	2,94101	37,90607	38,5	11,7	47	1977	2023
J12	344	2,94172	37,90642	40,4	15,8	74	1950	2023
J13	346	2,9419	37,90636	26,5	7,9	41	1982	2022
J14	348	2,94213	37,9066	32,8	8,9	75	1949	2023
J16	352	2,94321	37,9072	41,8	17,6	66	1958	2023
J18	358	2,94463	37,90721	37,8	11,9	32	1992	2023
J19	359	2,94467	37,90696	43	14,2	67	1957	2023
J20	360	2,94467	37,90687	28,2	11,3	37	1987	2023
JV02	323	2,94126	37,90554	84,1	19,8	74	1950	2023
JV06	331	2,94198	37,90462	58,9	14,4	81	1943	2023
JV08	335	2,94148	37,90575	66,4	20,4	75	1949	2023
JV16	351	2,94326	37,907	72,8	19,3	66	1958	2023

J/V	Número	Long	Lat	DBH (cm)	H (m)	Edad	Date begin	Date end
V01	321	2,94121	37,90549	73,8	12,3	94	1930	2023
V03	324	2,9418	37,90491	62,2	15,2	89	1935	2023
V04	327	2,9417	37,90511	58,1	15,7	89	1935	2023
V05	330	2,9416	37,90524	59,1	16,9	93	1931	2023
V07	333	2,94235	37,90431	58,4	16	148	1876	2023
V09	336	2,94153	37,90575	68,9	19,9	85	1939	2023
V10	337	2,94169	37,90572	83,5	19,5	101	1923	2023
V11	341	2,94137	37,90593	81	18,9	83	1941	2023
V12	343	2,94153	37,90606	70,9	17,8	151	1873	2023
V13	345	2,94173	37,90623	77	25,6	189	1835	2023
V14	347	2,94231	37,90661	69,2	17,9	154	1870	2023
V15	349	2,94256	37,90707	70,5	20,8	219	1805	2023
V17	353	2,94377	37,90682	75	18,7	300	1698	1997
V18	355	2,94389	37,90663	62,1	19,7	187	1837	2023
V19	356	2,94458	37,90717	64,4	15,4	137	1887	2023
V20	357	2,94461	37,90722	53,4	13,5	127	1897	2023
V21	578	2,94462	37,90714	65	17,1	148	1876	2023
VJ07	334	2,94236	37,9045	26,6	9,4	93	1931	2023
VJ17	354	2,94403	37,90664	32,8	11,1	170	1854	2023
VJ15	350	2,94244	37,90722	33,8	11,7	209	1815	2023