Nº 69, enero-junio de 2018, pp. 137-157.
ISSN: 0213-4691. eISSN: 1989-9890.
DOI: 10.14198/INGEO2018.69.09

Investigaciones Geográficas
Instituto Interuniversitario de Geografía
Universidad de Alicante

Cita bibliográfica: Lallana Llorente, V. (2018). Reconstrucción dendroclimática de la serie de precipitaciones en el Valle de Polaciones (Cantabria). *Investigaciones Geográficas,* (69), 137-157. https://doi.org/10.14198/INGEO2018.69.09

Reconstrucción dendroclimática de la serie de precipitaciones en el Valle de Polaciones (Cantabria)

Dendroclimatic reconstruction of the precipitation series in the Polaciones valley (Cantabria)

Víctor Lallana Llorente[1]

Resumen

Se realiza una reconstrucción dendroclimática a partir de los datos de nueve cronologías del taxón *Fagus sylvatica* repartidas en Polaciones, un valle de la montaña central cantábrica. El trabajo se basa en una relación estadística fiable y replicable entre los datos climáticos de referencia de la *Climatic Research Unit* y las cronologías de anillos de crecimiento. Los resultados obtenidos en la relación crecimiento-clima para la precipitación resultan estadísticamente significativos para los meses entre abril a agosto, lo que permite reconstruir las variaciones interanuales de ésta entre 1798 y 2011, cubriendo así un periodo en el que no se dispone de registros instrumentales. Por otro lado, se elabora una serie de referencia para el área de análisis y se calculan los años favorables y desfavorables en el crecimiento de la especie. La búsqueda de coincidencias que ayuden a comprender el comportamiento de *Fagus sylvatica* en respuesta al clima en su ámbito meridional de distribución en Europa, lleva a estimar los años secos y húmedos obtenidos de la reconstrucción, que son puestos en relación con los crecimientos.

Palabras clave: *Fagus sylvatica;* dendroclimatología; reconstrucción climática; reconstrucción precipitación; Polaciones.

Abstract

A dendroclimatic reconstruction is carried out using the data from nine chronologies of the *Fagus sylvatica* taxon spread out in Polaciones, a valley of the central Cantabrian Mountains. The paper is based on a reliable and replicable statistical relationship between the climatic reference data of the Climatic Research Unit and the growth ring chronologies. The results obtained in the growth-climate relationship for the precipitation are statistically significant for the months of April to August, which helps reconstruct the interannual variations of this between 1798 and 2011, thus covering a period in which instrumental records are not available. Moreover, a reference series for the analysis area is drawn up and the favourable and unfavourable years in the growth of the species are calculated. The search for coincidences that help understand the behaviour of *Fagus sylvatica* in response to the climate in its southern area of distribution in Europe calls for the estimation of the dry and wet years obtained from the reconstruction, which are related to the growth.

Key words: *Fagus sylvatica;* dendrochronology; dendroclimatology climatic reconstruction; Climatic Research Unit.

1. Introducción

El análisis de los parámetros y registros climáticos del pasado se ha venido desarrollando a lo largo del tiempo a partir de múltiples registros de proxy con la intención de entender y analizar las condiciones paleoclimáticas y su evolución en las zonas analizadas (Luckman, 1990).

1 Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio. Universidad de Cantabria. Grupo de investigación Geografía Histórica del Paisaje, España. lallanav@unican.es

Recepción: 20/07/2017. **Aceptación:** 27/04/2018. **Publicación:** 13/06/2018.

Este trabajo se publica bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

En este sentido, la utilización de los anillos de crecimiento de los árboles proporciona excelentes oportunidades para estos estudios paleoambientales, basando su análisis en las variaciones del clima en el pasado en relación con la anchura que muestran los anillos de crecimiento.

De hecho, el empleo de series de anillos de crecimiento para análisis climáticos y reconstrucciones dendroclimatológicas, se fundamenta en que los árboles tienen una respuesta similar ante determinados fenómenos y variables climáticas que influyen en su crecimiento anual (Hughes, Swetnam y Diaz, 2011; Fritts, 2012). No obstante, la influencia climática no es la única que condiciona el desarrollo anual y crecimiento del árbol, sino que otras variables como la tendencia relacionada con el envejecimiento de los árboles, diversas alteraciones o perturbaciones que afectan a cada árbol (por ejemplo, un cambio en la competencia), o alteraciones a nivel poblacional (tales como incendios o plagas) (Schweingruber, 1990, 2012; Cook y Kairiukstis, 1990, 2013; Esper, Cook, Schweingruber, 2002; Kharuk, Dvinskaya, Ranson, 2013), suponen efectos perturbadores no climáticos que se deben minimizar, si deseamos conseguir una señal climática válida. Es por ello, que el principio de replicación en la extracción de las muestras, así como la elección de lugares son de vital importancia en este tipo de estudios.

A partir de aquí y mediante la comparación de las características de anillos de árboles con los parámetros climáticos disponibles de la época instrumental, se pueden establecer modelos para fines de reconstrucción de la variabilidad climática en el pasado, así como cambios climáticos inducidos por el hombre (Bradley, 1990).

En la Península Ibérica, los registros climáticos instrumentales de las últimas décadas muestran en líneas generales un ligero aumento de temperatura a partir de los años 1980 (Raso, 1997; López-Moreno *et al.*, 2014; Pena-Angulo, Cortesi, Brunetti and Gónzalez Hidalgo, 2015) con una aparente disminución de las precipitaciones a partir de la década de 1990 (Rodrigo, Esteban-Parra, Pozo-Vázquez, Castro-Diez, 1999; De Luis, Raventós, González-Hidalgo, Sánchez y Cortina, 2000; De Luis, Brunetti, Gonzalez-Hidalgo, Longares y Martin-Vide 2010). En cuanto a los análisis de la relación entre los anillos de crecimiento y el clima para la especie objeto de estudio *Fagus sylvatica*, son muchos los trabajos llevados a cabo en toda Europa por diferentes autores, en los que se analizan las variables más determinantes para el crecimiento de la especie (la distribución del haya en Europa, en particular en el centro y sur, ha sido estudiada por Piutti y Cescatti, 1997; Dittmar, Zech y Elling, 2003; Michelot, Bréda, Damesin y Dufrêne, 2012a; Michelot, Simard, Rathgeber, Dufrêne y Damesin, 2012b; Tegel, *et al.*, 2014. En España: Gutiérrez, 1988; Tardif, Camarero, Ribas y Gutiérrez, 2003; Camarero y Gutiérrez, 2004; Jump, Hunt y Peñuelas, 2006, 2007; Rozas 2001, 2006; Rozas, Camarero, Sangüesa-Barreda, Souto y García-González, 2015. En Italia: Biondi, 1993; Biondi y Visani, 1996; Piovesan, G., Bernabei, Di Filippo, Romagnoli y Schirone, 2003; Piovesan, Biondi, Bernabei, Di Filippo y Schirone, 2005a; Piovesan, Di Filippo, Alessandrini, Biondi y Schirone, 2005b; Di Filippo, *et al.*, 2007; Di Filippo, Biondi, Maugeri, Schirone y Piovesan, 2012. En Alemania: Scharnweber, *et al.*, 2011; Scharnweber, Manthey, Wilmking, 2013), centrándose la atención principalmente en la respuesta fisiológica del árbol, sin atender tanto a la evolución paleoclimática de las variables reflejadas.

En este estudio, las cronologías de anillos de crecimiento, elaboradas a partir de individuos vivos de haya (*Fagus sylvatica*) de la Montaña Cantábrica Central, han sido empeladas para reconstruir la serie de precipitaciones de primavera-verano (abril-agosto) del periodo 1798-2011. Esta reconstrucción proporciona nuevos conocimientos únicos sobre la evolución de las precipitaciones en este sector de alta montaña atlántica.

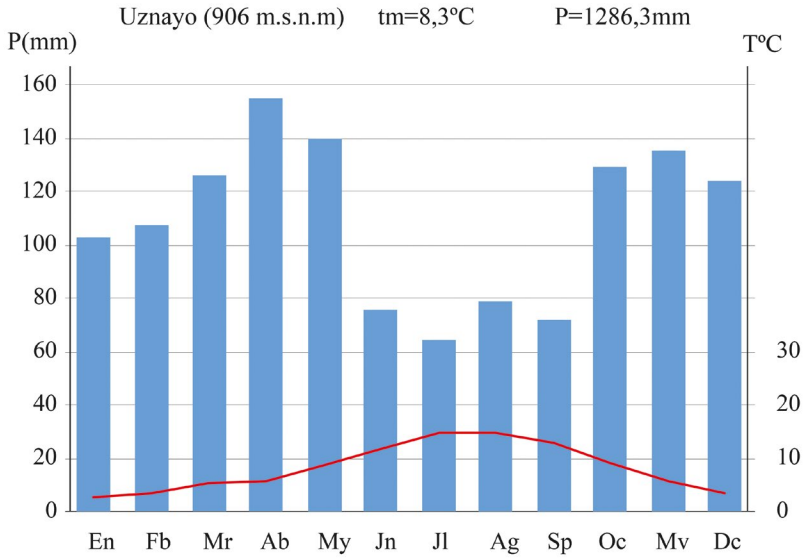
Derivado de este análisis, se plantean como objetivos específicos: a) la construcción de una cronología de referencia de anillos de crecimiento lo más extensa posible en el tiempo para el valle objeto de estudio; b) la determinación de años y periodos característicos en el crecimiento de los anillos de *Fagus sylvatica*; c) la identificación de períodos/años secos y húmedos en la reconstrucción de la serie de precipitaciones planteada y coincidencia con los crecimientos de *Fagus sylvatica*.

El ámbito donde se ha desarrollado este análisis se enmarca en el Valle de Polaciones, una cuenca intramontana localizada en el curso alto del río Nansa en el extremo suroriental de Cantabria. Forma parte de una banda montañosa de transición entre el núcleo central de altas montañas occidentales y el sector oriental de la cordillera. Es un espacio deprimido a una altitud considerable (778 m, de altitud mínima) y rodeado de montañas escarpadas, salvo en su margen izquierda (límite con La Liébana). Las Sierras de Peña Labra y del Cordel, con disposición netamente Este-Oeste, constituyen el límite meridional de la cuenca y suponen la divisoria entre las aguas vertientes a Nansa, Duero y Ebro. Al Norte queda limitada por la elevada Sierra de Peña Sagra (2.046 m) y su prolongación hacia el sureste a través del Cueto de los Escajos (1.517 m) y el Cueto de la Concilla (1.819 m).

Desde el punto de vista de nuestro estudio, supone un espacio de transición entre dos regiones bioclimáticas contrastadas, una de clima atlántico u oceánico de la vertiente cantábrica, frente al mediterráneo continental de la cuenca castellano-leonesa. Este hecho dota, aún más si cabe, de importancia la elección del área, al suponer un ámbito de distribución meridional de *Fagus sylvatica* en Europa, donde los efectos climáticos se muestran de un modo más intenso (Dittmar *et al.*, 2003).

Sus características biogeográficas y de ocupación de suelo responden a las de una montaña media con una gradación en función de la altitud y condicionada al uso secular del espacio. Los fondos de valle y vertientes medias y bajas de topografías más suaves, son ocupados por formaciones herbáceas dedicadas a prados de siega principalmente. Las formaciones boscosas ocupan las amplias laderas situadas entre los 700 m.s.n.m y los 1.600 m.s.n.m., y por encima de ellas se desarrollan notables áreas de matorral mixto, así como pastos de puerto, que ocupan las vertientes altas y topografías favorables de cumbre. En última estancia, encontramos abundantes afloramientos de roca con escasa vegetación que se localizan dispersos en los puntos altitudinalmente más elevados.

Figura 1. Características climáticas medias del Valle de Polaciones



tm: temperatura media anual; P: precipitación media anual.

Fuente: AEMET. Elaboración propia.

Desde el punto de vista climático, este valle presenta una serie de rasgos particulares. Tanto su elevada altitud media como la disposición del relieve tanto al norte como al sur, ayudan a establecer valores de cierta continentalidad. Este rasgo destaca en los valores térmicos invernales, con mínimas muy marcadas. De igual modo, su distanciamiento relativo respecto al mar y su configuración como divisoria de aguas, contribuye a que se den ciertos rasgos mediterráneos, como puede ser una reducción de precipitación en época estival. Estas singularidades nos han llevado, pese a disponer de observatorios cercanos, a tomar como estación de referencia de cara únicamente a una breve caracterización climática, la estación termopluviométrica Uznayo (1159O) correspondiente a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2013), con un registro diario continuo de 1973 a 1996. Los datos disponibles registran un valor medio de temperatura de 8,2ºC con máximos en julio y agosto (en torno a 15ºC). Los inviernos son frescos con medias entre los 3-4ºC y mínimas entre -1ºC y -2ºC. Los registros pluviométricos recogen un valor medio de 1.286 mm anuales con una distribución regular, aunque con máximos primaverales y otoñales y valores de mínimo relativo en época estival. A su vez, apoyándonos en el Visor del Atlas climático de la Península y Baleares (AEMET, 2016), se ha podido caracterizar climáticamente la localización de las poblaciones de estudio (rango entre 1.250 y 1.500 m.s.n.m) presentando unos registros térmicos medios invernales entre los 2,5ºC y los 5ºC, con temperaturas bajo cero de 80-100 días anualmente, y donde precipita entre 125 y 150 días, sin tener en cuenta el importante aporte que suponen las precipitaciones encubiertas producidas por nieblas y días nublados. Es por ello que resulta complicado saber el volumen total de precipitación en estos puntos supera los 1.400 mm.

Todo lo comentado en las lineas anteriores, hacen de este valle un espacio optimo como observatorio de la variabilidad climática, incluyendo no solo requisitos climáticos y ecológicos, sino también locacionales como límite meridional biogeográfico de la especie dentro del continente europeo (Rubio, Blanco, Sanz, Sánchez y Elena, 2003; Gómez-Manzanedo, Roig y Reque, 2008).

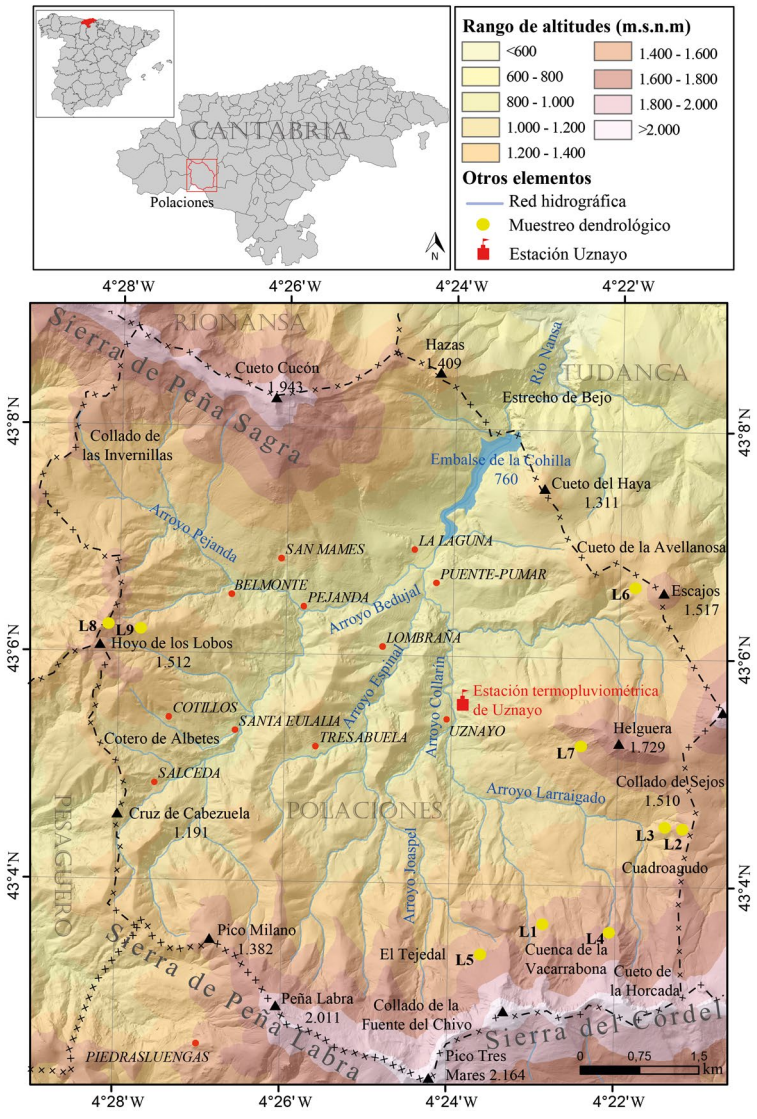
2. Metodología

El trabajo se estructuró en cuatro fases: 1) Selección de puntos de muestreo y extracción de testigos; 2) Tratamiento estadístico y elaboración de cronologías; 3) análisis de la relación crecimiento clima; 4) Reconstrucción climática mediante regresión; 5) Cálculo de periodos y años característicos.

2.1. Selección de puntos de muestreo y extracción de testigos

Se elaboran nueve cronologías de anchura de anillos de *Fagus sylvatica*, seleccionando cada localización de muestreo bajo un criterio que incorpora la mayor diversidad posible de condiciones ecológicas (Fritts, 2012; Hughes, *et al.*, 2011). De este modo se obtiene, con un número limitado de muestras, la máxima representatividad territorial (figura 2).

Figura 2. Zonas de muestreo dendrocronológico en el Valle de Polaciones



Fuente: Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Elaboración propia.

Dentro de cada una de las localizaciones seleccionadas, los árboles muestreados y empleados en el análisis fueron individuos sanos, tanto dominantes como codominantes de las especies analizadas y representativas del ecotopo de análisis, que por lo general se trató de los individuos de mayor porte del punto muestreado ya que aportan información temporal de mayor longitud y, por tanto, mayor registro de variaciones climáticas y/o ambientales (Herrera *et al.*, 2001).

De cada individuo de la muestra pertenecientes a la especie *Fagus sylvatica*, se obtuvieron de uno a dos testigos *(cores)*, extraídos a una altura de la base del tronco de 1,30m, empleando una barrena de incrementos tipo *Pressler* con 40 cm de longitud y un diámetro interior de 5 mm. En total se analizaron 164 *cores* de 94 árboles, que tras su preparación previa (se fijan a un soporte y se lijan hasta poder observar los anillos a simple vista), son estudiados siguiendo los procedimientos y protocolos dendrocronológicos establecidos (Stokes y Smiley, 1968).

2.2. Tratamiento estadístico y elaboración de cronologías

Mediante datación cruzada visual, se validó cada serie en relación al resto de testigos de su zona de muestreo aplicando la técnica de Yamaguchi (1991). Realizada esta datación previa, se pasó a la medición o datación absoluta de los anillos de cada uno de los *cores* extraídos. Este análisis se realizó con una mesa de medición semiautomática LINTAB6, con precisión de 0,001 mm y el software asociado Rinntech TSAP-WIN.

Los estadísticos de validación y *crossdate* de las muestras se realizaron aplicando el programa COFECHA (Holmes, 1983), calculando los valores de correlación entre muestras en tramos de 50 años, considerando como valores no válidos correlación inferiores a 0,32 al no estimarse este valor como significativo (Grissino-Mayer, 2001).

Realizada la datación absoluta de todos los árboles objeto de estudio y descartados estadísticamente aquellos que presentaban anomalías, se procedió con la estandarización y construcción de cronologías de índices de crecimiento. Para ello se aplicó el software estadístico R (R Development Core Team, 2011) en su módulo de funciones dplR (Bunn, 2008). La estandarización supone transformar las series anuales de crecimiento absoluto a índices adimensionales, homogeneizando estadísticos como media y varianza, y eliminando efectos no debidos al clima como son los cambios de crecimiento del árbol resultado del envejecimiento, con el fin de elaborar series estandarizadas en cada espacio de muestreo. Para ello se aplicó previamente un modelo exponencial negativo, para eliminar la tendencia del envejecimiento del árbol y, posteriormente un *spline* cúbico con una ventana de 53 años, óptima para reducir perturbaciones en bosques densos, pero conservando la variabilidad de alta frecuencia fruto de la señal climática (Cook y Kairiukstis, 1990).

La calidad y significación de los principales valores estadísticos obtenidos (tabla 1), se han evaluado mediante la *Expressed Population Signal* (EPS), un valor empleado como indicador de correspondencia entra la varianza de cada cronología con la población teórica, considerándose un umbral válido aquel que supera 0,85 (Wigley, Briffa y Jones, 1984; Gutiérrez, 2009; Speer, 2010).

Se ha considerado importante el cálculo de otros estadísticos como es el coeficiente de autocorrelación (A^1), que indica el peso que tiene el año anterior en el crecimiento del año próximo; el coeficiente de correlación medio (RBAR) del conjunto de series individuales para un intervalo común de tiempo (ventana de 50 años con un solapamiento de 25); y la sensibilidad media (MS), que muestra la variabilidad interanual en el grosor de los anillos (Fritts, 2012). Los valores de éste estadístico, suponen valores de alta significación si superan el valor 0,3; intermedios 0,2 a 0,29 y de baja significación los inferiores a 0,19 (Grissino-Mayer, 2001). A su vez se calcularon los valores de intercorrelacción mediante su expresión a través de una matriz de correlaciones, con el fin de observar si la proyección y tendencia en la regresión es similar en todas las cronologías.

2.3. Análisis de la relación crecimiento-clima

El análisis de la relación del crecimiento, realizado para determinar tanto las variables como los meses más característicos en el crecimiento de la especie, se lleva a cabo mediante la aplicación de la función de correlación sobre las cronologías de índices previamente calculadas en cada uno de los puntos de muestreo. Las variables climáticas mensuales explicativas con las que se calcularon estas funciones fueron

previamente estandarizadas (temperaturas y precipitaciones medias), con la intención de obtener series de índices estacionarios en los cuales sólo se conserva la señal de alta frecuencia (Scheweingruber, 1990; Fritts, 2012; Lebourgeois y Mérian, 2012).

Los datos climáticos de referencia empleados son los registros climáticos medios mensuales de la red *Climatic Research Unit* (CRU) (Harris, Jones, Osborn y Lister, 2014; CRU, 2017). Estos datos, suponen series de un amplio periodo (1901-2015) y con una buena resolución espacial de 0,5º en latitud y longitud. A su vez, han sido muy empleados en estudios e investigaciones tanto de carácter climático como dendrocronológico como las de McGuire, *et al.,* en 2010, o Shi, *et al.,* en 2015. La escasa longitud temporal de la estación de Uznayo (apenas 22 años) nos ha llevado a descartar su utilización en este trabajo pues podría derivar en serios problemas de fiabilidad de cara al análisis climático.

Las funciones calculadas abarcaron el periodo común 1950-2011 a ambas series, dendrocronologías y climáticas, considerado este como el de mayor fiabilidad de los datos CRU, siendo implementados en el software R. Para la determinación de la respuesta climática, se tuvieron en cuenta los valores de la función de correlación que resultasen significativos al presentar valores mayores o menores a +/- 0,24 al nivel de significación $p < 0,05$ (Fritts, Guiot, Gordon y Schweingruber, 1990). La ventana temporal de cálculo de las correlaciones se prolonga 16 meses, del mes de junio del año previo al crecimiento (n-1), hasta agosto del año actual (n) ambos incluidos. El periodo fue considerado atendiendo a estudios previos sobre la fenología de la especie, como sobre otros estudios consultados sobre las relaciones crecimiento-clima (Piovesan, *et al*., 2003; Piovesan, *et al*., 2005a; Lebourgeois, 2005; Martinez del Castillo, *et al.,* 2016).

2.4. Reconstrucción climática mediante regresión

La varianza común entre árboles es uno de los parámetros más empleados al evaluar la calidad de las cronologías para las reconstrucciones climáticas (Fritts *et al*., 1990). Una mayor varianza común entre árboles, indica una fuerte influencia macroambiental en el crecimiento radial. Esta varianza común entre cada una de las cronologías fue evaluada empleando el análisis de regresión múltiple de componentes principales (PCA), (Colley y Lohnes, 1971), sobre el periodo común de las cronologías y los registros climáticos instrumentales del periodo 1950-2011. Este procedimiento generó un modelo o ecuación de transferencia, aplicable a los datos de anillos de árboles para desarrollar la reconstrucción (Fritts, 2012).

La ecuación para reconstruir las variables significativas se estimó por regresión a partir de los valores del primer componente principal (PC1), obtenido de las cronologías residuales que correlacionan significativamente con las variables climáticas contrastadas mediante la función de correlación crecimiento-clima. En este caso fue la variable precipitación para los meses de primavera-verano (abril, mayo, junio, julio y agosto).

La estabilidad de la regresión múltiple se evaluó mediante validación cruzada, dividiendo el periodo común entre los registros de datos climáticos y de crecimiento en dos periodos, uno de calibración y otro de verificación. Los periodos fueron 1950-1980 y 1981-2011, sirviendo cada uno de ellos tanto como período de calibración como de validación.

Para cada ensayo de calibración-verificación, primero se obtuvo la función de transferencia sobre el periodo de calibración y luego se evaluó la bondad de ajuste sobre el período de verificación. La calidad de la medición se evaluó empelando las siguientes métricas: coeficientes de correlación (R), coeficiente de determinación (R^2), reducción de error (RE), coeficiente de eficiencia (CE), error medio cuadrático (MSE) y *The Sign Test* (Cook y Weisberg, 1994). R supone la medida de correlación lineal entre las cronologías y las variables climáticas. R^2 indica cómo se ajustan los datos del modelo estadístico. Valores R^2 de 1 indican que la línea de regresión tendría un ajuste perfecto con los datos, mientras que valore R^2 de 0, indicarían que estos no se ajustan. La CE se diferencia de la RE en que es una medida de la varianza común entre los datos reales y estimados durante el período de verificación mientras que el segundo es una medida de varianza únicamente del período de calibración (Briffa, Jones & Schweingruber, 1988). Ambos estadísticos se utilizan para comparar datos estimados que se asumen como valores iguales a la media del periodo de calibración (Briffa, *et al*., 1988). MSE estima la diferencia entre el modelo y los valores medidos, mientras que el Sign Test compara el número de tendencias de intervalo de coincidentes (*agreeing)* y no coincidentes *(disagreeing),* de año en año, entre la serie observada y la reconstruida (Fritts *et al*., 1990; Čufar, Prislan & Gričar, 2008).

2.5. Cálculo de periodos y años característicos

Para su cálculo se partió del conjunto de cronologías individuales de índices de crecimiento y se generó, realizando un promedio de todas ellas, una nueva cronología o serie maestra del área de estudio que incluyó al menos cinco testigos por año.

Sobre ella, se señalaron los denominados "años característicos" por ser valores extremos de los crecimientos anuales de anillos, empleando como criterio para su determinación y cálculo que al menos el 80% de las muestras presente el mismo comportamiento en ese año, así como un cambio de grosor entre años sucesivos que exceda el 20% de su media. A su vez, el empleo de una media móvil de 10 años, permitió establecer el conjunto de años que por sus valores de crecimiento han supuesto en líneas generales periodos favorables y desfavorables al crecimiento para el conjunto de la muestra.

Por otro lado, la estimación de periodos y años característicos (sequías y años con superávit hídrico), fueron calculados también sobre la reconstrucción de las precipitaciones. Se consideraron como años característicos, aquellos cuyos registros suponen valores superiores al percentil 90 (húmedos) o inferiores al percentil 10 (secos), mientras fueron considerados periodos extremos (húmedos o secos) aquellos que presentaban dos o más años consecutivos con valores inferiores al percentil 20 o mayores del 80 (Griggs, Pearson, Manning y Lorentzen, 2014).

3. Resultados

3.1. Características de las cronologías elaboradas

De los 94 árboles muestreados en las 9 localidades y 164 muestras obtenidas, se emplearon 157, superando un gran número de ellas con facilidad los 150 años. Los estadísticos procedentes de las cronologías se muestran en la tabla 1, destacando la señal de la población expresada (EPS), como indicadora de una buena fiabilidad de las cronologías como respuesta del conjunto teórico de la población de cara al análisis climático con valores superiores a 0,85.

Tabla 1. Características y principales estadísticos de las cronologías medias

Crono	N	Alt	Orient	Pend	Periodo	Rw(mm)	RBAR	EPS	A^1	MS
L1	17	1.450	N	20-25º	1772-2011	0,83	0,550	0,934	0,710	0,38
L2	20	1.380	W	20-30º	1720-2011	1,26	0,464	0,893	0,664	0,29
L3	21	1.280	W	30-35º	1578-2011	0,88	0,443	0,847	0,673	0,29
L4	15	1.250	N	15-20º	1793-2011	1,04	0,446	0,908	0,619	0,27
L5	19	1.460	N	20-30º	1783-2011	1,05	0,502	0,915	0,678	0,30
L6	18	1.350	S-SW	25-30º	1703-2011	0,87	0,550	0,929	0,793	0,31
L7	15	1.430	S-SW	20-30º	1682-2011	1,06	0,461	0,869	0,595	0,32
L8	17	1.500	E-NE	>30º	1754-2011	1,17	0,450	0,885	0,624	0,32
L9	15	1.300	E-NE	>35º	1722-2011	0,95	0,499	0,913	0,655	0,29

Abreviaturas: (N) número de muestras por cronología; (Alt) altitud; (Orient) orientación; (Pend) pendiente; (RW mm) anchura media de anillos en milímetros; (RBAR) coeficiente de correlación medio; (EPS) señal de la población Expresada; (A^1) Autocorrelación; (MS) sensibilidad media.

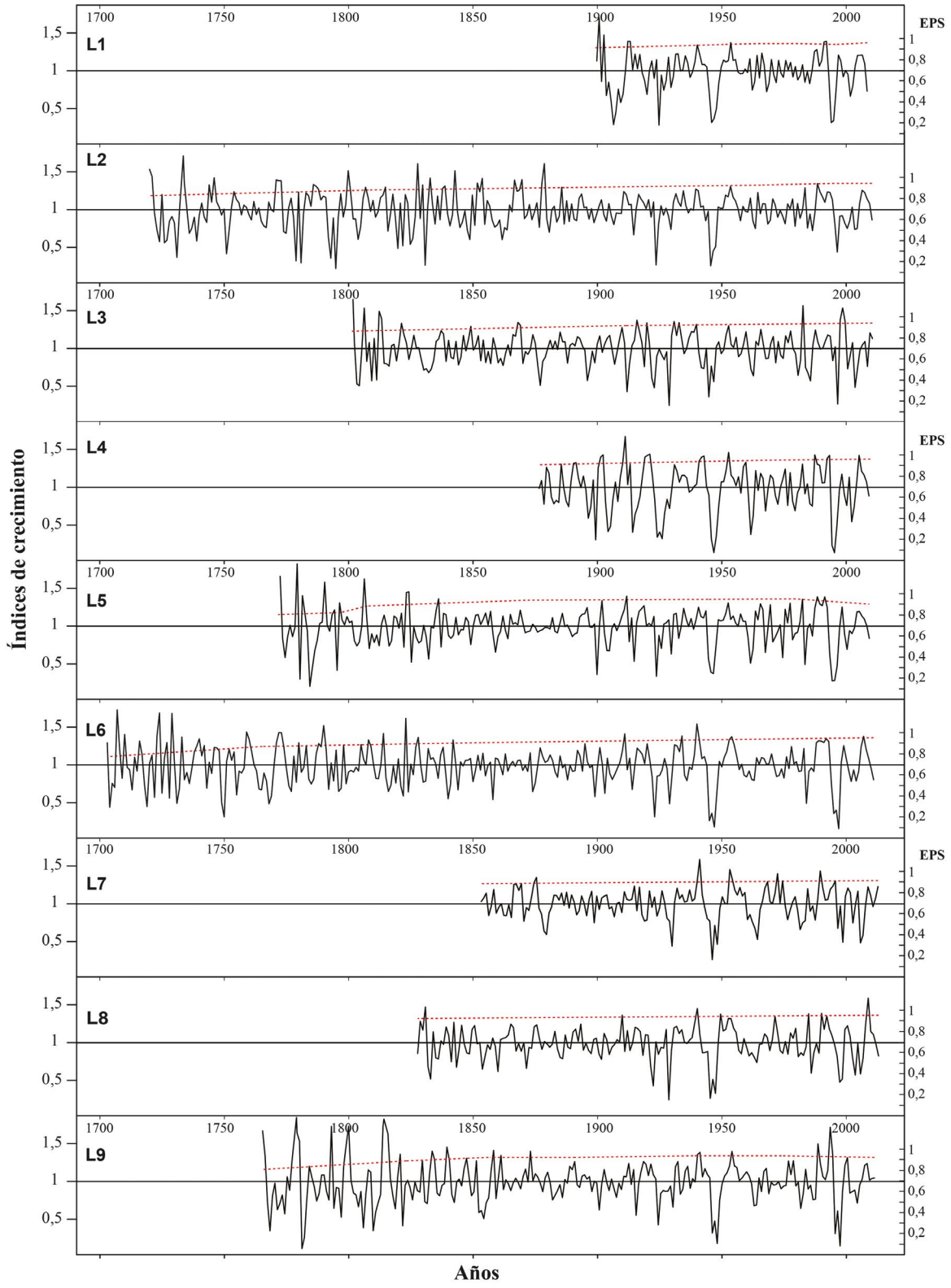
Elaboración propia.

La anchura media de los anillos parece mostrar una alta variabilidad entre las diferentes cronologías medias y es que tanto la diversidad de condiciones topográficas encontradas (altitud, pendiente y orientaciones) como la competencia interespecífica por la luz y el espacio que sucede en el interior de las masas boscosas de *Fagus sylvatica,* condiciona en gran medida el desarrollo del anillo anual. La figura 3, muestra las series de índices de crecimiento calculados en cada una de las localidades de análisis incluyendo al menos 5 testigos por año.

La sensibilidad media (MS), característica de la variabilidad interanual del grosor de los anillos (Fritts, 2012), es decir, de las fluctuaciones de un año con respecto al anterior (fluctuaciones en las altas frecuencias) muestra los valores más elevados en aquellas cronologías ubicadas a mayor altitud (L1, L5, L7, L8), lo que responde al hecho de una mayor exposición y rigurosidad en las condiciones de supervivencia

(Takahashi, Tokumitsu y Yasue, 2005; Takahashi, Okuhara, Tokumitsu y Yasue, 2011) y una respuesta o cambios más claros a las mismas.

Figura 3. Cronología de índices de crecimiento de lffas 9 localidades muestreadas



Elaboración propia.

En la tabla 2, fueron calculados los valores de intercorrelacción entre las diversas cronologías calculadas, mediante su expresión en una matriz de correlaciones. Como se puede ver, en todos los casos la relación establecida entre las variables es de valor positivo indicando que su proyección en la regresión va a tender a crecer conjuntamente.

Los valores de correlación obtenidos entre las diferentes cronologías analizadas son en general elevados, si bien es cierto que el punto muestreado L2 presentó los valores más bajos de intercorrelacción con el resto de series. Los valores más elevados de correlación fueron hallados en líneas generales en los puntos de muestreo ubicados a mayor altitud, como L1, L5, L7 y L8, lo que indica una respuesta muy similar en sus crecimientos.

Tabla 2. Valores de intercorrelacción entre las cronologías analizadas para el periodo común de todas ellas

Cronología	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
L1	1	0,41	0,58	0,69	0,86	0,81	0,78	0,77	0,50
L2		1	0,29	0,32	0,38	0,43	0,44	0,39	0,29
L3			1	0,60	0,56	0,66	0,57	0,64	0,70
L4				1	0,69	0,77	0,70	0,69	0,65
L5					1	0,86	0,83	0,77	0,56
L6						1	0,79	0,78	0,60
L7							1	0,76	0,52
L8								1	0,62
L9									1

Elaboración propia.

3.2. Análisis de la relación crecimiento clima y reconstrucción climática

En el análisis de las relaciones crecimiento-clima y comenzando por el análisis de los valores de precipitación, los resultados obtenidos destacan una respuesta muy significativa frente a las precipitaciones primaverales, destacando de manera especial el mes de abril del año actual, así como los meses estivales de julio y agosto también del año de desarrollo. Por otro lado, *Fagus sylvatica* parece presentar valores de correlación negativos, aunque no marcada en todas las series frente a la precipitación del mes de enero.

En cuanto a los valores de temperatura media, las series analizadas ofrecen respuestas positivas en relación con las temperaturas de marzo, y también valores de correlación negativos frente a las temperaturas medias elevadas del mes de julio tanto del año actual como del año previo. La figura 4, ofrece los gráficos resultantes del cálculo de la relación crecimiento-clima a través de la función de correlación.

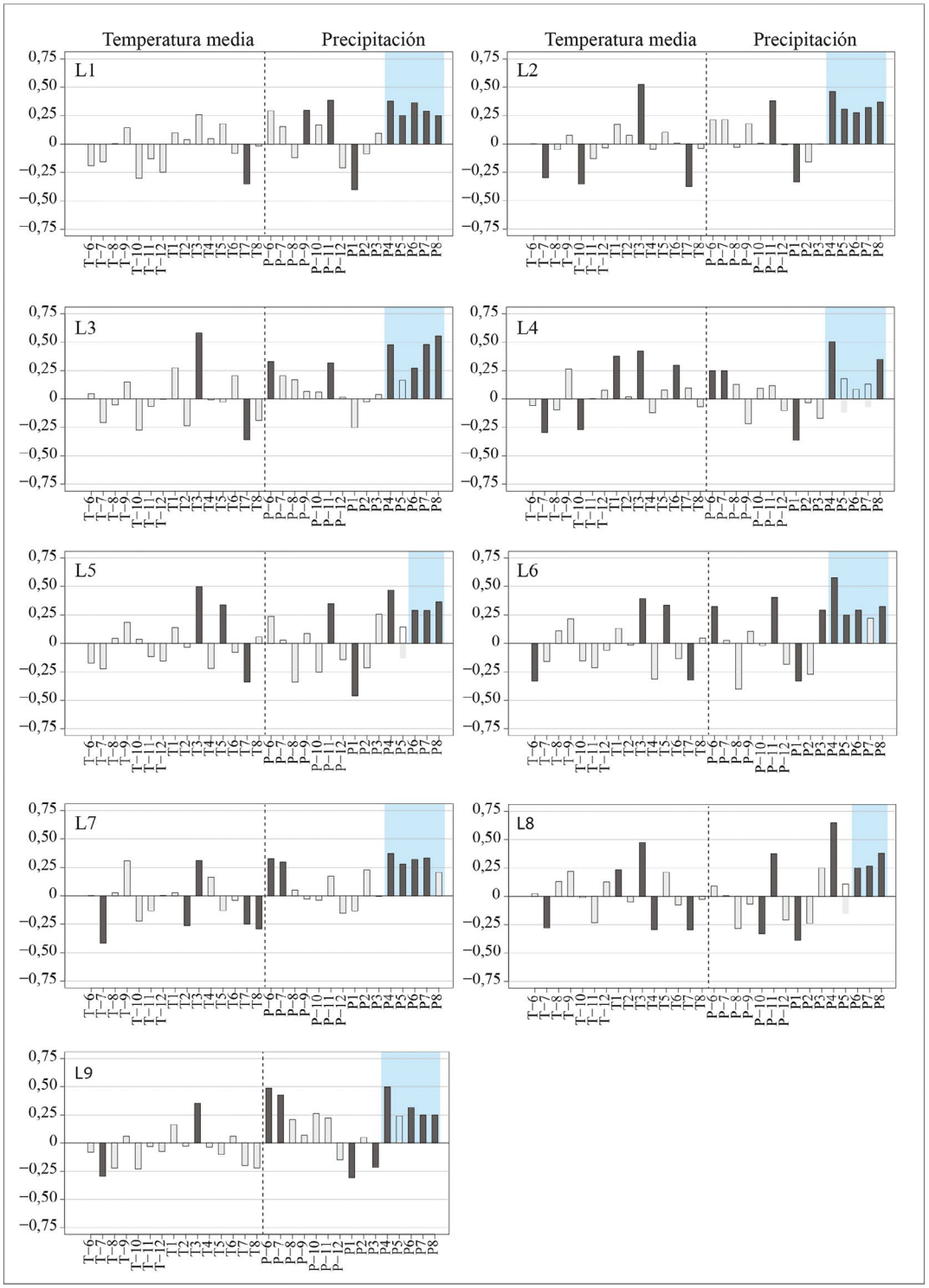
A la vista de los resultados, se ha considerado el periodo de precipitación de abril-agosto como idóneo para elaborar la reconstrucción climática, al tratarse de un continuo de meses con alta significación en los estadísticos obtenidos en la función de correlación con los registros de precipitación, como para permitir una reconstrucción fiable de las variaciones de la precipitación en este periodo en función de los crecimientos observados en las cronologías.

El modelo de transferencia se valida por la correlación (R = 0,67) y el coeficiente de determinación significativo (R^2= 0,45) durante todo el período 1950-2011, lo que significa que aproximadamente el 45% de la variabilidad en el crecimiento de los anillos es explicado por los datos de precipitación de este periodo. Mediante el proceso de calibración / verificación dividida, considerando 1950-1980 y 1981-2011, se probó la solidez temporal, revelando correlaciones significativas para ambos períodos (R=0,64 y R=0,69 respectivamente) y verificando la reconstrucción final (tabla 3). Los valores obtenidos por los estadísticos MSE, RE, CE y *Sign Test* indican fiabilidad y utilidad de cara a la reconstrucción. Para desarrollar la reconstrucción final que abarca 1798-2011, utilizamos un modelo de regresión lineal durante el período de 1950-2011 para reconstruir la serie de precipitaciones como función de los anillos de crecimiento fue:

$$Ppmm_Abr\text{-}Agost = 317{,}34 + 19{,}76 * PC1$$

Donde *Ppmm_Abr-Agost* es la precipitación de inicios desde inicios de primavera (abril) hasta mediados del verano (agosto) para el año t, y PC1 es el valor anual del primer componente principal de las cronologías para el año t en el periodo 1950-2011.

Figura 4. Funciones de correlación crecimiento-clima para la precipitación y la temperatura media



La ventana móvil abarca desde junio del año anterior (*n-1*) hasta agosto del año actual (*n*). Las columnas en color gris oscuro representan aquellas correlaciones superiores a ±0,24 que son estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Elaboración propia.

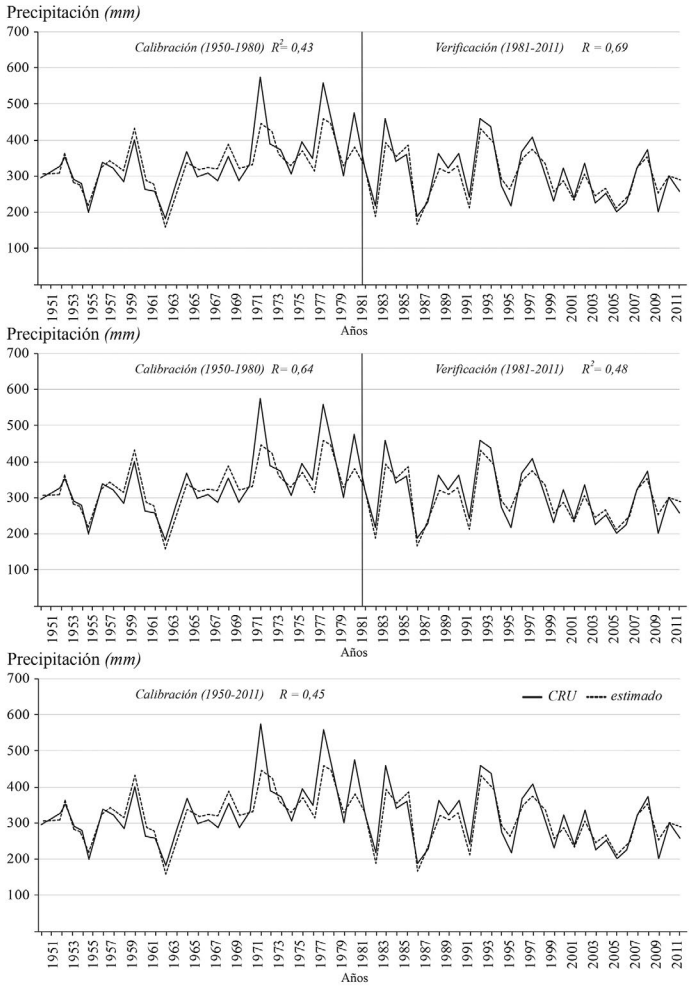
Tabla 3. Estadísticos de calibración/verificación de la reconstrucción de ppmm_Abr-Agost

	1950-1980 Calibración	1981-2011 verificación	1955-1980 calibración	1981-2011 verificación	Periodo 1950-2011
Años	31	31	31	31	62
R	0,64	0,69	0,69	0,64	0,67
R^2	0,43	0,48	0,48	0,43	0,45
MSE	0,37	0,39	0,39	0,37	0,38
CE	0,41	0,39	0,39	0,41	0,41
RE	0,42	0,40	0,40	0,42	0,40
Sign test	21+/10-	18+/13-	21+/10-	18+/13-	39+/23-
Ecuación de regresión para el periodo 1955-2011			Ppmm_ Abr-Agost = 317,34+19,76* PC1		
Porcentaje de varianza explicada: 78,85%					

Elaboración propia.

El primer componente principal (PC_1) de las cronologías analizadas explica el 78,85% de la varianza. En general los valores estimados por la regresión recogen tanto las variaciones de alta como de baja frecuencia observadas en los registros instrumentales, quedando mejor representados los años secos que los húmedos (figura 5).

Figura 5. Serie de precipitaciones observadas y reconstruidas a partir de los anillos de crecimiento, para los meses de abril a agosto en el valle de Polaciones entre el periodo 1950-2011

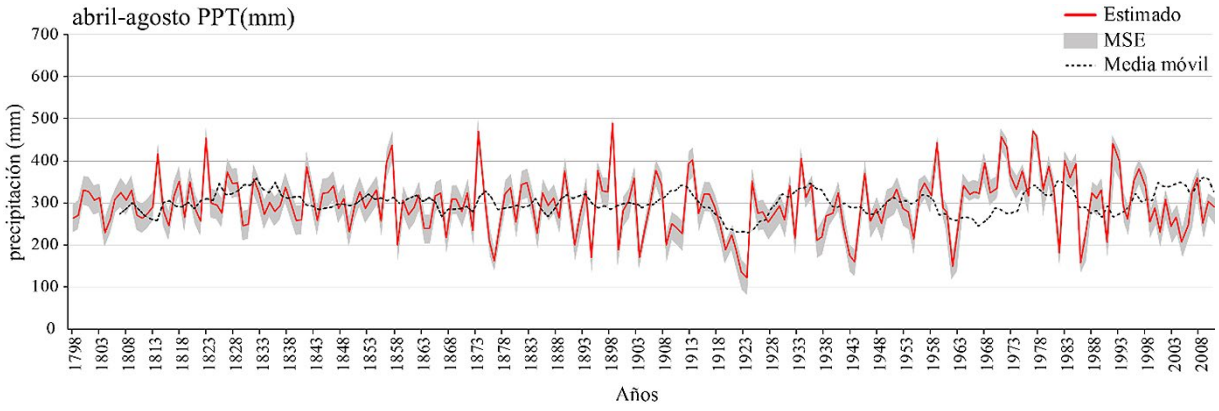


Fuente: datos climáticos red *Climatic Research Unit* (CRU). Elaboración propia.

Una vez calculado el modelo de regresión sobre el periodo común de las observaciones, fue posible llevar a cabo la reconstrucción de la precipitación como función de los anillos de crecimiento (figura 6). Este modelo fue posible extenderlo en el tiempo hasta el año 1798, periodo a partir del cual el estadístico EPS referido a las cronologías descendía por bajo del nivel 0,85 haciéndola no fiable.

Podemos establecer para el periodo abril-agosto en esta área una precipitación media de 317 mm. A su vez, podemos observar una serie de patrones en la precipitación que se asemejan en parte a los de crecimientos reflejados por las cronologías: a) Destaca un siglo XIX marcado por una moderada estabilidad, que se prolonga hasta la década de 1920. b) A partir de 1920 y en toda la centuria, la variabilidad en las precipitaciones se muestra de un modo más notable.

Figura 6. Reconstrucción a partir de anillos de crecimiento de la serie de precipitaciones de abril a agosto para el periodo 1798-2011



La línea discontinua representa una media móvil de 11 años.

Elaboración propia.

Resultan especialmente destacados, los periodos secos observados tanto en los años veinte, cuarenta y noventa, documentados históricamente por presentar periodos con sequías extremas en toda la península. Por otro lado, también encontramos periodos que destacan por lluvias abundantes, especialmente la década de los años treinta y los años setenta.

3.3. Elaboración de la serie de referencia y relación de años y periodos característicos sobre la reconstrucción y la cronología

La construcción de la serie de referencia a partir del conjunto de cronologías, para establecer la relación de años característicos, se extendió hasta el año 1703, periodo a partir del cual no se disponía de un número suficiente de series que dotara de fiabilidad la cronología. Sobre esta, fueron calculados los años característicos para el crecimiento recogido en la figura 7, donde podemos ver una serie de hechos significativos.

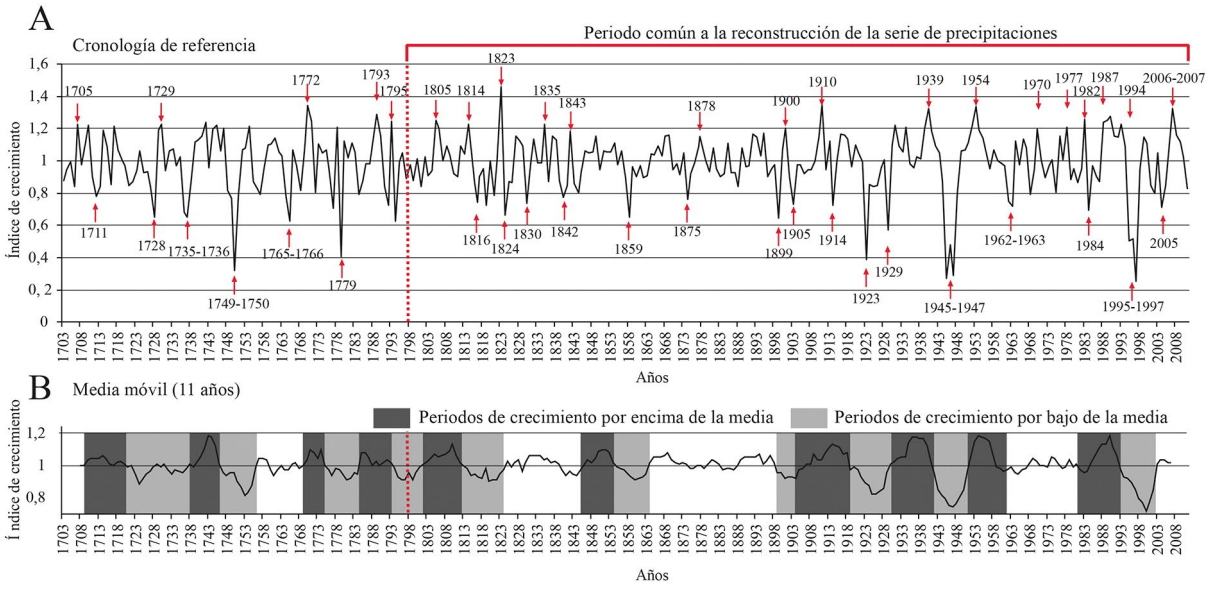
Un siglo XVIII caracterizado por una alta variabilidad en los crecimientos y donde destaca un importante número de periodos y años característicos, resultando especialmente marcado el periodo 1749-1750.

Por otro lado, en el XIX, lo podemos caracterizar como un periodo más regular o de cierta homogeneidad y estabilidad especialmente entre la década de los 60-90, reflejado en un crecimiento de anillos más ajustado a la media, donde únicamente podemos destacar un periodo de mayor variabilidad en torno a 1814-1845.

Por su parte, el siglo XX se caracteriza por una mayor magnitud, duración y número de años característicos tanto favorables como desfavorables reflejados en los crecimientos.

Destacamos especialmente como periodos desfavorables para el crecimiento las décadas de los años 20 y 40, donde en esta última queda patente la gran sequía peninsular producida entre 1945 y 1947, y los 90, donde de nuevo se observa un marcado periodo desfavorable producido nuevamente por las sequías de los años 1995 a 1997. Estos periodos menos favorables de cara al desarrollo de *Fagus sylvatica* encuentran su antítesis en las décadas de los años 30, 50 y 80 que suponen periodos en general favorables al crecimiento de la especie.

Figura 7. A) Cronología maestra para el conjunto de muestras analizadas donde se indican los años identificados como característicos en el crecimiento. B) Media móvil de 11 años que establece periodos de crecimientos medios favorables y desfavorables

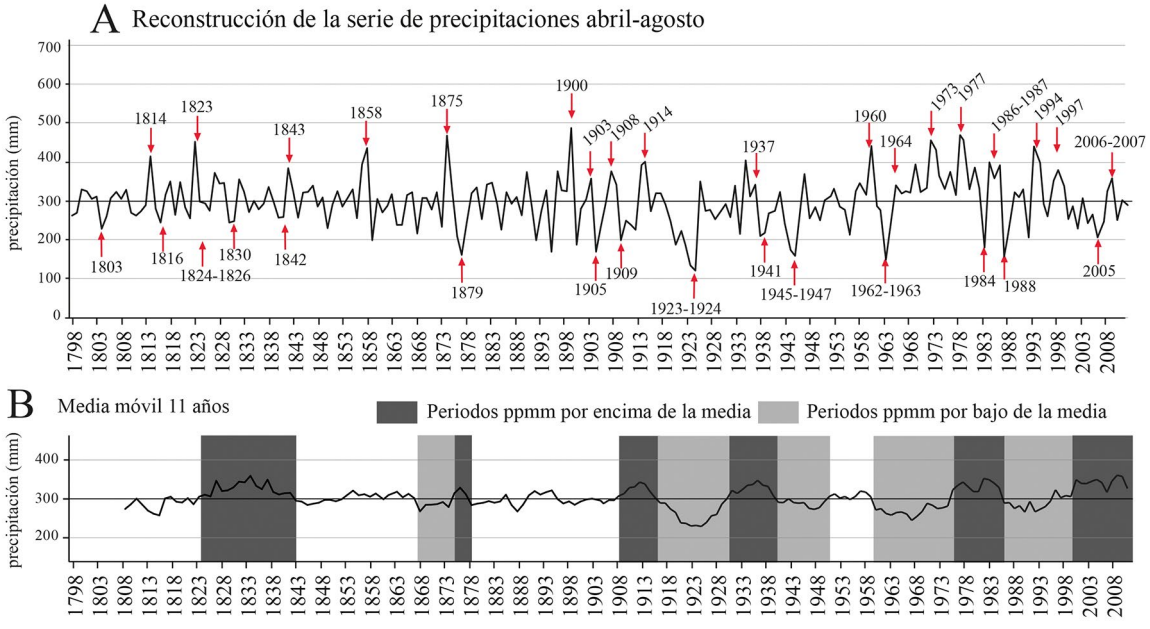


Elaboración propia.

Igualmente, sobre la reconstrucción de precipitaciones se procedió a identificar aquellos años o periodos que presentasen valores extremos en sus registros.

La distribución de estos años y periodos nos deja una escasa representación en el siglo XIX, donde apenas destacamos 5 años con una significación excepcional en cuanto a periodos de lluvia abundante, (1814, 1823, 1843, 1858, 1875), mientras que en el caso de sequías este siglo nos deja un balance muy similar, con apenas 8 años destacables en todo el siglo, el año 1803, 1816, el periodo 1824-1826, 1830, 1842 y 1879.

Figura 8. A) Reconstrucción de la serie de precipitaciones abril-agosto donde se indican los años identificados como característicos. B) Media móvil de 11 años que establece periodos húmedos y secos



Elaboración propia.

En cuanto al siglo XX se produce un aumento en la frecuencia y duración de este tipo de eventos recogiéndose en este siglo el 70% de las observaciones, destacando por igual los años y periodos de precipitación abundante durante estos meses (50%), frente a aquellos con sequías primaveral-estival. Destacan especialmente los años y periodos 1905, 1909, 1923-1924, 1941, 1945-1947, 1962-1963, 1984, 1988 y 2005 como años secos, mientras que lo hacen como periodos o años húmedos 1900, 1903, 1908, 1914, 1937, 1960, 1964, 1973, 1977, 1986-1987, 1994, 1997, 2006-2007.

En último lugar se han puesto en relación los periodos y años característicos observados en la reconstrucción, con aquellos reflejados en los crecimientos de los anillos para tratar de ver si existe una influencia directa o no sobre el crecimiento de los anillos. Esta relación de años se muestra en la tabla 4.

En ella se refleja una relación entre los 38 años característicos obtenidos de la cronología de anillos de crecimiento y los 41 registrados en la reconstrucción de las precipitaciones. Los resultados muestran que 21 años característicos obtenidos son comunes en ambas, indicando que la influencia de la precipitación primaveral-estival parece tener una importancia notable en la determinación de un buen o mal año de cara al crecimiento de los anillos. De los 21 años característicos, la mayoría de los resultados obtenidos son generalmente años (periodos de abril-agosto) aislados, siendo el 70% húmedos y el 30% restante secos.

Tabla 4. Relación de años y periodos significativos (húmedos y secos) comunes a la reconstrucción de la serie de precipitaciones y la cronología de índices de crecimiento

Cronología				**Reconstrucción**			
Siglos XX/XXI	Siglo XIX	Siglos XX/XXI	Siglo XIX	Siglos XX/XXI	Siglo XIX	Siglos XX/XXI	Siglo XIX
húmedos	húmedos	secos	secos	húmedos	húmedos	secos	secos
2006/2007	1878	2005	1899	2006/2007	1875	2005	1879
1994	1843	1995/1997	1875	1997	1858	1988	1842
1987	1835	1984	1859	1994	1843	1984	1830
1982	1823	1962/1963	1842	1986/1987	1823	1962/1963	1824/1826
1977	1814	1945/1947	1830	1977	1814	1945/1947	1816
1970	1805	1929	1824	1973		1941	1803
1954		1923	1816	1964		1923/1924	
1939		1914		1960		1909	
1910		1905		1937		1905	
1900				1914			
				1908			
				1903			
				1900			

El color gris indica periodos o años coincidentes en ambas.

Elaboración propia.

4. Discusión de resultados

A partir de los análisis de la relación crecimiento-clima, los resultados observados en las cronologías revelaron una respuesta climática común en el crecimiento anual, siendo muy llamativa la correlación positiva con las precipitaciones de los meses de inicio de la primavera, especialmente abril, así como los de inicios del verano (junio, julio y agosto).

Esta respuesta positiva en el crecimiento respecto al volumen de precipitación caída especialmente en abril, viene explicado principalmente por un arranque de la actividad metabólica y cambial de la especie *Fagus sylvatica,* evidenciada en estudios anteriores referidos a la actividad del cambium y xylogénesis de la especie, mostrando diferentes tendencias norte-sur (en Europa destacan los trabajos de Eilmann *et al*., 2014. En Eslovenia: Čufar, *et al.*, 2008; Prislan, Schmitt, Koch, Gričar & Čufar, 2011; Prislan, Gričar, de Luis, Smith & Čufar, 2013. En Francia: Michelot *et al*., 2012b. En la República Checa: Vavrcik, Gryc, Mensik y Baar, 2013. En España: Robson, Rasztovits, Aphalo, Alia y Aranda, 2013; Martínez del Castillo *et al*., 2016), donde se establece un periodo de máxima actividad cambial entre abril y julio, para reducirse rápidamente a partir de ahí. Este patrón confirma la dinámica de crecimiento sensible a la sequía, tanto primaveral como estival, ampliamente apoyada por la literatura a lo largo del área de distribución natural de *Fagus sylvatica* en toda Europa (Dittmar *et al*., 2003; Tegel *et al*., 2014); en España (Rozas, 2001;

2006; Rozas *et al*., 2015; Jump, *et al.,* 2006, 2007; Peñuelas, Ogaya, Boada, Jump, 2007; Tejedor, De Luis, Cuadrat, Esper y Saz, 2016; Tejedor, Saz, Esper, Cuadrat, & Luis, 2017); en Italia (Piovesan *et al*., 2005a); Francia (Lebourgeois, Breda, Ulrich y Granier, 2005; Michelot *et al*., 2012a); Alemania (Friedrichs *et al*., 2009; Scharnweber *et al*., 2011) o Suecia (Drobyshev *et al*., 2010).

Sin embargo, los resultados de los análisis de la relación climática con el crecimiento de *Fagus* en este sector de su límite meridional de distribución, no se ajustan exactamente con resultados obtenidos en otros estudios fuera de la península Ibérica como analizan Martínez del Castillo *et al*. 2016, con periodos más reducidos de actividad del cambium y xylogénesis de la especie. De ahí que resulte de gran importancia, dado el corto periodo vegetativo, las precipitaciones estivales pero especialmente la de inicios de la primavera. A su vez, los resultados obtenidos en los trabajos de Rozas *et al*. (2015) y su análisis con más de 30 cronologías repartidas de Este a Oeste por toda la región atlántica peninsular, sirven para apoyar de manera sólida los resultados obtenidos de este estudio. Aquí, parecen ser las precipitaciones de abril las que han demostrado por encima de las precipitaciones estivales, tener una respuesta más influyente en el crecimiento del hayedo en los sectores de montaña atlántica, justificado por los autores en un arranque más temprano de la actividad del cambium y el beneficio que supone una buena disponibilidad de agua en el subsuelo. A su vez, podemos destacar que la relación esperada del crecimiento frente al estrés que puede suponer la escasez de precipitación estival, especialmente en los meses de junio, julio y agosto, parece suponer un factor importante, aunque no ha quedado tan significativamente marcada como se esperaba en el análisis. Este hecho parece ser debido, a la mitigación que genera la prevalencia de condiciones de nubosidad y nieblas (precipitación encubierta), comportándose como los bosques de niebla, y depender de la inmersión en la nube para la mejora del crecimiento y la ganancia de carbono (Rozas *et al*., 2015). A su vez, esto apoya la hipótesis de que el estrés por sequía no sería tan relevante como se esperaba en su límite de distribución (Tegel *et al*., 2014), puesto que solo han parecido resultar determinantes en el crecimiento episodios de sequía muy marcados y de fuerte incidencia en la península.

Respecto a la reconstrucción de las precipitaciones realizada y la identificación de eventos extremos, tanto sequías como años lluviosos, muchos de los años registrados como secos (2005, 1963, 1941, 1924, 1909, 1879, 1842, 1824, 1803) y húmedos (1997, 1973, 1937, 1914, 1903) han sido identificados por otros estudios en España, como es el de Tejedor *et al* 2017, para el Sistema Ibérico. En esta misma línea se han encontrado coincidencias en cuanto a los grandes periodos en el trabajo de Génova (2012), en su estudio dendrocronológico en Guadarrama con *Pinus sylvestris*.

Por otro lado, las tendencias observadas en la reconstrucción se ajustan a las observaciones de Andreu *et al*. (2007) que muestran una mayor ocurrencia en España de años extremos en la segunda mitad del siglo XX fruto de un incremento en la variabilidad de la precipitación, también recogido en De Luis *et al*. (2000), Giorgi, Bi & Pal (2004). Asimismo Vicente-Serrano (2006) señala que las sequías más intensas se registraron en las décadas de 1940-1950, 1980 y 1990.

Por último, conviene destacar que, aunque el conjunto de la información de la CRU cubre el período 1901-2015, existen pocos registros instrumentales para representar con fiabilidad las condiciones climáticas específicas de la zona de estudio anteriores a los años 50. Esto genera tendencia a un sesgo (bias) negativo a medida que nos movemos hacia el principio de la serie, debido posiblemente a unos datos menos ajustados al comportamiento climático local. Ello trató de minimizarse acotando los datos al periodo 1950-2011, obteniéndose correlación con la calibración aceptable.

5. Conclusiones

En este estudio, el empleo de las cronologías de anillos de crecimiento, elaboradas a partir de individuos vivos de haya (*Fagus sylvatica*) como proxy para llevar a cabo reconstrucciones de variables climáticas, se ha mostrado como un recurso válido y potente extendido ampliamente en los últimos años (Case y MacDonald, 1995; Flower y Smith, 2011; Cai, Liu y Tian, 2013; Zhang, *et al.,* 2015).

Los buenos valores de correlación obtenidos entre el crecimiento anual y las precipitaciones del periodo abril-agosto permiten reconstruir, mediante análisis regresivo, el régimen de precipitaciones primaverales y estivales de algo más de dos siglos completos, que supera cualquier registro previamente publicado para el área (Montaña Cantábrica Central). Además, en este estudio exploratorio del potencial dendroclimático de *Fagus sylvatica* podemos afirmar que es posible ampliar el registro temporal, seleccionando individuos longevos diseminados por el área que dotarían de robustez las series de crecimientos.

La reconstrucción de 213 años brinda nueva luz sobre la variabilidad y el cambio de las precipitaciones en la región. Su evolución en los últimos dos siglos revela un registro total de 27 años/periodos característicos, definiendo al siglo XIX como un periodo de regularidad y cierta estabilidad de las precipitaciones, donde apenas se registraron el 25% de los años y periodos característicos. Por su parte el XX viene marcado por un aumento en número y duración de los periodos extraordinarios, con una alternancia o frecuencia decenal (periodos húmedos-secos), donde han quedado notablemente marcados los eventos de sequías primaverales y estivales de los periodos 1923-1924, 1945-1947, 1963-1964, 1984 y 1988. La precipitación parece fluctuar a partir de las primeras décadas del siglo XX, alternando perdidos de mayor y menor precipitación.

Por otro lado, la elaboración de la cronología de referencia, a partir del conjunto de 9 cronologías locales, se extiende hasta el año 1703 a partir del cual no se disponía de un número suficiente de series que la dotara de fiabilidad, pese a contar con individuos más longevos. La evolución del crecimiento de los anillos, se ajustó en buena medida a los años característicos obtenidos en la reconstrucción, indicando el fuerte peso que las precipitaciones suponen para el desarrollo anual de los anillos de crecimiento. A su vez este estudio con la aportación de esta cronología proporciona datos paleoclimáticos extendidos para esta área.

Referencias

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2013). *Datos termopluviométricos de la estación meteorológica de Uznayo (Cantabria)*. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, AEMET, Delegación Territorial en Cantabria.

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2016). *Visor del Atlas climático de la Península y Baleares, 1971-2000*. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Rural y Marino, Madrid, Instituto de Meteorología de Portugal. Recuperado de http://agroclimap.aemet.es/#

Andreu, L., Gutierrez, E., Macias, M., Ribas, M., Bosch, O. y Camarero, J.J. (2007). Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biol.*, 13, 804-815. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01322.x

Biondi, F. (1993). Climatic signals in tree-rings of *Fagus sylvatica L.* from the central Apennines, Italy. *Acta Oecologica,* 14, 57-71. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Franco_Biondi/publication/279895651_Climatic_signals_in_tree_rings_of_Fagus_sylvatica_L_from_the_central_Apennines_Italy/links/5670624c08ae2b1f87ace379.pdf

Biondi, F. & Visani, S. (1996). Recent developments in the analysis of an Italian tree-ring network with emphasis on European beech (*Fagus sylvatica* L.). In J.S. Dean, D.M. Meko, T.W. Swetnam (eds.), *Tree Rings, Environment and Humanity* (pp. 713-725). Retrieved from http://wolfweb.unr.edu/homepage/fbiondi/Biondi&Visani1996.pdf

Bunn, A.G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26, 115-124. http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002

Bradley, R.S. (Ed.) (1990). *Global change in the past.* Colorado: University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Office for Interdisciplinary Earth Studies.

Briffa, K.R., Jones, P.D. & Schweingruber, F.H. (1988). Summer temperature patterns over Europe: a reconstruction from 1750 AD based on maximum latewood density indices of conifers. *Quaternary Research*, *30*(1), 36-52. https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90086-5

Cai, Q., Liu, Y. & Tian, H. (2013). A dendroclimatic reconstruction of May–June mean temperature variation in the Heng Mounatins, north China, since 1767 AD. *Quaternary international*, 283, 3-10. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.03.034

Camarero, J.J. & Gutiérrez, E. (2004). Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change*, *63*(1-2), 181-200. https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000018507.71343.46

Case, R.A. & MacDonald, G.M. (1995). A dendroclimatic reconstruction of annual precipitation on the western Canadian prairies since AD 1505 from *Pinus flexilis* James. *Quaternary Research*, *44*(2), 267-275. https://doi.org/10.1006/qres.1995.1071

Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) (2012). *Modelo Digital del Terreno LIDAR*. Madrid: Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional, Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Recuperado de http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp

Cook, E. & Kairiukstis, L. (1990). *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0

Cook, E.R. & Kairiukstis, L.A. (Eds.) (2013). *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Springer Science and Business Media.

Cook, R.D. & Weisberg, S. (1994). *An Introduction to Regression Graphics*. https://doi.org/10.1002/9780470316863

Colley, W.W. & Lohnes, P.R. (1971). *Multivariate data analysis*. New York: J. Wiley and Sons Inc.

CRU (2017). *Climatic Research Unit*. Retrieved from http://www.cru.uea.ac.uk/data

Čufar, K., Prislan, P. & Gričar, J. (2008). Cambial activity and wood formation in beech (*Fagus sylvatica*) during the 2006 growth season. *Wood Research*, (53), 1-11. Retrieved from http://eprints.gozdis.si/id/eprint/602

De Luis, M.D., Raventós, J., González-Hidalgo, J.C., Sánchez, J.R. & Cortina, J. (2000). Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (East Spain). *International Journal of Climatology*, *20*(12), 1451-1469. Retrieved from http://www.unizar.es/mdla/publications_archivos/011_De%20Luis_et_al._2000_(IJC).pdf

De Luis, M.D., Brunetti, M., Gonzalez-Hidalgo, J. C., Longares, L. A. & Martin-Vide, J. (2010). Changes in seasonal precipitation in the Iberian Peninsula during 1946-2005. *Global and Planetary Change*, *74*(1), 27-33. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.06.006

Dittmar, C., Zech, W. & Elling, W. (2003). Growth variations of common beech *(Fagus sylvatica L.)* under different climatic and environmental conditions in Europe: a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173, 63-78. http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00816-7

Di Filippo, A., Biondi, F., Čufar, K., De Luis, M., Grabner, M., Maugeri, M. & Piovesan, G. (2007). Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica L.*) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *Journal of Biogeography*, *34*(11), 1873-1892. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01747.x

Di Filippo, A., Biondi, F., Maugeri, M., Schirone, B. & Piovesan, G. (2012). Bioclimate and growth history affect beech lifespan in the Italian Alps and Apennines. *Global change biology*, *18*(3), 960-972. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02617.x

Drobyshev, I., Övergaard, R., Saygin, I., Niklasson, M., Hickler, T., Karlsson, M. & Sykes, M.T. (2010). Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica L.*) in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, *259*(11), 2160-2171. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.037

Eilmann, B., Sterck, F., Wegner, L., de Vries, S.M., Von Arx, G., Mohren, G.M. & Sass-Klaassen, U. (2014). Wood structural differences between northern and southern beech provenances growing at a moderate site. *Tree physiology, 34*(8), 882-893. https://doi.org/10.1093/treephys/tpu069

Esper, J., Cook, E.R. & Schweingruber, F.H. (2002). Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, *295*(5563), 2250-2253. https://doi.org/10.1126/science.1066208

Flower, A. & Smith, D.J. (2011). A dendroclimatic reconstruction of June-July mean temperature in the northern Canadian Rocky Mountains. *Dendrochronologia*, *29*(1), 55-63. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2010.10.001

Friedrichs, D.A., Trouet, V., Büntgen, U., Frank, D.C., Esper, J., Neuwirth, B. & Löffler, J. (2009). Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees*, *23*(4), 729-739. https://doi.org/10.1007/s00468-009-0315-2

Fritts, H.C. (2012). *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press.

Fritts, H.C., Guiot, J., Gordon, G.A., & Schweingruber, F. (1990). Methods of calibration, verification, and reconstruction. In E.R., Cook & L.A. Kairiukstis (eds), *Methods of Dendrochronology* (pp. 163-217). https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0_4

Giorgi, F., Bi, X. & Pal, J.S. (2004). Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe, I. Present-day climate (1961–1990). *Clim. Dynam.*, 22, 733-756. https://doi.org/10.1007/s00382-004-0467-0

Gómez-Manzanedo, M., Roig, S. & Reque, J.A. (2008). Silvicultural characterization of the Cantabrian beech forest: the influence of site conditions and anthropic uses. *Forest Systems, 17*(2), 168-177. http://dx.doi.org/10.5424/srf/2008172-01031

Gutiérrez, E. (1988). Dendroecological study of *Fagus sylvatica L.* in the Montseny mountains (Spain). *Acta Oecologica. Oecología Plantarum*, 9, 301-309.

Gutiérrez, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. En X. Nieto i M.A. Cau, (Eds.), *Arqueología nautica mediterrània. Monografies del CASC* (pp. 309-322). Girona: Generalitat de Catalunya.

Griggs, C., Pearson, C., Manning, S.W. & Lorentzen, B. (2014). A 250-year annual precipitation reconstruction and drought assessment for Cyprus from *Pinus brutia* Ten. tree-rings. *International Journal of Climatology*, *34*(8), 2702-2714. https://doi.org/10.1002/joc.3869

Grissino-Mayer, H.D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring research*, *57*(2), 205-221. Retrieved from http://hdl.handle.net/10150/251654

Harris, I.P.D.J., Jones, P.D., Osborn, T.J. & Lister, D.H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations–the CRU TS3. 10 Dataset. *International Journal of Climatology*, *34*(3), 623-642. https://doi.org/10.1002/joc.3711

Herrera, J., Laskurain, N.A., Olano, J.M., Loidi, J., Escudero, A. y Olano, J.M. (2001). Sucesión secundaria en un abedular-hayedo en el Parque Natural de Urquiola (Vizcaya). *Lazaroa,* 22, 59-66. Recuperado de https://revistas.ucm.es/index.php/LAZA/article/viewFile/LAZA0101110059A/9322

Holmes, R.L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*, *43*(1), 69-78. Retrieved from http://hdl.handle.net/10150/261223

Hughes, M.K., Swetnam, T.W., Diaz, H.F. (Eds). (2011). Dendroclimatology: Progress and Prospects. Springer: Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0

Jump, A.S., Hunt, J.M. & Peñuelas, J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range-ege of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, *12*(11), 2163-2174. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x

Jump, A.S., Hunt, J.M. & Peñuelas, J. (2007). Climate relationships of growth and establishment across the altitudinal range of *Fagus sylvatica* in the Montseny Mountains, northeast Spain. *Ecoscience*, *14*(4), 507-518. https://doi.org/10.2980/1195-6860(2007)14[507:CROGAE]2.0.CO;2

Kharuk, V.I., Dvinskaya, M.L. & Ranson, K.J. (2013). Fire return intervals within the northern boundary of the larch forest in Central Siberia. *International Journal of Wildland Fire*, *22*(2), 207-211. http://dx.doi.org/10.1071/WF11181

Lebourgeois, F. (2005). Approche dendroécologique de la sensibilité du Hêtre (*Fagus sylvatica L.)* au climat en France et en Europe. *Revue Forestiere Francaise*, 1, 33-50. https://doi.org/10.4267/2042/5021

Lebourgeois, F., Breda, N., Ulrich, E. & Granier, A. (2005). Climate-tree-growth relationships of European beech *(Fagus sylvatica L.)* in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19, 385-401. https://doi.org/10.1007/s00468-004-0397-9

Lebourgeois, F. & Mérian, P. (2012). *Principes et méthodes de la dendrochronologie.* (Doctoral dissertation, AgroParisTech). Retrieved from https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01627048

López-Moreno, J. I., El-Kenawy, A., Revuelto, J., Azorín-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Lorenzo-Lacruz, J., ... & Vicente-Serrano, S.M. (2014). Observed trends and future projections for winter warm events in the Ebro basin, northeast Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.,* 34, 49-60. https://doi.org/10.1002/joc.3665

Luckman, B.H. (1990). Mountain areas and global change: a view from the Canadian Rockies. *Mountain Research and Development, 10*(2), 183-195. https://doi.org/10.2307/3673428

Martinez del Castillo, E., Longares, L. A., Gričar, J., Prislan, P., Gil-Pelegrín, E., Čufar, K. & De Luis, M. (2016). Living on the edge: contrasted wood-formation dynamics in *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* under Mediterranean conditions. *Frontiers in Plant Science,* 7, 370. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00370

McGuire, A.D., Ruess, R.W., Lloyd, A., Yarie, J., Clein, J.S. & Juday, G. P. (2010). Vulnerability of white spruce tree growth in interior Alaska in response to climate variability: dendrochronological, demographic, and experimental perspectives. *Canadian Journal of Forest Research*, *40*(7), 1197-1209. https://doi.org/10.1139/X09-206

Michelot, A., Bréda, N., Damesin, C. & Dufrêne, E. (2012a). Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, Quercus petraea and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest ecology and management*, 265, 161-171. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.024

Michelot, A., Simard, S., Rathgeber, C., Dufrêne, E. & Damesin, C. (2012b). Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica, Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree physiology*, *32*(8), 1033-1045. https://doi.org/10.1093/treephys/tps052

Pena-Angulo, D., Cortesi, N., Brunetti, M., and González-Hidalgo, J.C. (2015). Spatial variability of maximum and minimum monthly temperature in Spain during 1981–2010 evaluated by correlation decay distance (CDD). *Theor. Appl. Climatol.*, 122, 35-45. https://doi.org/10.1007/s00704-014-1277-x

Peñuelas, J., Ogaya, R., Boada, M.S. & Jump, A. (2007). Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, *30*(6), 829-837. https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05247.x

Piovesan, G., Bernabei, M., Di Filippo, A., Romagnoli, M. & Schirone, B. (2003). A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old-growth forest of Central Italy. *Dendrochronologia*, *21*(1), 13-22. https://doi.org/10.1078/1125-7865-00036

Piovesan, G., Biondi, F., Bernabei, M., Di Filippo, A. & Schirone, B. (2005a). Spatial and altitudinal bioclimatic zones of the Italian Peninsula identified from a beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring network. *Acta Oecologica*, 27, 197-210. http://dx.doi.org/10.1016/j.actao.2005.01.001

Piovesan, G., Di Filippo, A., Alessandrini, A., Biondi, F. & Schirone, B. (2005b). Structure, dynamics and dendroecology of an old-growth *Fagus* forest in the Apennines. *Journal of Vegetation Science,* 16, 13-28. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2005.tb02334.x

Piutti, E. & Cescatti, A., (1997). A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intraspecific competition in European beech. *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 277-284. https://doi.org/10.1139/x96-176

Prislan, P., Schmitt, U., Koch, G., Gričar, J. & Čufar, K. (2011). Seasonal ultrastructural changes in the cambial zone of beech *(Fagus sylvatica)* grown at two different altitudes. *Iawa Journal*, *32*(4), 443-459. Retrieved from http://booksandjournals.brillonline.com/content/journals/10.1163/22941932-90000070

Prislan, P., Gričar, J., de Luis, M., Smith, K. T. & Čufar, K. (2013). Phenological variation in xylem and phloem formation in Fagus sylvatica from two contrasting sites. *Agricultural and forest meteorology*, 180, 142-151. http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.001

R Development Core Team (2011). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna: the R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from http://www.R-project.org/.

Raso, J.M. (1997). The recent evolution of mean annual temperatures in Spain. *Advances in Historical Climatology in Spain. Vilassar de Mar: Oikos-tau.* 201-223.

Robson, T.M., Rasztovits, E., Aphalo, P.J., Alia, R. & Aranda, I. (2013). Flushing phenology and fitness of European beech (*Fagus sylvatica L.*) provenances from a trial in La Rioja, Spain, segregate according to their climate of origin. *Agricultural and forest meteorology*, 180, 76-85. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.008

Rodrigo, F.S., Esteban-Parra, M.J., Pozo-Vázquez, D. & Castro-Diez, Y. (1999). A 500-year precipitation record in southern Spain, *Int. J. Climatol*, 19, 1233-1253. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Rodrigo2/publication/228553409_A_500year_precipitation_record_in_Southern_Spain/links/09e4150bf0af7d316d000000.pdf

Rozas, V. (2001). Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica L.* and *Quercus robur L.* in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain. *Annals of Forest Science*, 58, 237-251. http://dx.doi.org/10.1051/forest:2001123

Rozas, V. (2006). Characterization and analysis of climatic signal in chronologies of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in the central Cantabrian region, Spain. *Forest Systems*, *15*(2), 182-196. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Vicente_Rozas/publication/279479060_Characterization_and_analysis_of_climatic_signal_in_chronologies_of_Fagus_sylvatica_L_and_Quercus_robur_L_in_the_central_Cantabrian_region_Spain/links/5673c4f308aee7a4274589fa.pdf

Rozas, V., Camarero, J. J., Sangüesa-Barreda, G., Souto, M. & García-González, I. (2015). Summer drought and ENSO-related cloudiness distinctly drive *Fagus sylvatica* growth near the species rear-edge in northern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 153-164. http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.012

Rubio, A., Blanco, A., Sanz, V. G., Sánchez, O. y Elena, R. (2003). Autoecología paramétrica de los hayedos de Castilla y León. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, *12*(1), 87-110. Recuperado de https://recyt.fecyt.es/index.php/IA/article/view/2485

Scharnweber, T., Manthey, M., Criegee, C., Bauwe, A., Schröder, C. & Wilmking, M. (2011). Drought matters-Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. *Forest Ecology and Management*, *262*(6), 947-961. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.026

Scharnweber, T., Manthey, M. & Wilmking, M. (2013). Differential radial growth patterns between beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on periodically waterlogged soils. *Tree physiology*, *33*(4), 425-437. https://doi.org/10.1093/treephys/tpt020

Schweingruber, F.H. (1990). *Anatomy of European woods.An atlas for the identification of European trees, shrubs and dwarf shrubs*. Berne: Paul Haupt.

Schweingruber, F.H. (2012). *Trees and wood in dendrochronology: morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology*. Verlag, Berlin, Germany: Springer Science and Business Media.

Shi, C., Masson-Delmotte, V., Daux, V., Li, Z., Carré, M. & Moore, J.C. (2015). Unprecedented recent warming rate and temperature variability over the east Tibetan Plateau inferred from Alpine treeline dendrochronology. *Climate Dynamics*, *45*(5-6), 1367-1380. https://doi.org/10.1007/s00382-014-2386-z

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

Stokes, M.A. & Smiley, T.L. (1968). *An Introduction to Tree-ring Dating*. Chicago: The University of Chicago Press.

Takahashi, K., Tokumitsu, Y. & Yasue, K. (2005). Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, Central Japan. *Ecological Research, 20*(4), 445-451. https://doi.org/10.1007/s11284-005-0060-y

Takahashi, K., Okuhara, I., Tokumitsu, Y. & Yasue, K. (2011). Responses to climate by tree-ring widths and maximum latewood densities of two *Abies* species at upper and lower altitudinal distribution limits in central Japan. *Trees*, *25*(4), 745-753. https://doi.org/10.1007/s00468-011-0552-z

Tardif, J., Camarero, J.J., Ribas, M. & Gutiérrez, E. (2003). Spatiotemporal variability in tree growth in the Central Pyrenees: climatic and site influences. *Ecological Monographs*, *73*(2), 241-257. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/3100016?seq=1#page_scan_tab_contents

Tegel, W., Seim, A., Hakelberg, D., Hoffmann, S., Panev, M., Westphal, T. & Büntgen, U. (2014). A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress. *European Journal of Forest Research*, *133*(1), 61-71. https://doi.org/10.1007/s10342-013-0737-7

Tejedor, E., De Luis, M., Cuadrat, J.M., Esper, J. & Saz, M.Á. (2016). Tree-ring-based drought reconstruction in the Iberian Range (east of Spain) since 1694. *International journal of biometeorology*, *60*(3), 361-372. https://doi.org/10.1007/s00484-015-1033-7

Tejedor, E., Saz, M. A., Esper, J., Cuadrat, J. M., & Luis, M. (2017). Summer drought reconstruction in northeastern Spain inferred from a tree ring latewood network since 1734. *Geophysical Research Letters*, *44*(16), 8492-8500. https://doi.org/10.1002/2017GL074748

Vavrcik, H., Gryc, V., Mensik, L. & Baar, J. (2013). Xylem formation in *Fagus sylvatica* during one growing season. *Dendrobiology*, 69, 69-75. http://dx.doi.org/10.12657/denbio.069.008

Vicente-Serrano, S.M. (2006). Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula (1910–2000). *Hydrolog. Sci. J.,* 51, 83-97. https://doi.org/10.1623/hysj.51.1.83

Wigley, T.M., Briffa, K.R. & Jones, P.D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of climate and Applied Meteorology*, *23*(2), 201-213. http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2

Yamaguchi, D. K. (1991). A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research*, *21*(3), 414-416. https://doi.org/10.1139/x91-053

Zhang, R.B., Yuan, Y.J., Wei, W.S., Gou, X.H., Yu, S.L., Shang, H.M., ... & Qin, L. (2015). Dendroclimatic reconstruction of autumn–winter mean minimum temperature in the eastern Tibetan Plateau since 1600 AD. *Dendrochronologia*, 33, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.09.001