

Caracterización y análisis de la señal climática en cronologías de *Fagus sylvatica* L. y *Quercus robur* L. en la región central de la Cornisa Cantábrica

V. Rozas*

Departamento de Ecología, CIFA de Lourizán. Xunta de Galicia. Apdo. 127. 36080 Pontevedra. España

Resumen

En este trabajo se analizaron las respuestas climáticas de tres cronologías de haya (*Fagus sylvatica* L.) y tres de roble (*Quercus robur* L.) en la región central de la Cornisa Cantábrica. Se utilizaron datos climáticos regionales y el índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAO) como indicativo de la señal macroclimática. Las cronologías presentaron una variabilidad interanual similar entre especies y localidades. Las correlaciones mayores y más extensas en el tiempo se obtuvieron entre cronologías de la misma especie y similar altitud. Las cronologías presentaron señales de distinta frecuencia coincidentes con señales características de los índices NAO. El 52-64% de la variación del crecimiento fue explicada por el clima regional, mientras que la NAO explicó un 13-27%. La elevada temperatura estival del año previo al crecimiento y la baja temperatura invernal fueron factores limitantes para el haya por encima de 700 m de altitud. El crecimiento del roble a baja altitud estuvo limitado por la elevada temperatura primaveral del año previo y por la sequía estival del año de crecimiento. Ambas especies mostraron una relación negativa con los índices NAO invernales, del año previo al crecimiento en el haya y del mismo año de crecimiento en el roble. En el roble se manifestó además una relación negativa con la NAO de final del verano del año previo. Estos resultados sugieren la necesidad de investigaciones más extensas sobre la caracterización del crecimiento radial y su respuesta climática a lo largo de la Cornisa Cantábrica.

Palabras clave: anillos de crecimiento, dendrocronología, análisis espectral, respuesta climática, clima regional, NAO.

Abstract

Characterization and analysis of climatic signal in chronologies of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in the central Cantabrian region, Spain

In this work, the climatic responses of three beech (*Fagus sylvatica* L.) and three oak (*Quercus robur* L.) tree-ring chronologies in the central Cantabrian region, were analyzed. Regional temperature and precipitation data, and the climatic teleconnection indices of the North Atlantic Oscillation (NAO), were used as climatic predictors. Very similar interannual ring-width variability among chronologies of different species and localities was displayed. Chronologies of the same species and similar altitudes showed the highest cross-correlations, which were significant at widest timescales. Periodic signals of a variety of frequencies that coincided with signals characteristic of NAO indices, were discovered in the chronologies. Between 52 to 64% of growth variance was explained by regional climate, while 13 to 27% was related to monthly NAO indices. High summer temperatures in the year prior to ring formation and low winter temperatures limited beech growth at altitudes over 700 m. Oak radial growth at lower altitudes was limited by high spring temperatures in the previous year and summer drought in the year the ring was formed. Growth of both species displayed negative relationship with winter NAO indices, in the previous year for beech and in the current year for oak. Moreover, oak exhibited a negative correlation with NAO indices in the late summer of previous year. The obtained results suggest that more exhaustive research, regarding the characterization of radial growth and the analysis of its climatic response along the complete Cantabrian region, is required.

Key words: tree rings, dendrochronology, spectral analysis, climatic response, regional climate, NAO.

* Autor para la correspondencia: vrozas.cifal@siam-cma.org
Recibido: 16-06-05; Aceptado: 04-04-06.

Introducción

Las cronologías elaboradas a partir de las anchuras de los anillos de crecimiento de diversas especies arbóreas constituyen registros fiables de las condiciones climáticas pasadas y, especialmente en regiones con climas extremos y bajo condiciones limitantes, pueden ser utilizadas para la reconstrucción de parámetros climáticos. En general, estas regiones presentan un único factor climático dominante que controla el desarrollo y formación de los anillos anuales de crecimiento (Fritts, 1976). En las regiones boreales o en áreas de alta montaña, la temperatura suele ser el factor limitante para el crecimiento, mientras que en las regiones áridas o semiáridas el factor más determinante es la precipitación (Fritts, 1976; Cook y Kairiukstis, 1990).

En las regiones templadas, los efectos de la variabilidad climática sobre la productividad forestal y el crecimiento radial de las especies de frondosas caducifolias no están tan bien caracterizados como en las regiones boreales y semiáridas (Pederson *et al.*, 2004). En general, las especies de los bosques templados no presentan un patrón regular de respuesta climática, con unas bases fisiológicas y ecológicas que expliquen de forma plausible los efectos de las fluctuaciones climáticas sobre el crecimiento radial. Cada especie suele tener una respuesta propia a los factores climáticos, la cual puede variar a lo largo de gradientes ambientales y depender en gran medida de las condiciones locales y regionales (Tessier *et al.*, 1994; Dittmar *et al.*, 2003; Pederson *et al.*, 2004).

Existen diferentes procedimientos efectivos para evaluar la respuesta del crecimiento de una especie a los factores climáticos a una escala regional. De entre estos procedimientos clásicos, los dos más importantes son los siguientes: el cálculo de funciones respuesta promedio, que compendian las diferentes respuestas climáticas locales para obtener una estimación de la respuesta regional (Pilcher y Gray, 1982; Gray y Pilcher, 1983), y la utilización de datos climáticos regionales, calculados como el promedio de los registros obtenidos en estaciones meteorológicas de una región, para el análisis de las respuestas climáticas locales (Blasing *et al.*, 1981). La utilización de datos climáticos regionales promedio para el análisis de la respuesta climática, pone de manifiesto la existencia de una cierta variabilidad local, la cual puede ser evaluada (Dittmar *et al.*, 2003; Tardif *et al.*, 2003).

La investigación dendroclimática en España viene realizándose desde hace algunas décadas, estando centrada básicamente en especies de coníferas, especialmente de los géneros *Pinus* spp. y *Abies* spp. (Richter y Eckstein, 1986; Gutiérrez, 1989; Richter *et al.*, 1991; Génova Fuster y Fernández Cancio, 1998-1999; Tardif *et al.*, 2003). Algunas de estas investigaciones han permitido obtener cronologías con una señal climática suficiente como para permitir la realización de reconstrucciones climáticas (Richter y Eckstein, 1990; Creus Novau *et al.*, 1995; Fernández *et al.*, 1996). En la Cornisa Cantábrica, las frondosas caducifolias, en especial del género *Quercus* spp. y *Fagus sylvatica*, substituyen a las coníferas como especies forestales predominantes. Durante los últimos años se han realizado algunos trabajos relativos a la respuesta climática de estas especies en España (Gutiérrez, 1988; Pérez Antelo y Fernández Cancio, 1995; García González *et al.*, 1997, 1999; Rozas, 2001; García González y Eckstein, 2003; Rozas, 2005). Algunas de las cronologías realizadas han sido utilizadas para la reconstrucción de diversos parámetros climáticos (Pérez Antelo y Fernández Cancio, 1997). Incluso se ha desarrollado una metodología que permite realizar reconstrucciones climáticas masivas a partir de un banco de datos dendrocronológico (Fernández Cancio y Manrique Menéndez, 1997).

La oscilación del Atlántico Norte (North Atlantic Oscillation, NAO) constituye un importante sistema de teleconexión climática en el hemisferio norte que afecta a la temperatura, la precipitación y la circulación atmosférica sobre una amplia área geográfica que abarca gran parte del continente europeo, norte de África y este de Norte América (Hurrell, 1995; Hurrell y van Loon, 1997). El efecto más evidente del comportamiento de la NAO es una oscilación interanual en la diferencia de presión entre masas atmosféricas con centros de acción situados sobre Islandia y en latitudes subtropicales del Atlántico, la cual es más acentuada durante los meses invernales (Hurrell, 1995). En los últimos años diversos trabajos han puesto de manifiesto los efectos de la NAO sobre el crecimiento radial de los árboles en distintas regiones de Europa (Piovesan y Schirone, 2000; Mäkinen *et al.*, 2003; Macias *et al.*, 2004). Algunas de las cronologías de anchuras de anillos más sensibles a la NAO han sido utilizadas para reconstruir la variación de este patrón de circulación atmosférica a lo largo de las últimas centurias (Schmutz *et al.*, 2000; Glueck y Stockton, 2001; Cook *et al.*, 2002).

En el presente trabajo se realiza un análisis comparativo de la respuesta climática en cronologías de hayas (*Fagus sylvatica* L.) y robles (*Quercus robur* L.) de la zona central cantábrica en el norte de España. Se evaluó la respuesta del crecimiento radial de ambas especies a la temperatura y precipitación regionales, así como la señal macroclimática contenida en las cronologías, expresada en forma de índices de teleconexión climática de la NAO. La comparación de las cronologías locales y la evaluación de la respuesta climática de las mismas, permitió valorar los efectos de factores locales sobre la señal climática en el crecimiento radial de los árboles.

Material y Métodos

Datos climáticos

Los datos climáticos utilizados en este trabajo se tomaron de las estaciones meteorológicas de Gijón y Santander, ambas junto a la costa cantábrica y distantes entre sí unos 155 km (Fig. 1). De la estación de Gijón (43°30'N, 05°31'O) se dispone de un registro continuo de precipitación y temperatura que se extiende desde el año 1939 al 1998, mientras que el registro de la estación de Santander (43°27'N, 03°49'O) incluye desde el

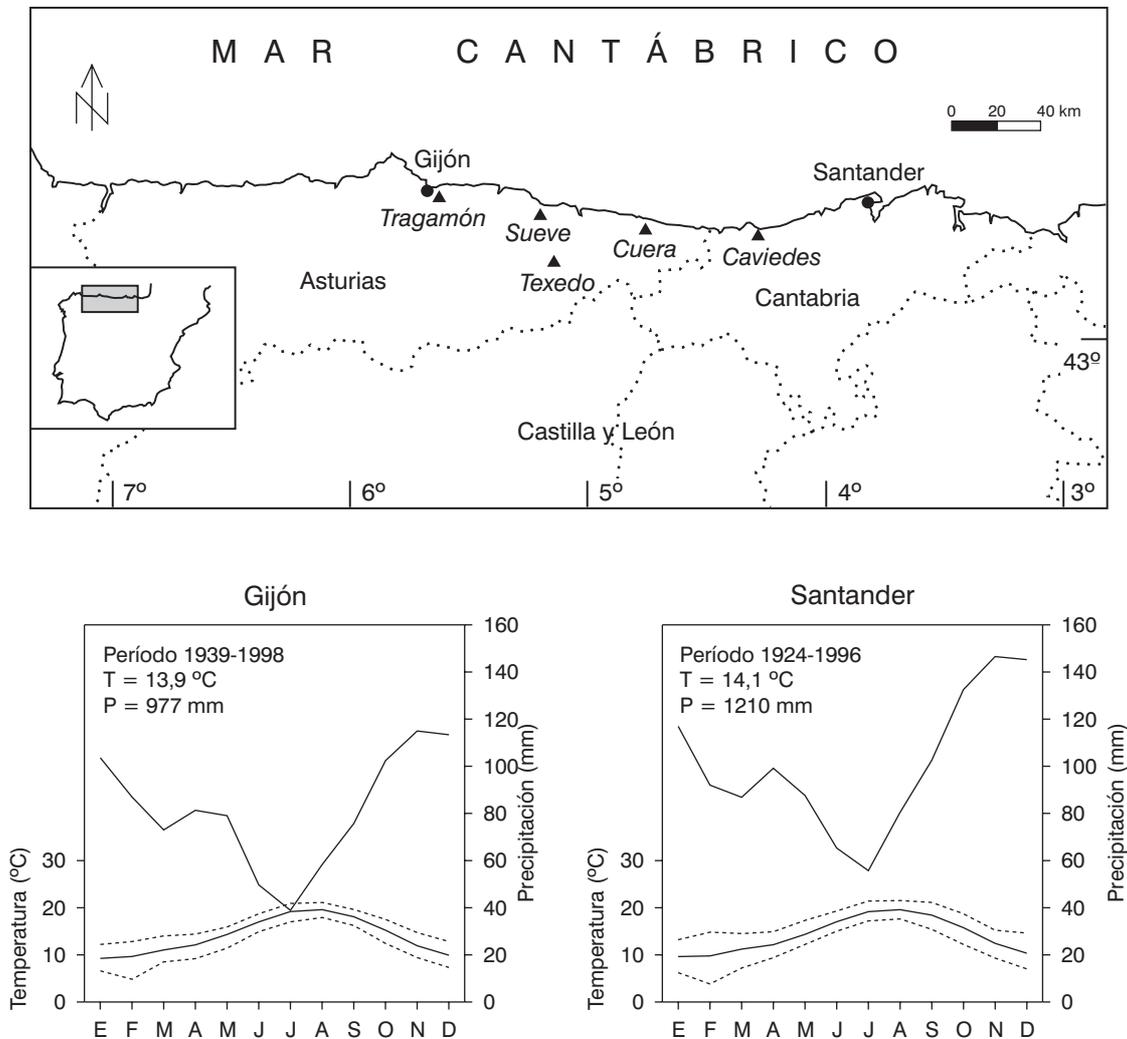


Figura 1. Mapa de localización geográfica de las estaciones meteorológicas de Gijón y Santander (puntos), y de las localidades estudiadas (triángulos) dentro de Asturias y Cantabria. Diagramas climáticos de las estaciones de Gijón y Santander. Se muestra el rango de variación de la temperatura mensual. T: temperatura media anual; P: precipitación media anual.

año 1924 al 1996. Los diagramas climáticos de las dos estaciones meteorológicas son muy similares y la temperatura media anual ronda los 14°C en ambas, mientras que la precipitación media anual de Santander es ligeramente superior a la de Gijón, de 1210 frente a 977 mm (Fig. 1). Las correlaciones entre las series mensuales de temperatura y precipitación de ambas estaciones son elevadas y altamente significativas (r varía entre 0,487 y 0,876, $p < 0,001$ en todos los casos). Estas correlaciones revelan la existencia de una homogeneidad climática a escala regional y justifican la combinación de las series mensuales para obtener un registro regional de temperatura y precipitación. La utilización de tan solo dos estaciones para la obtención de un registro climático regional se debe a la ausencia de otras estaciones de calidad en la zona, ya que muchas de ellas presentan registros incompletos y una duración insuficiente. El promediado de las series climáticas mensuales de ambas estaciones se realizó mediante el programa MET (Dendrochronology Program Library, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona). El registro regional obtenido se restringió a 1939-1996, período común para las series de ambas estaciones meteorológicas. Las series mensuales de variación del índice NAO, calculado para el período 1865-2000 a partir de los registros de presión atmosférica en superficie de las estaciones de Ponta Delgada, Azores y Stykkisholmur/Reykjavik, Islandia, fueron obtenidas de la dirección web de J. Hurrell (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html>).

Localidades de estudio

Se seleccionaron cinco localidades de estudio que cumplen los requisitos de cercanía geográfica al litoral cantábrico y presencia de rodales de árboles maduros (Fig. 1). En la zona litoral del occidente de Cantabria se seleccionó el bosque de Caviades (Valdáliga), de 120 ha de extensión, orientación noroeste y una altitud media de 140 m (43°20'N, 04°17'O). Este bosque, dominado por hayas y robles, se desarrolla sobre suelos pardos profundos, con litología de limos y areniscas del Cretácico inferior. En la zona oriental de Asturias se seleccionó una población de hayas que cubre unas 32 ha en la sierra de Cuera (Peñamellera Alta), con orientación sur y una altitud de 1080 m (43°21'N, 04°46'O). Se trata de un bosque poco denso, desarrollado sobre suelos poco profundos con substrato de calizas de mon-

taña del Carbonífero notablemente karstificadas, localizado junto a una braña usada como pasto de verano por el ganado vacuno. Otra población de hayas fue seleccionada en el monte Texedo (Parres), de unas 127 ha con orientación noreste y 750 m de altitud media (43°17'N, 05°11'O). Este bosque, originalmente compuesto por robles y hayas, está actualmente dominado por el haya debido a la tala selectiva de los robles durante décadas. Se desarrolla sobre suelos pardos de profundidad variable con litología de calizas del Carbonífero. En la sierra de Suevo (Colunga) fue seleccionada una población de robles que se extiende sobre 43 ha, con orientación sureste y una altitud media de 650 m (43°26'N, 05°13'O). En forma de rodales discontinuos y árboles aislados sobre una matriz de tojal periódicamente incendiado, esta población crece sobre suelos poco profundos y roca caliza del Carbonífero. Finalmente, en la localidad de Tragamón (Gijón) se seleccionó una población de robles de 4 ha de extensión sobre terreno casi llano y una altitud media de 40 m (43°31'N, 05°37'O). Este bosque adhesionado ha sido manejado históricamente mediante el sistema de desmochado hasta principios del siglo XX, y se desarrolla sobre un suelo pardo profundo con aportes de aluviones cuaternarios de grava y arena, sobre un substrato de dolomitas y calizas del Jurásico.

Muestreo y procesado de las muestras

En la localidad de Caviades se muestrearon árboles de ambas especies dominantes, roble y haya, mientras que en el resto de las localidades fueron muestreados árboles de una sola especie, hayas en los casos de Cuera y Texedo y robles en Suevo y Tragamón. De cada árbol seleccionado se extrajeron en dirección radial uno o dos testigos de madera de 5 mm de diámetro, a una altura de 1 a 1,5 m sobre el suelo, mediante una barrena de incremento Suunto de 40 cm. Los testigos fueron marcados en el campo con una referencia individual, protegidos en canutillos plásticos para su transporte y dejados secar al aire en el laboratorio durante al menos dos días. Una vez secos, los testigos fueron encolados sobre soportes de madera y pulidos con lijas de grano cada vez más fino hasta una óptima resolución de la anatomía del xilema en sección transversal. A partir del último anillo formado y de las secuencias características identificadas en cada localidad, se realizó una datación previa de cada una de las series de anillos de crecimiento

(Stokes y Smiley, 1968). Las series de anchuras de los anillos de crecimiento de cada muestra fueron medidas bajo lupa binocular, con una precisión de 0,01 mm, mediante una plataforma Velmex de medición de incrementos conectada a un ordenador. Los posibles errores en los procesos de datación y medición de las muestras fueron contrastados mediante métodos cuantitativos con el programa COFECHA, el cual realiza la datación cruzada de cada serie de crecimiento frente a una cronología maestra de referencia (Grissino-Mayer, 2001). Las cronologías maestras, una por cada especie y localidad, se elaboraron a partir de las series de crecimiento correctamente sincronizadas, sin problemas de cambios bruscos de la tasa de crecimiento y con una elevada correlación cruzada (r con la cronología maestra mayor que 0,50).

Elaboración de las cronologías

A partir de todas las series obtenidas, se seleccionaron aquellas que respondieron en mayor medida al patrón común para cada especie y localidad, las cuales presuntamente mostrarían una menor incidencia de perturbaciones y un mayor contenido en señal climática (r con la cronología maestra mayor que 0,40). Fueron seleccionadas para este estudio un total de 153 series de crecimiento procedentes de 125 árboles, 67 de ellos hayas y 58 robles. Todas las series seleccionadas fueron estandarizadas aplicando inicialmente un modelo lineal descendente o exponencial negativo para eliminar la tendencia debida al aumento del tamaño y la edad, y seguidamente un modelo *spline* cúbico de 53 años, el cual es adecuado para la reducción de la variación debida a perturbaciones en bosques densos, preservando la variabilidad de alta frecuencia resultante de la señal climática (Cook y Peters, 1981). Las cronologías fueron calculadas aplicando una media robusta doblemente ponderada de los residuos individuales, la cual realza aún más la señal climática mediante la eliminación de valores extremos. Finalmente se procedió al modelado autorregresivo de las cronologías para obtener cronologías residuales sin autocorrelación serial, las cuales pueden ser utilizadas en los análisis de la respuesta climática sin violar el requisito estadístico de independencia de los datos. Todo el proceso de estandarización de las series y cálculo de las cronologías se realizó mediante el programa ARSTAN (AutoRegressive STANdardization) (Cook y Holmes, 1996). Este proce-

so fue aplicado a las series obtenidas por cada localidad y especie por separado para obtener cronologías residuales locales.

La similitud existente entre todas las cronologías obtenidas fue calculada mediante análisis de correlación en el período común a todas ellas. La variación temporal en la similitud entre las cronologías locales de la misma especie fue calculada mediante correlación móvil en períodos consecutivos de 45 años desplazados un año. La presencia de componentes armónicos en las cronologías residuales, indicadores de señales periódicas que se repiten más o menos reiterativamente, fue analizada mediante el programa SPECTRUM (Schulz y Stattegger, 1997), también en el período común para todas las cronologías. Este programa utiliza un método de cálculo del espectro denominado «promediado de segmentos superpuestos de Welch» (Welch-Overlapped-Segment-Averaging, WOSA), el cual es apropiado tanto para el análisis de series formadas por observaciones irregularmente espaciadas como para series temporales totalmente regulares, como es el caso de las cronologías de índices de crecimiento radial.

Análisis de la respuesta climática

La señal climática contenida en las cronologías residuales fue evaluada usando el coeficiente de correlación de Pearson (Blasing *et al.*, 1984) y análisis de regresión múltiple sobre componentes principales de los predictores climáticos, el cual se denomina genéricamente como función respuesta (Gray *et al.*, 1981). Estos análisis se realizaron mediante el programa PRECONK versión 5.11 (H.C. Fritts, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona), el cual contrasta la significación estadística, la estabilidad de los coeficientes de regresión múltiple y la calibración-verificación del modelo mediante un procedimiento de *bootstrap* o muestreo con reemplazamiento de un elevado número de submuestras aleatorias de los propios datos (Guiot, 1990). En este trabajo se ejecutaron 1000 iteraciones aleatorias por cada análisis de las funciones de respuesta. Los análisis se efectuaron para el período 1940-1996 en el caso de los predictores climáticos regionales (temperatura y precipitación), y para el período 1900-1997 en el caso del índice de la NAO. En este trabajo se consideraron únicamente los análisis de correlación para determinar las respuestas climáticas, siendo utilizados solamente los coeficientes

r^2 de las funciones respuesta para estimar la significación estadística de las correlaciones del crecimiento radial explicada por cada predictor climático. La ventana climática considerada para los análisis se extiende desde el mes de enero del año previo a la formación del anillo de crecimiento (año t-1), hasta agosto del año en que se formó el anillo (año t). Esta ventana ha sido adoptada en base a los efectos detectados de la NAO del año t-1 sobre el crecimiento del año t, mientras que ninguna de las variables estudiadas correspondiente al mes de septiembre mostró una correlación significativa con el crecimiento.

Resultados

Caracterización de las cronologías

El número de testigos a partir de los que se elaboraron las cronologías varió entre 20 y 30, procedentes de entre 15 y 29 árboles por cronología (Tabla 1). El número de anillos analizados por cronología, para los períodos que incluyen al menos cinco testigos por año, osciló entre 2042 y 5237. La menor anchura media de los anillos analizados se registró en los testigos de haya de Caviedes con 1,29 mm, mientras que la mayor tasa de crecimiento observada correspondió a las muestras de

haya de Texedo, con una anchura media de los anillos de 3,01 mm. Los valores de sensibilidad media calculados en las cronologías residuales oscilaron entre 0,19 y 0,27. Tanto los valores de correlación media entre árboles, como el porcentaje de varianza en el primer vector propio y la relación señal-ruido fueron mayores en las cronologías de haya que en las de roble (Tabla 1), indicando que la variación interanual del crecimiento en la primera especie sería más dependiente de la señal común, supuestamente debida a la variabilidad climática, que en el caso del roble.

La simple comparación visual de las cronologías residuales permite adivinar una mejor sincronización entre las cronologías de haya que entre las de roble, con una mayor cantidad de intervalos y anillos característicos en común en el caso de la primera especie (Fig. 2). Los análisis de correlación para el período 1880-1997 indicaron que existe una correspondencia significativa para las cronologías de haya entre sí y para las cronologías de roble entre sí, independientemente de la distancia geográfica entre las mismas (Tabla 2). Únicamente se detectó una correlación significativa, entre cronologías de especies diferentes, en el caso de la cronología de haya del Cuera y la de roble de Sueve. Entre las cronologías de haya, las más similares fueron las de Cuera y Texedo, probablemente por encontrarse próximas geográficamente y ambas a una relativamente elevada

Tabla 1. Estadísticos descriptivos para los testigos y las cronologías residuales. Se muestran también los coeficientes r^2 de los modelos climáticos, junto con sus bandas de error, calculados mediante funciones respuesta para los datos termopluviométricos regionales y los índices mensuales y estacionales de la NAO. Todos los coeficientes r^2 fueron significativos al nivel $p < 0,001$. Abreviaturas como en la Fig. 2.

	FsCav	FsCue	FsTex	QrCav	QrSue	QrTra
Intervalo con al menos 5 testigos	1776-1997	1797-1998	1880-1998	1780-1997	1817-1998	1812-2000
Número de árboles / testigos	23 / 25	29 / 30	15 / 20	17 / 20	16 / 28	25 / 30
Número de anillos	5008	4278	2042	3254	4113	5237
Anchura media de los anillos (mm)	1,29	1,37	3,01	1,63	1,54	1,50
Desviación estándar	0,79	0,68	1,36	0,87	0,79	0,96
Sensibilidad media	0,23	0,22	0,25	0,21	0,27	0,19
Correlación entre árboles	0,41	0,42	0,51	0,31	0,37	0,33
Varianza en el primer vector propio (%)	44,39	44,31	54,97	38,93	38,03	37,17
Relación señal-ruido	15,77	20,62	13,42	5,28	8,09	11,53
r^2 modelo T-P regional	0,523 ± 0,125	0,641 ± 0,122	0,543 ± 0,133	0,544 ± 0,128	0,577 ± 0,122	0,638 ± 0,112
r^2 modelo NAO mensual	0,173 ± 0,084	0,193 ± 0,079	0,134 ± 0,071	0,275 ± 0,102	0,235 ± 0,090	0,152 ± 0,053
r^2 modelo NAO estacional	0,148 ± 0,083	0,116 ± 0,065	0,044 ± 0,033	0,226 ± 0,088	0,204 ± 0,084	0,133 ± 0,047

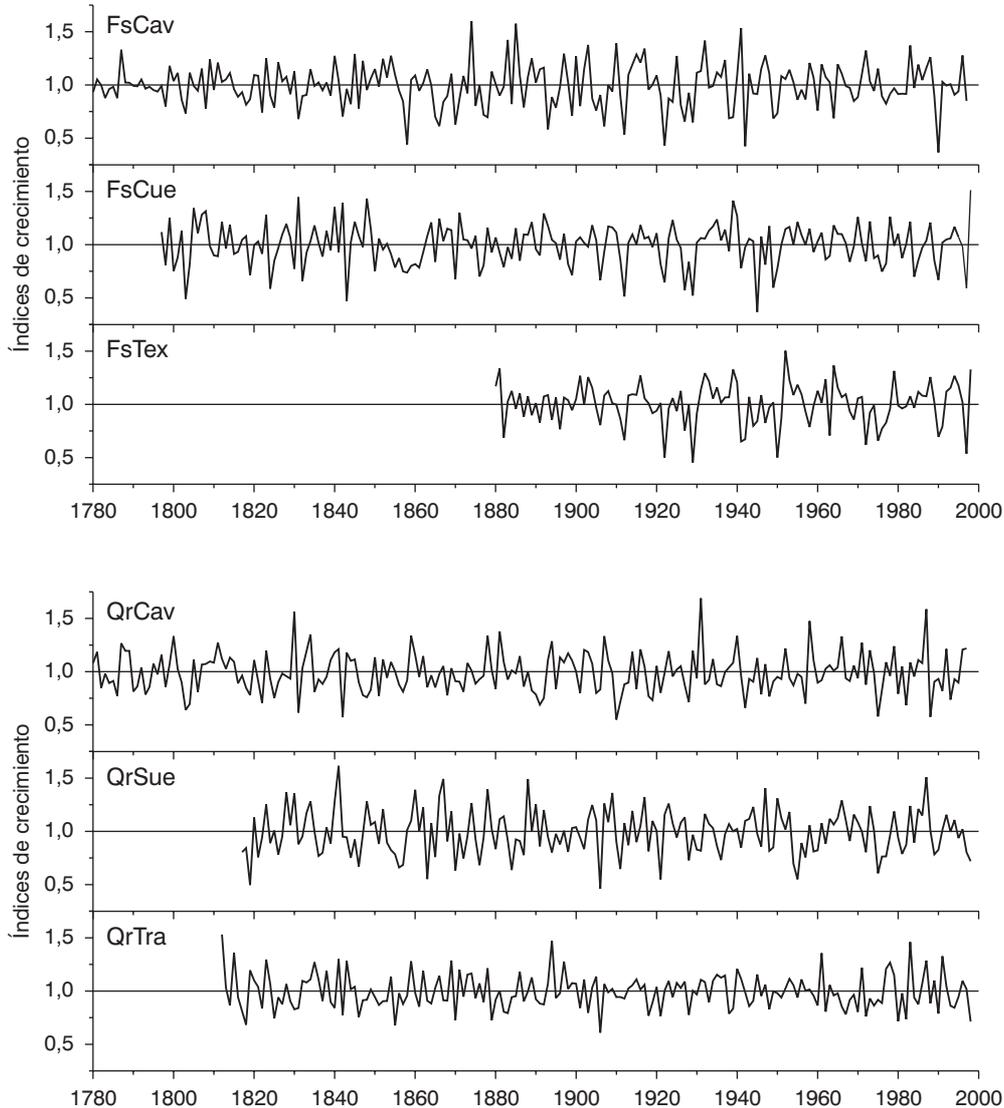


Figura 2. Cronologías residuales de índices de crecimiento de haya y roble. Sólo se muestran los períodos con un tamaño de muestra de al menos cinco testigos por año. Abreviaturas: cronologías de haya de Caviedes (FsCav), Cuera (FsCue) y Texedo (FsTex) y cronologías de roble de Caviedes (QrCav), Sueve (QrSue) y Tragamón (QrTra).

altitud. Entre las cronologías de roble, las que mostraron mayor similitud fueron las de Caviedes y Tragamón, probablemente por encontrarse ambas muy próximas a la costa y a baja altitud, a pesar de estar muy distantes geográficamente. Las cronologías de la misma especie que presentaron menor correlación fueron las de Caviedes y Texedo para el haya, y las de Sueve y Tragamón para el roble (Tabla 2).

Estas correlaciones mostraron una variación temporal significativa. La correlación entre las cronologías de

haya de Cuera y Texedo fue significativa para todo el período estudiado, mientras que la correlación de la cronología de haya de Caviedes con las otras dos solo fue significativa durante en período 1895-1940 (Fig. 3). También las cronologías de roble presentaron una correlación variable en el tiempo. Las cronologías de Caviedes y Sueve mostraron correlación significativa en 1840-1880 y a partir de 1955, las de Sueve y Tragamón solo en 1845-1870 y 1910-1930, y las de Caviedes y Tragamón en 1840-1942 y a partir de 1960 (Fig. 3).

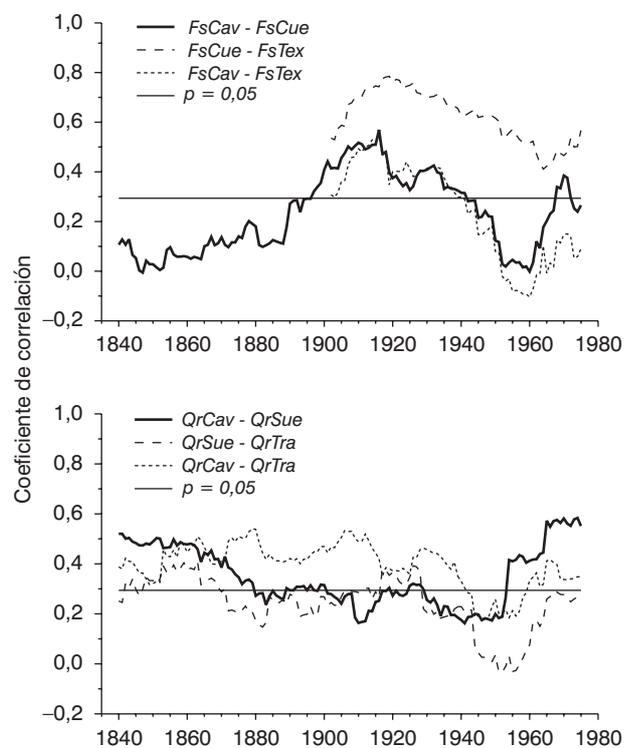
Tabla 2. Matriz de correlaciones (superior) entre las seis cronologías residuales calculadas para el período 1880-1997, y matriz de distancias (inferior, en km) en línea recta entre las localidades de muestreo. Abreviaturas como en la Fig. 2.

Cronología	FsCav	FsCue	FsTex	QrCav	QrSue	QrTra
FsCav		0,326***	0,222*	0,051	0,071	0,176
FsCue	45		0,594***	0,014	0,217*	0,120
FsTex	78	37		0,149	0,119	0,016
QrCav	0	45	78		0,329***	0,395***
QrSue	79	35	16	79		0,207*
QrTra	117	74	46	117	39	

*: $p < 0,05$; ***: $p < 0,001$.

En cuanto a los componentes espectrales analizados mediante el método WOSA, hay que destacar que, como sería de esperar en el caso de cronologías residuales en las cuales ha sido eliminada la autocorrelación serial, ninguna de las cronologías se diferenció significativamente de un proceso de ruido blanco (T_λ

varió entre 0,003 y 0,033, no superando el valor crítico 0,044 correspondiente a un nivel $\alpha = 0,05$, prueba de Siegel) (Schulz y Stattegger, 1997). Sin embargo, en los espectros armónicos para el período 1880-1997 fueron detectadas ciertas señales periódicas significativas ($p < 0,05$), algunas de las cuales se repitieron en las diferentes cronologías (Fig. 4). Por ejemplo, en las cronologías de haya de Cuera y Texedo, y en las de roble de Sueve y Tragamón, se detectó una señal de baja frecuencia para períodos de 20,4-30,1 años, la cual no fue evidenciada en las cronologías de Caviedes. En todas las cronologías, salvo en la de Tragamón, se observaron señales significativas para períodos de 6,6-9,0 años. También en todas, salvo en la de Texedo, se observaron señales para períodos de 3,7-5,7 años, mientras que en todas ellas existe una señal de alta frecuencia, correspondiente a un período de 2,2-3,0 años (Fig. 4).

**Figura 3.** Correlaciones móviles de 45 años de amplitud entre las cronologías residuales locales de la misma especie. Las correlaciones por encima de la línea horizontal son significativas ($p < 0,05$). Abreviaturas como en la Fig. 2.

Respuesta a los predictores climáticos regionales

Los resultados obtenidos en los análisis de correlación entre las cronologías regionales y los parámetros climáticos regionales pusieron de manifiesto la existencia de una notable heterogeneidad en el patrón de respuesta climática de ambas especies, probablemente como consecuencia de un relevante componente local en el control de la dinámica del crecimiento radial. Sin embargo, la proporción de variabilidad de las cronologías residuales explicada por los modelos climáticos fue relativamente elevada, entre 52,3 y 64,1% (valores de r^2 en Tabla 1), indicando que todas las cronologías mostraron una notable sensibilidad a las fluctuaciones climáticas regionales. En el caso del haya, se puso de

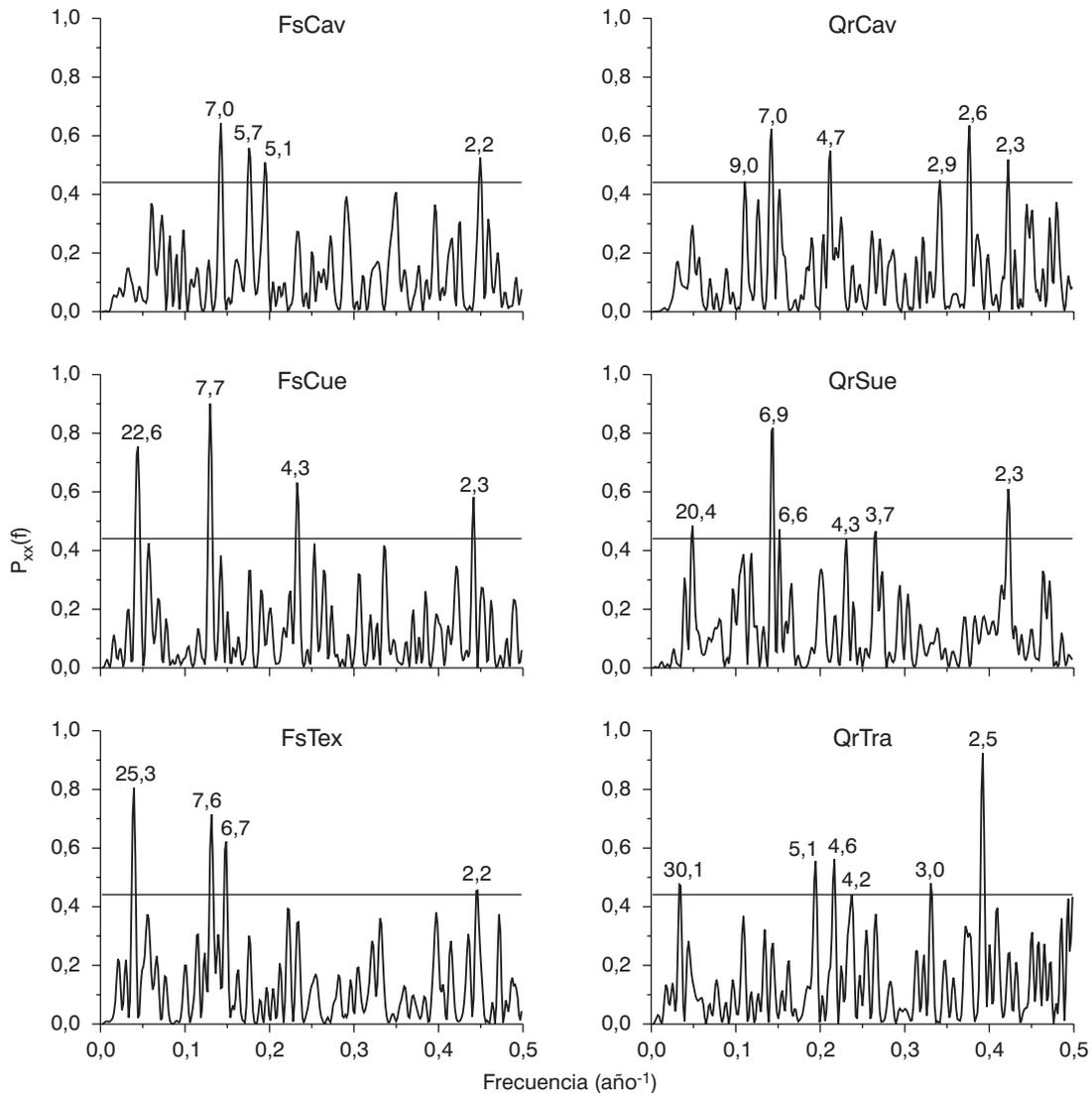


Figura 4. Análisis espectral armónico de las cronologías residuales locales de haya y roble para el período 1880-1997. Los números sobre los picos indican los años en que se han encontrado señales periódicas significativas ($p < 0,05$). Abreviaturas como en la Fig. 2.

manifiesto un efecto negativo de las elevadas temperaturas en el verano del año previo al crecimiento, especialmente en los meses de julio y agosto, expresado en las cronologías de Cuera y Texedo (Tabla 3). Estas mismas cronologías mostraron una correlación positiva con las temperaturas del invierno previo al crecimiento, durante los meses de diciembre y enero. Un efecto negativo de las temperaturas en el mes de mayo del año en que se formó el anillo se evidenció solo para las cronologías de haya de Caviedes y Texedo, mientras que el

efecto negativo de las temperaturas en julio del año en que se formó el anillo se puso de manifiesto solamente para la cronología de Cuera.

En el caso de las cronologías de roble, el efecto negativo de las temperaturas de la primavera del año anterior a la formación del anillo, en los meses de abril y mayo, se pusieron en evidencia para Caviedes y Tragamón (Tabla 3). Los efectos negativos de las temperaturas invernal (diciembre y enero) y estival (junio) previas al crecimiento del roble se evidenció solamente en

Tabla 3. Correlaciones entre las cronologías residuales y la temperatura y precipitación mensuales, calculadas para el período 1940-1996. Sólo se muestran las correlaciones significativas. Abreviaturas como en la Fig. 2.

	Temperatura						Precipitación					
	FsCav	FsCue	FsTex	QrCav	QrSue	QrTra	FsCav	FsCue	FsTex	QrCav	QrSue	QrTra
Año t-1												
Abril				-0,380**		-0,266*						
Mayo				-0,292*					-0,287*			
Junio								0,285*				
Julio		-0,281*	-0,315*									
Agosto		-0,359**										
Noviembre									-0,307*			
Diciembre			0,346**			-0,262*						
Año t												
Enero		0,269*				-0,419**						
Febrero							0,270*					
Abril					0,283*							
Mayo	-0,331*		-0,249*									
Junio						-0,262*			0,279*		0,376**	
Julio		-0,249*							0,268*		0,339*	
Agosto							0,262*					

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$.

el caso de Tragamón, mientras que solo en Suevo se puso de manifiesto un efecto positivo de las temperaturas primaverales, en el mes de abril del año en que se produjo el crecimiento.

Los efectos de la precipitación sobre el crecimiento del haya no fueron coincidentes entre ninguna de las cronologías estudiadas. En el caso de Caviedes se produjo una respuesta positiva a la precipitación en febrero y agosto del año en que produjo el crecimiento, en Cuera solo se detectó un efecto positivo de la precipitación en junio del año previo al crecimiento, y en Tixedo se observó una respuesta negativa a la precipitación en mayo y noviembre del año previo al crecimiento (Tabla 3). En cuanto a la respuesta del roble a la precipitación, esta fue idéntica para las cronologías de Caviedes y Tragamón, con un efecto positivo en junio y julio del año de crecimiento, mientras que en Suevo no se observó efecto alguno de la precipitación regional.

Respuesta a los índices de la NAO

Los análisis de la relación entre el crecimiento radial y los índices mensuales de la NAO revelaron también un importante componente local en la respuesta a este indicador de teleconexión climática, aunque pusieron

de manifiesto una clara respuesta diferencial propia de cada especie. Los modelos de la función de respuesta climática en el caso de los índices NAO mensuales explicaron menos variabilidad de las cronologías regionales que en el caso de la respuesta a la temperatura y precipitación regionales, con porcentajes que variaron entre 13,4 y 27,5% (valores de r^2 en Tabla 4). En el caso del haya, para todas las cronologías se obtuvieron correlaciones negativas significativas con los índices NAO invernales, en especial de los meses de enero, febrero y marzo del año previo al crecimiento y, solo en el caso de la cronología de Cuera, de febrero del año en que se produjo el crecimiento (Tabla 4). En el caso del roble, tanto en la cronología de Caviedes como en la de Tragamón se obtuvieron correlaciones negativas significativas con el índice NAO de septiembre del año previo al crecimiento. Además, en el caso de la cronología de Caviedes se obtuvo una correlación negativa con el índice NAO de enero del año de crecimiento. La cronología de Suevo únicamente mostró una relación positiva con el índice NAO de abril del año previo al crecimiento (Tabla 4).

Cuando se calcularon las correlaciones con los índices NAO estacionales, promediados en intervalos de tres meses consecutivos, se obtuvo un patrón de respuesta de las cronologías residuales similar al previa-

Tabla 4. Correlaciones entre las cronologías residuales y los índices NAO mensuales, calculadas para el período 1900-1997. Sólo se muestran las correlaciones significativas. Abreviaturas como en la Fig. 2.

	FsCav	FsCue	FsTex	QrCav	QrSue	QrTra
Año t-1						
Enero		-0,219*				
Febrero		-0,194*	-0,195*			
Marzo	-0,263**					
Abril					0,338***	
Septiembre				-0,306**		-0,209*
Año t						
Enero				-0,320**		
Febrero		-0,197*				

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$.

mente descrito, con ligeras modificaciones. Para las cronologías de haya de Caviedes y Cuera se obtuvo una correlación negativa con el índice NAO de enero-febrero-marzo del año previo al crecimiento, mientras que no hubo una relación significativa de la cronología de Texedo con ninguno de los índices estacionales (Tabla 5). Las cronologías de roble de Caviedes y Sueve presentaron una correlación negativa con el índice NAO de julio-agosto-septiembre del año previo al crecimiento. Además, la cronología de Caviedes mostró correlación negativa con el índice de enero-febrero-marzo del año en que se produjo el crecimiento, mientras que la de Sueve mostró correlación positiva con el índice de abril-mayo-junio del año previo al crecimiento (Tabla 5). Finalmente, la cronología de roble de Tragamón solo presentó una correlación negativa

con el índice NAO de febrero-marzo-abril del año en que se produjo el crecimiento.

Discusión

Los estadísticos descriptivos de las seis cronologías presentadas en este artículo son comparables a los de las mismas especies en otras regiones ibéricas y europeas (Gutiérrez, 1988; Pérez Antelo y Fernández Cancio, 1995; Biondi y Visani, 1996; Pérez Antelo y Fernández Cancio, 1997; García González *et al.*, 1999; Dittmar *et al.*, 2003). Los árboles estudiados no mostraron cambios apreciables en la variabilidad interanual de la anchura de los anillos al aumentar el estrés ambiental, como sería de esperar por ejemplo en las poblacio-

Tabla 5. Correlaciones entre las cronologías residuales y los índices NAO estacionales, promediados en intervalos de tres meses consecutivos, calculadas para el período 1900-1997. Sólo se muestran las correlaciones significativas. Abreviaturas como en la Fig. 2

	FsCav	FsCue	FsTex	QrCav	QrSue	QrTra
Año t-1						
Ene-Feb-Mar	-0,280**	-0,252*				
Abr-May-Jun					0,214*	
Jul-Ago-Sep				-0,278**	-0,216*	
Año t						
Ene-Feb-Mar				-0,230*		
Feb-Mar-Abr						-0,219*

*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$.

nes que se desarrollan sobre litosuelos (Cuera, Sueve). Los valores de sensibilidad media obtenidos son comparables en todas las cronologías, lo que indica una variabilidad interanual similar entre especies y localidades. Tanto la anchura media de los anillos como su desviación estándar para las muestras tomadas en Texedo son especialmente elevadas, probablemente debido a que las hayas de esta localidad son más jóvenes que el resto de los árboles muestreados en otras localidades y se encuentran en una fase de su ciclo de vida en que muestran mayores tasas de crecimiento. Las poblaciones de haya muestran una mejor sincronización entre los patrones de crecimiento radial de los distintos individuos. Esta sincronización entre series individuales fue expresada como una correlación entre árboles, varianza en el primer vector propio y relación señal-ruido mayores que en las cronologías de roble. Sin embargo, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de variabilidad habitual para el haya (Gutiérrez, 1988; Dittmar *et al.*, 2003; Piovesan *et al.*, 2003), y en ambas especies los valores de correlación entre árboles se encuentran dentro del rango de variabilidad esperado para frondosas caducifolias (Pederson *et al.*, 2004).

Las correlaciones entre cronologías evidencian una notable similitud en los patrones de variabilidad del crecimiento a dos niveles principales. Por un lado al nivel de especie, ya que todas las cronologías de la misma especie están significativamente correlacionadas. Por otro lado entre altitudes, ya que las correlaciones mayores y más prolongadas en el tiempo se obtuvieron entre cronologías de altitudes comparables: Cuera y Texedo en el caso del haya, Caviedes y Tragamón en el caso del roble. Evidentemente, la proximidad geográfica ha podido determinar también en buena medida la correlación entre las cronologías de Cuera y Texedo, considerablemente elevada y constante en el tiempo. No es este el caso de las cronologías de roble de Caviedes y Tragamón, ya que estas son las que se encuentran más alejadas entre sí. A la luz de resultados previamente obtenidos, la combinación altitud-orientación podría ser un importante factor de control de los patrones de crecimiento radial y la respuesta climática, al menos en el haya (Gutiérrez, 1988; Dittmar *et al.*, 2003). En cualquier caso, el análisis de tan solo tres cronologías de cada especie no es suficiente para estimar en qué medida la distancia geográfica, la altitud o la orientación han determinado los patrones de crecimiento de ambas especies en la Cornisa Cantábrica. Para caracterizar los patrones de variabilidad del crecimiento a lo largo de

una determinada región, sería necesario realizar una completa red de cronologías y comprobar el grado de similitud entre todas ellas mediante análisis multivariante, prestando atención a la correspondencia de cada grupo de cronologías con determinados parámetros ambientales (Biondi y Visani, 1996; Tardif *et al.*, 2003; Macias *et al.*, 2004).

Según los resultados obtenidos mediante el análisis espectral armónico, es clara la presencia de una periodicidad de baja frecuencia en las cronologías de Asturias, de entre 20,4 y 30,1 años, la cual no se encuentra en las cronologías de Caviedes. Una variación periódica de baja frecuencia, del orden de entre 20,9 y 29,3 años ha sido descrita para una reconstrucción de índices de la NAO de más de 500 años (Glueck y Stockton, 2001). De igual modo, las variaciones de 6,6-9,0 años y 2,2-3,0 años, se corresponderían con señales de frecuencia intermedia y alta, detectadas en diferentes reconstrucciones de los índices de la NAO, de 7,75, 6,5 y 2,04-2,7 años (Glueck y Stockton, 2001; Cook *et al.*, 2002). Sin embargo, las señales periódicas detectadas próximas a 2-3 años, podrían ser indistinguibles del azar, ya que la señal interanual de alta frecuencia puede generar un falso pico significativo en el periodograma que no estaría relacionado con efectos climáticos, si no con causas fisiológicas. Las variaciones de 3,7-5,7 años detectadas en la mayoría de las cronologías podrían corresponderse con un notable pico de varianza a unos 3,97 años, observado en una reconstrucción de 600 años de longitud del índice NAO realizada recientemente (Cook *et al.*, 2002).

A pesar de las correspondencias observadas entre los componentes armónicos de las cronologías residuales de roble y haya y las reconstrucciones de índices de la NAO, los análisis de función de respuesta revelaron que la proporción de varianza explicada por los factores climáticos regionales (temperatura y precipitación: entre 52,3 y 64,1%) fue mayor que la explicada por los índices de teleconexión climática (índices mensuales de la NAO: entre 13,4 y 27,5%; índices estacionales de la NAO: entre 4,4 y 22,6%). Ya que la variación de parámetros climáticos locales está determinada en buena medida por la variación de los índices de la NAO (Hurrell, 1995; Hurrell y van Loon, 1997), es de suponer que la variabilidad periódica detectada en las cronologías estaría relacionada tanto con la señal climática local como con el índice de la NAO.

Los parámetros regionales más limitantes para el crecimiento del haya a altitudes por encima de los 700

m, parecen ser las elevadas temperaturas estivales del año previo al crecimiento (julio, agosto) y las bajas temperaturas invernales (diciembre, enero). La relación negativa con la temperatura en julio y agosto del año previo ha sido anteriormente documentada para Europa central y occidental (Gutiérrez, 1988; Dittmar *et al.*, 2003), lo cual indicaría que el estrés hídrico estival puede causar una disminución en la reserva de carbohidratos que afectaría de forma negativa al crecimiento en la estación siguiente. La relación positiva con la temperatura en diciembre o enero se ha observado también en altitudes elevadas de Europa central y en las montañas de Europa occidental y mediterránea (Gutiérrez, 1988; Biondi, 1993; Dittmar *et al.*, 2003), indicando una sensibilidad del haya a los fríos invernales extremos en áreas de montaña.

La relación negativa del crecimiento del haya con la temperatura durante el mes de mayo, estaría relacionada con una sensibilidad del crecimiento a las elevadas temperaturas primaverales en Caviedes y Texedo, en un período en que esta especie está desarrollando sus brotes. Un eventual estrés hídrico debido a las elevadas temperaturas estivales (Piovesan y Schirone, 2000), en la población de haya del Cuera desarrollada sobre litosuelos calizos, explicaría la relación negativa entre el crecimiento y la temperatura de julio, ya que este mes es el menos lluvioso y uno de los más cálidos en el área de estudio (Fig. 1). En los casos de Caviedes en agosto del año en que se produjo el crecimiento y Cuera en junio del año previo al crecimiento, la precipitación estival parece haber tenido un efecto significativo sobre el crecimiento del haya. La precipitación estival se ha manifestado como un importante factor que promueve el crecimiento radial del haya en localidades mediterráneas y a baja altitud en Europa central (Gutiérrez, 1988; Biondi, 1993; Piovesan y Schirone, 2000; Dittmar *et al.*, 2003).

En las localidades de baja altitud, Caviedes y Tragamón, las elevadas temperaturas de primavera del año previo a la formación del anillo, durante los meses de abril y mayo, han manifestado una relación inversa con el crecimiento del roble. Esta relación no ha sido descrita previamente en otros trabajos, ya que no suelen ser analizadas las relaciones del crecimiento con el clima para meses anteriores a junio del año previo al crecimiento. Su interpretación podría estar relacionada con la necesidad de temperaturas moderadas en el momento en que los brotes nuevos se están desarrollando. Sin embargo, el efecto negativo de la temperatura invernal

sobre el crecimiento del roble, durante los meses de diciembre y enero, observado en Tragamón, ha sido ampliamente constatado en diversas localidades de Europa occidental (Hughes *et al.*, 1978; Gray *et al.*, 1981; Pilcher y Gray, 1982; Gray y Pilcher, 1983). Sin embargo, en especies de robles y otras frondosas caducifolias de Norteamérica, la relación entre las temperaturas invernales y el crecimiento suele ser positiva como consecuencia de que la elevación de la temperatura disminuye el daño que las intensas nevadas infligen al sistema radicular (Rubino y McCarthy, 2000; Tardif *et al.*, 2001; Pederson *et al.*, 2004). La relación inversa entre temperatura invernal y crecimiento del roble en Europa occidental ha sido interpretada como el resultado de la activación del metabolismo debido a las altas temperaturas en una época en que el árbol no puede suplir la pérdida de carbohidratos, ya que no dispone de hojas para fotosintetizar, comprometiendo el crecimiento durante la siguiente estación activa (Pilcher y Gray, 1982).

La precipitación estival, especialmente en junio y julio, favoreció el crecimiento de los robles en Caviedes y Tragamón. Este efecto positivo de la precipitación estival es un rasgo general de la respuesta climática del roble en Europa. En localidades de Europa central, occidental y mediterránea, el crecimiento radial del roble muestra esta relación positiva con la precipitación estival (Gray *et al.*, 1981; Pilcher y Gray, 1982; Gray y Pilcher, 1983; Bednarz y Ptak, 1990; Santini *et al.*, 1994; Tessier *et al.*, 1994; García González *et al.*, 1997; Rozas, 2001, 2005). La lluvia estival permite la prolongación de la estación de crecimiento hasta el final del verano, produciendo más leño tardío y por lo tanto anillos más anchos (García González y Eckstein, 2003).

Los índices NAO en enero, febrero y marzo del año previo a la formación del anillo guardan una relación negativa con el crecimiento radial del haya. Una relación negativa con el índice NAO de los meses invernales ha sido evidenciada para una población de haya en los Apeninos centrales (Piovesan y Schirone, 2000) y en poblaciones escandinavas de *Picea abies* (Mäkinen *et al.*, 2003). Sin embargo, en algunas poblaciones nórdicas de *Pinus sylvestris* se ha encontrado una relación positiva entre el crecimiento radial y los índices NAO de invierno (Macias *et al.*, 2004). En las cronologías de roble de Caviedes y Tragamón se descubrió también una relación negativa entre el crecimiento y los índices NAO invernales del mismo año en que formó en anillo. Además, las cronologías de roble mostraron un efecto

negativo del índice NAO de final del verano (julio, agosto, septiembre), lo contrario que sucede con algunas poblaciones nórdicas de *P. sylvestris* que muestran una relación positiva (Macías *et al.*, 2004). La interpretación fisiológica de estos resultados dista aún de ser desentrañada. Puede que, ya que la NAO condiciona en gran medida la temperatura y la precipitación de amplias regiones de Europa, se trate de un efecto indirecto del índice NAO sobre el crecimiento a través de la modulación de los parámetros climáticos regionales. Más concretamente, el hecho de que la NAO guarde una relación directa con la precipitación en el norte de Europa e inversa en el sur (Hurrell, 1995), podría ser una explicación de la respuesta opuesta que el crecimiento radial presenta a diferentes latitudes respecto a los índices de la NAO. En todo caso, los resultados aquí obtenidos son preliminares y sugieren la necesidad de realizar investigaciones más extensas y exhaustivas sobre la caracterización del crecimiento radial y su respuesta climática para las especies forestales dominantes a lo largo de la Cornisa Cantábrica.

Agradecimientos

Miguel Ángel Álvarez, Pilar Álvarez-Uría, Cecilia Díaz y Carlos LeQuesne participaron en la realización de los muestreos y Cecilia Díaz colaboró en el procesado y análisis de las muestras. Esta investigación fue parcialmente financiada por la FICYT (PP-REC98-04) y la Consejería de Medio Ambiente del Principado de Asturias (SV-PA-00-01). El autor desarrolló el presente artículo gracias a un contrato postdoctoral INIA-Xunta de Galicia.

Referencias bibliográficas

- BEDNARZ Z., PTAK J., 1990. The influence of temperature and precipitation on ring widths of oak (*Quercus robur* L.) in the Niepolomice forest near Cracow, Southern Poland. *Tree-Ring Bull* 50, 1-10.
- BIONDI F., 1993. Climatic signals in tree rings of *Fagus sylvatica* L. from the central Apennines, Italy. *Acta Oecol* 14, 57-71.
- BIONDI F., VISANI S., 1996. Recent developments in the analysis of an Italian tree-ring network with emphasis on European beech (*Fagus sylvatica* L.). En: *Tree Rings, Environment and Humanity*. Dean J.S., Meko D.M., Swetnam T.W., eds. University of Arizona, Tucson. Radiocarbon, pp. 713-725.
- BLASING T.J., DUVICK D.N., WEST D.C., 1981. Dendroclimatic calibration and verification using regionally averaged and single station precipitation data. *Tree-Ring Bull* 41, 37-43.
- BLASING T.J., SOLOMON A.M., DUVICK D.N., 1984. Response functions revisited. *Tree-Ring Bull* 44, 1-15.
- COOK E.R., D'ARRIGO R.D., MANN M.E., 2002. A well-verified, multiproxy reconstruction of the winter North Atlantic oscillation index since A.D. 1400. *J Clim* 15, 1754-1764.
- COOK E.R., HOLMES R.L., 1996. Guide for computer program ARSTAN. En: *The International Tree-Ring Data Bank Program Library Version 20 User's Manual*. Grissino-Mayer H.D., Holmes R.L., Fritts H.C., eds. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, pp. 75-87.
- COOK E.R., PETERS K., 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bull* 41, 45-53.
- COOK E., KAIRIUKSTIS L., 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- CREUS NOVAU J., BEORLEGUI ZOZAYA M., FERNÁNDEZ CANCIO A., 1995. Cambio climático en Galicia: reconstrucción climática de las últimas centurias, estudio dendrocronológico. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela.
- 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. *For Ecol Manage* 173, 63-78.
- FERNÁNDEZ A., GÉNOVA M., CREUS J., GUTIÉRREZ E., 1996. Dendroclimatological investigation covering the last 300 years in central Spain. En: *Tree Rings, Environment and Humanity*. Dean J.S., Meko D.M., Swetnam T.W., eds. University of Arizona, Tucson. Radiocarbon, pp. 181-190.
- FERNÁNDEZ CANCIO A., MANRIQUE MENÉNDEZ E., 1997. Nueva metodología para la reconstrucción dendroclimática y aplicaciones más importantes. Fernández Cancio A., ed. Madrid.
- FRITTS H., 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London.
- GARCÍA GONZÁLEZ I., DÍAZ VIZCAÍNO E.A., MARTÍNEZ CORTIZAS A., 1997. Evidence for a common and a species-specific climatic response of oak and birch on a northern Galician site (NW Spain) by means of multivariate procedures. *Dendrochronologia* 15, 119-127.
- GARCÍA GONZÁLEZ I., DÍAZ VIZCAÍNO E.A., MARTÍNEZ CORTIZAS A., 1999. Dendrochronological analysis of oak (*Quercus robur* L., Fagaceae) in the Serra da Carba (Galicia, NW Spain): an application of cluster analysis. *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)* 9, 171-177.
- GARCÍA GONZÁLEZ I., ECKSTEIN D., 2003. Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiol* 23, 497-504.

- GÉNOVA FUSTER M., FERNÁNDEZ CANCIO A., 1998-1999. Tree rings and climate of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* in central Spain. *Dendrochronologia* 16-17, 75-85.
- GLUECK M.F., STOCKTON C.W., 2001. Reconstruction of the North Atlantic oscillation. *Int J Climatol* 21, 1453-1465.
- GRAY B.M., PILCHER J.R., 1983. Testing the significance of summary response functions. *Tree-Ring Bull* 43, 31-38.
- GRAY B.M., WIGLEY T.M.L., PILCHER J.R., 1981. Statistical significance and reproducibility of tree-ring response functions. *Tree-Ring Bull* 41, 21-35.
- GRISSINO-MAYER H.D., 2001. Assessing crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res* 57, 205-221.
- GUIOT J., 1990. Methods of calibration. En: *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Cook E., Kairiukstis L., eds. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 165-178.
- GUTIÉRREZ E., 1988. Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). *Acta Oecol/Oecol Plant* 9, 301-309.
- GUTIÉRREZ E., 1989. Dendroclimatological study of *Pinus sylvestris* L. in southern Catalonia (Spain). *Tree-Ring Bull* 49, 1-9.
- HUGHES M.K., GRAY B., PILCHER J., BAILLIE M., LEGGETT P., 1978. Climatic signals in British Isles tree-ring chronologies. *Nature* 272, 605-606.
- HURRELL J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science* 269, 676-679.
- HURRELL J.W., VAN LOON H., 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Clim Change* 36, 301-326.
- MACIAS M., TIMONEN M., KIRCHHEFER A.J., LINDHOLM M., ERONEN M., GUTIÉRREZ E., 2004. Growth variability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) along a west-east gradient across northern Fennoscandia: a dendroclimatic approach. *Arct Antarct Alpine Res* 36, 565-574.
- MÄKINEN H., NÖJD P., KAHLE H.-P., NEUMANN U., TVEITE B., MIELIKÄINEN K., RÖHLE H., SPIECKER H., 2003. Large-scale climatic variability and radial increment variation of *Picea abies* (L.) Karst. in central and northern Europe. *Trees* 17, 173-184.
- PEDERSON N., COOK E.R., JACOBY G.C., PETEET D.M., GRIFFIN K.L., 2004. The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern range margin tree species. *Dendrochronologia* 22, 7-29.
- PÉREZ ANTELO A., FERNÁNDEZ CANCIO A., 1995. Dendrocronologías de las sierras orientales gallegas: los Ancares y el Courel (España). *Invest Agrar: Sist Recur For* 4, 5-31.
- PÉREZ ANTELO A., FERNÁNDEZ CANCIO A., 1997. Reconstrucciones dendroclimatológicas de Galicia (España) desde finales del siglo XVIII. *Invest Agrar: Sist Recur For* 6, 17-37.
- PILCHER J.R., GRAY B., 1982. The relationships between oak tree growth and climate in Britain. *J Ecol* 70, 297-304.
- PIOVESAN G., SCHIRONE B., 2000. Winter North Atlantic oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *Int J Biometeorol* 44, 121-127.
- 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, 13-22.
- RICHTER K., ECKSTEIN D., 1986. Estudio dendrocronológico en España. *Dendrochronologia* 4, 59-74.
- RICHTER K., ECKSTEIN D., 1990. A proxy summer rainfall record for southeast Spain derived from living and historic pine trees. *Dendrochronologia* 8, 67-82.
- RICHTER K., ECKSTEIN D., HOLMES R.L., 1991. The dendrochronological signal of pine trees (*Pinus* spp.) in Spain. *Tree-Ring Bull* 51, 1-13.
- 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. *Ann For Sci* 58, 237-251.
- ROZAS V., 2005. Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. *Ann For Sci* 62, 209-218.
- RUBINO D.L., MCCARTHY B.C., 2000. Dendroclimatological analysis of white oak (*Quercus alba* L., Fagaceae) from an old-growth forest of southeastern Ohio, USA. *J Torrey Bot Soc* 127, 240-250.
- SANTINI A., BOTTACCI A., GELLINI R., 1994. Preliminary dendroecological survey on pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in Tuscany (Italy). *Ann Sci For* 51, 1-10.
- SCHMUTZ C., LUTERBACHER J., GYALISTRAS D., XOPLAKI E., WANNER H., 2000. Can we trust proxy-based NAO index reconstructions? *Geophys Res Lett* 27, 1135-1138.
- SCHULZ M., STATTEGGER K., 1997. SPECTRUM: spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series. *Comput Geosci* 23, 929-945.
- STOKES M.A., SMILEY T.L., 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago.
- TARDIF J., BRISSON J., BERGERON Y., 2001. Dendroclimatic analysis of *Acer saccharum*, *Fagus grandifolia*, and *Tsuga canadensis* from an old-growth forest, southern Quebec. *Can J For Res* 31, 1491-1501.
- TARDIF J., CAMARERO J.J., RIBAS M., GUTIÉRREZ E., 2003. Spatiotemporal variability in tree growth in the central Pyrenees: climatic and site influences. *Ecol Monogr* 73, 241-257.
- TESSIER L., NOLA P., SERRE-BACHET F., 1994. Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region: tree-ring/climate relationships. *New Phytol* 126, 355-367.