



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-028

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Métodos dendroclimatológicos en bosques de *Pinus pinea* L. en España: estandarización de series de anchura de anillos y validación de datos climáticos

NATALINI, F.¹, ALEJANO MONGE¹, M. y VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.¹

¹ Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, Campus de La Rábida, 21819 Palos de la Frontera, Huelva

Resumen

Los efectos del clima en el crecimiento forestal se pueden estudiar mediante los métodos dendroclimatológicos. Éstos aplican curvas ajustadas a las cronologías de anillos de crecimiento de los árboles para eliminar la varianza no climática. Curvas con diferente flexibilidad extraen diferentes señales climáticas según el dominio de frecuencias de las cronologías. Además, la interpretación de la señal extraída es influenciada por los datos climáticos utilizados. En este trabajo se han evaluado curvas spline con diversas longitudes de onda ajustadas a cronologías de pino piñonero en España. Se calcularon las correlaciones con datos climáticos (temperaturas, precipitación, índice de sequía de Palmer - PDSI - y variación de temperatura diurna - DTR) de estaciones meteorológicas y cuadrículas. Splines con longitud de 30 años retuvieron la señal climática y eliminaron el ruido debido a oscilaciones de crecimiento causadas por clareos y claras. PDSI y DTR están relacionados con la señal dendroclimática, aunque precipitación y temperaturas explican satisfactoriamente la respuesta del crecimiento. Sin embargo, se encontraron incertidumbres respecto a los datos de las estaciones meteorológicas, debidas a diferencias en altitud entre estación y sitio de estudio o a la inestable calidad de los registros meteorológicos. Los datos de cuadrícula permitieron un análisis más robusto en los sitios de estudio.

Palabras clave

Dendroclimatología, Detrending, Relaciones clima-crecimiento, Incertidumbres

1. Introducción

A través de la información almacenada en los anillos de crecimiento anual de las especies leñosas, se pueden estudiar procesos y dinámicas medioambientales. El crecimiento diametral de los árboles es influenciado por distintos factores (Cook & Briffa, 1990), por tanto la extracción de la información sobre uno de estos factores a partir de una serie de anillos requiere la retención de la varianza relacionada a ese factor y la eliminación de la varianza relacionada a otros factores. La varianza en el crecimiento de los anillos relacionada con el clima es la señal de interés en la dendroclimatología, y se extrae mediante un procedimiento de estandarización que incluye tres pasos: (1) "detrending", es decir la eliminación de las tendencias de crecimiento no relacionadas con el clima y debidas a otros factores (p. ej. la edad de los pies); (2) la computación de índices de crecimiento anual; (3) computación de una cronología media que contiene la señal climática común entre las series dendrocronológicas de árboles individuales (Cook & Briffa, 1990). El detrending se realiza típicamente mediante curvas ajustadas a las cronologías de anchura de anillos, y la selección de una curva apropiada es de gran importancia en la dendroclimatología. Curvas de detrending con distintos grados de flexibilidad enfatizan la señal climática y elimina la señal no climática en diferentes frecuencias, y su aplicabilidad depende del dominio de frecuencia de las series de anchura de anillo (Helama et al., 2004).

La interpretación de la señal climática extraída de las series dendrocronológicas se realiza estudiando las relaciones entre las series medias de anillos estandarizadas y variables climáticas

(Fritts, 1976; Cook & Briffa, 1990). Sin embargo la varianza de las series dendrocronológicas explicada por el clima puede variar según las variables climáticas utilizadas, porque la sensibilidad del crecimiento a distintas variables climáticas difiere según las condiciones ecológicas (véase p. ej. Büntgen et al., 2012). Además, incertidumbres en las relaciones entre clima y crecimiento pueden derivar de los propios datos climáticos, por la falta de disponibilidad y homogeneidad de los registros meteorológicos (Frank et al., 2007).

En los bosques ibéricos mediterráneos, los estudios dendrocronológicos pueden proporcionar información sobre las dinámicas ecosistémicas en relación al cambio climático (véase p. ej. Gealozquierdo et al. 2014). Sin embargo, estos bosques son sistemáticamente gestionados, y las perturbaciones antrópicas afectan el crecimiento forestal. *Pinus pinea* L. (pino piñonero) es una especie importante en la península ibérica mediterránea por su relevancia medioambiental y socio-económica (Montero et al., 2008). En los bosques ibéricos de pino piñonero, la producción de madera y piñones están entre las principales finalidades de las operaciones selvícolas, que incluyen claras para mejorar el crecimiento diametral y el desarrollo de las copas. Por eso, en las tendencias de crecimiento observadas en las series dendrocronológicas procedentes de estos bosques, se pueden encontrar oscilaciones (no climáticas) debidas a estas intervenciones.

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son: (1) evaluar las señales climáticas extraídas de series dendrocronológicas en bosques de pino piñonero en España mediante curvas de “detrending” con diferentes grados de flexibilidad ajustadas a las series; (2) evaluar la influencia de diferentes parámetros climáticos y de distintas fuentes de datos climáticos en la interpretación de la señal extraída.

3. Metodología

Las muestras dendrocronológicas se recogieron en 4 rodales maduros: “Carrascal” (CAR) y “Viana de Cega” (VIA) en la Meseta Norte, con altitudes entre 700 y 900 m s. n. m., en la provincia de Valladolid; Valverde del Camino (VAL) e “Hinojos” (HNJ), entre 50 y 300 m s. n. m., en la provincia de Huelva. La precipitación anual y la temperatura media son 404 mm y 12° C en CAR, 357 mm y 12° C en VIA, 525 mm y 17° C en VAL, 527 mm y 18° C en HNJ (valores calculados a partir de la cuadrícula de datos climáticos E-OBS del proyecto EU-FP6 ENSEMBLES, <http://ensembles-eu.metoffice.com>). Los bosques en CAR y VIA son gestionados con fines de protección (tienen una importante función de fijación de dunas continentales) y también para la producción de madera y piñón. Los bosques en VAL y HNJ se gestionan principalmente para producción maderera y de biomasa, con producción secundaria de piñón. La silvicultura en los cuatro sitios es caracterizada por claras para mejorar el desarrollo del fuste y de las copas. Las muestras se tomaron con barrena forestal de Pressler y se procesaron con las técnicas dendrocronológicas estándar (Speer. 2010). Las anchuras de anillos se midieron en centésimas de mm con un estereomicroscopio y una mesa LINTAB™ conectada al software TSAP-Win™ (Rinntech®) para la visualización y el análisis de las cronologías. La sincronización de las series se verificó mediante las técnicas de “cross-dating” (Cook & Briffa, 1990).

Se aplicaron 2 curvas de detrending en cada sitio de estudio: una curva exponencial negativa (NEXP), y una curva spline con longitud de 30 años (SP30). La NEXP ha sido típicamente utilizada en dendroclimatología para eliminar la tendencia del crecimiento relacionada a la edad de los pies (Fritts, 1976). La spline proporciona diversos ajustes según el grado de flexibilidad, definido por su frecuencia de corte y longitud de onda en años (Cook & Peters, 1981). La SP30 se puede definir “flexible”, ajustándose a oscilaciones de media frecuencia. Los índices se calcularon como ratios entre los valores observados (anchuras de anillos) y los estimados por la curva de detrending, y las cronologías medias se calcularon como media robusta entre las series de índices (Cook & Briffa, 1990).

Se utilizaron 4 parámetros climáticos: precipitación, temperatura media, índice de sequía de Palmer (scPDSI) – utilizado en reconstrucciones paleoclimáticas basadas en métodos dendrocronológicos (Cook et al., 2015) –, y variación de la temperatura diurna (DTR) – cuya influencia en el crecimiento forestal se ha detectado en estudios previos (Büntgen et al., 2013). Las fuentes de los datos climáticos fueron: cuadrícula E-OBS (proyecto EU-FP6 ENSEMBLES, <http://ensembles-eu.metoffice.com>), cuadrícula CRU (Climatic Research Unit Time-Series, <http://www.cru.uea.ac.uk/>), y estaciones meteorológicas. Para cada sitio de estudio, se tomaron los datos del punto de cuadrícula más próximo, así como los registros de la estación más cercana (28 datasets climáticos en total, Tabla 1).

Tabla 1. Datos climáticos. Las columnas indican las fuentes de los datos (cuadrículas y estaciones meteorológicas), y las líneas indican los sitios de estudio (CAR, VIA, VAL y HNJ). Las celdas grises incluyen las coordenadas de los vértices de las cuadrículas (long. ° O, lat. ° N). Abajo, para cada fuente de datos climáticos, se indican el número de puntos de cuadrícula y de estaciones, el número de parámetros climáticos, y el número resultante (en negrita) de datasets climáticos.

	Cuadrículas				Estaciones meteorológicas
	CRU		E-OBS		
CAR	4.5 41.5	4 42	4.5 41.5	4.25 41.75	Valladolid-Villanubla
VIA	4.5 41	4 41.5	4.5 41.25	4.25 41.5	
VAL	7 37.5	6.5 38	7 37.5	6.75 37.75	Huelva-Ronda-este
HNJ	6.5 37	6 37.5	6.5 37.25	6.25 37.5	
	4 puntos de cuadrícula 4 parámetros ⁽¹⁾		4 puntos de cuadrícula 2 parámetros ⁽²⁾		2 estaciones 2 parámetros ⁽²⁾
	4 x 4 = 16		4 x 2 = 8		2 x 2 = 4

⁽¹⁾ precipitación, temperaturas medias, scPDSI y DTR

⁽²⁾ precipitación, temperaturas medias

Se calcularon las correlaciones entre las series dendrocronológicas medias estandarizadas con los dos métodos de detrending y los valores mensuales de todos los parámetros climáticos de las distintas fuentes de datos climáticos. Además, se calcularon las correlaciones entre las series temporales de precipitación y temperaturas obtenidas de las distintas fuentes de datos climáticos. Todas las correlaciones se calcularon en el lapso temporal común de las series dendrocronológicas y climáticas (1950-2011).

4. Resultados

Se encontraron discrepancias entre las cronologías NEXP y SP30, especialmente en VIA y HNJ, mientras en CAR hubo la mayor semejanza entre diferentes cronologías (Figura 1). Las discrepancias se deben a los efectos de claras ocurridas en los años 2000 en VIA y en los años 1960 en HNJ, que se reflejaron en aumentos de crecimiento en las series de anillos (señales no climáticas), y que no fueron eliminados por las curvas NEXP. Las correlaciones más altas entre cronologías de distintos sitios se encontraron con el método SP30 entre VIA y CAR, y entre VAL y HNJ (Figura 1), lo que indica que las curvas SP30 resaltaron la señal climática común entre sitios cercanos (CAR y VIA en Valladolid, y VAL y HNJ en Huelva).

Los efectos de diferentes métodos de detrending se vieron en las correlaciones clima-crecimiento. Las correlaciones obtenidas con las cronologías NEXP difirieron de las obtenidas con las

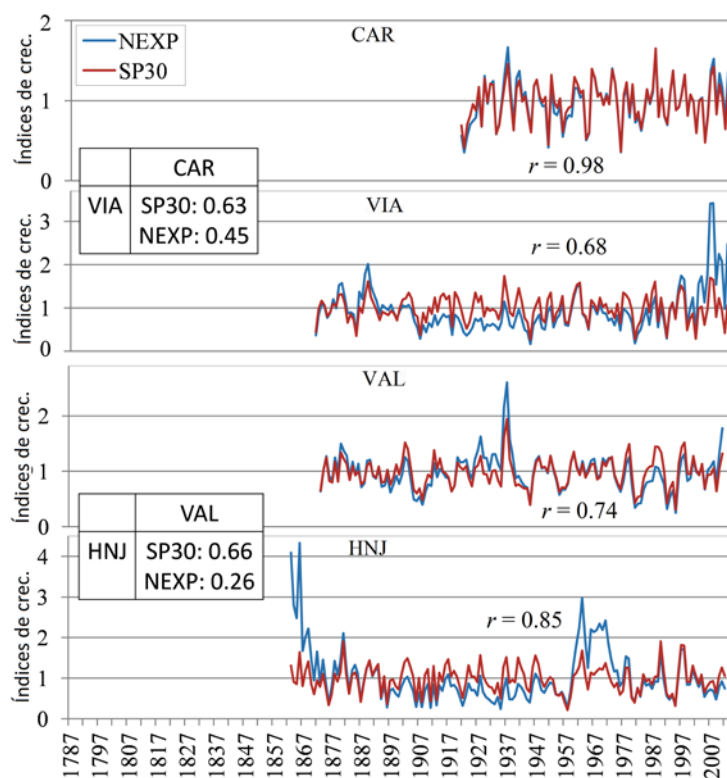


Figura 1. Cronologías estandarizadas con curva exponencial negativa (NEXP) y con spline de 30 años (SP30). Notar las diferentes escalas de la abcisa. Se indica el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre las cronologías NEXP y SP20 en cada sitio. En las tablas se indican los coeficientes de correlación entre CAR y VIA, y entre VAL y HNJ, calculados con las diferentes cronologías medias estandarizadas (correlaciones calculadas en el intervalo común 1931-2011).

cronologías SP30 en VIA, VAL y HNJ (Figuras 3, 4 y 5). Por otro lado, se observaron similitudes en las correlaciones de sitios cercanos (VIA y CAR, Figuras 2 y 3; VAL y HNJ, Figuras 4 y 5), lo que confirma la existencia de señales climáticas comunes. Se encontraron algunas discrepancias en el análisis de correlación también cuando se utilizaron datos climáticos de diferente fuente, especialmente en el caso de las temperaturas en HNJ, y en menor medida en VAL (Figuras 5 y 4). Estas discrepancias, aunque disminuyeron con las cronologías SP30 (especialmente en HNJ, Figura 5), se pueden relacionar con las diferencias existentes entre los valores climáticos de diferentes fuentes: las correlaciones entre las tres series de precipitación (estación, E-OBS y CRU) fueron altas (>0.8) en los cuatro sitios; por otro lado, en el caso de las temperaturas en Huelva, se encontraron correlaciones bajas (≈ 0.5) entre las series obtenidas de la estación y las obtenidas de las dos cuadrículas. Las correlaciones entre las series dendrocronológicas y los valores mensuales de scPDSI y DTR se muestran en la Figura 6.

5. Discusión

La curva NEXP no fue apropiada para estudiar la señal dendroclimática en VIA y HNJ. La NEXP es definida por un modelo paramétrico que retiene la variabilidad en las bajas frecuencias (salvo la tendencia relacionada a la edad), que puede estar relacionada con cambios climáticos a largo plazo, y por eso puede interesar su conservación como señal climática (Esper et al., 2002). Por tanto, el método NEXP se puede definir como “conservador” (Cook & Briffa, 1990). Sin embargo, como remarcan Biondi y Qeadan (2008), las aproximaciones conservadoras se han desarrollado con muestras dendrocronológicas procedentes de poblaciones de árboles dispersos y lugares donde las perturbaciones antrópicas son mínimas. La bondad de ajuste se reduce en las series dendrocronológicas de árboles que crecen en rodales sujetos a las dinámicas estructurales:

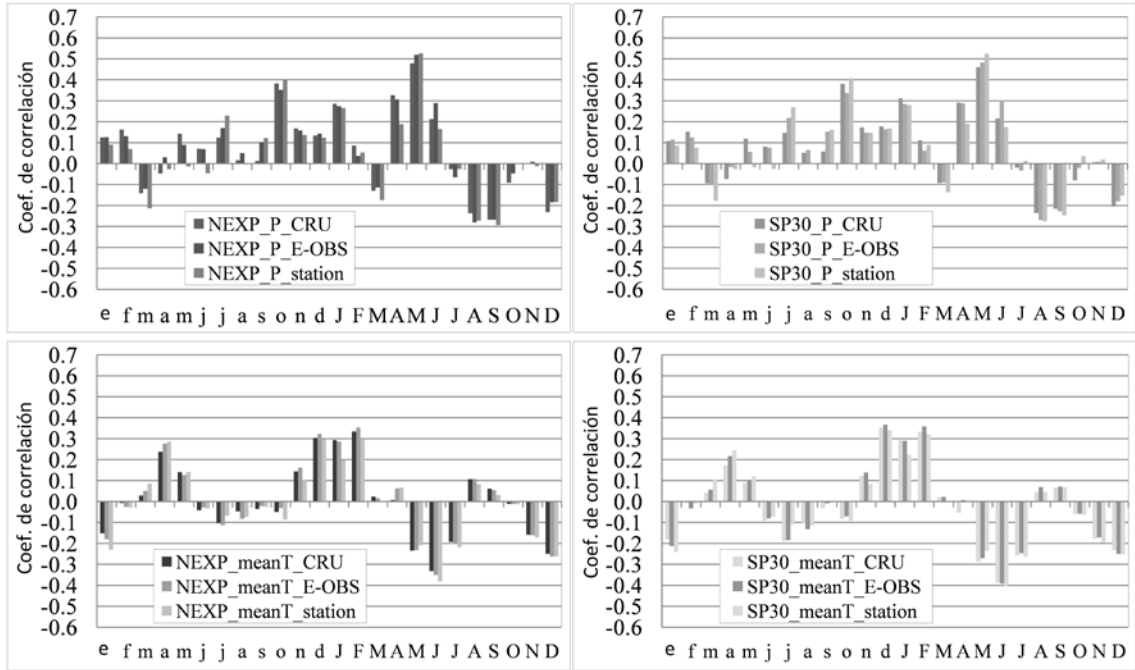


Figura 2. Correlaciones en CAR entre las cronologías de anillos (estandarizadas con curva exponencial negativa, NEXP, y con spline de 30 años, SP30) y los valores mensuales (desde enero del año anterior a la formación del anillo hasta diciembre del corriente) de precipitación (P) y temperaturas medias (meanT), obtenidos de estaciones meteorológicas (station) y de cuadrículas E-OBS y CRU.

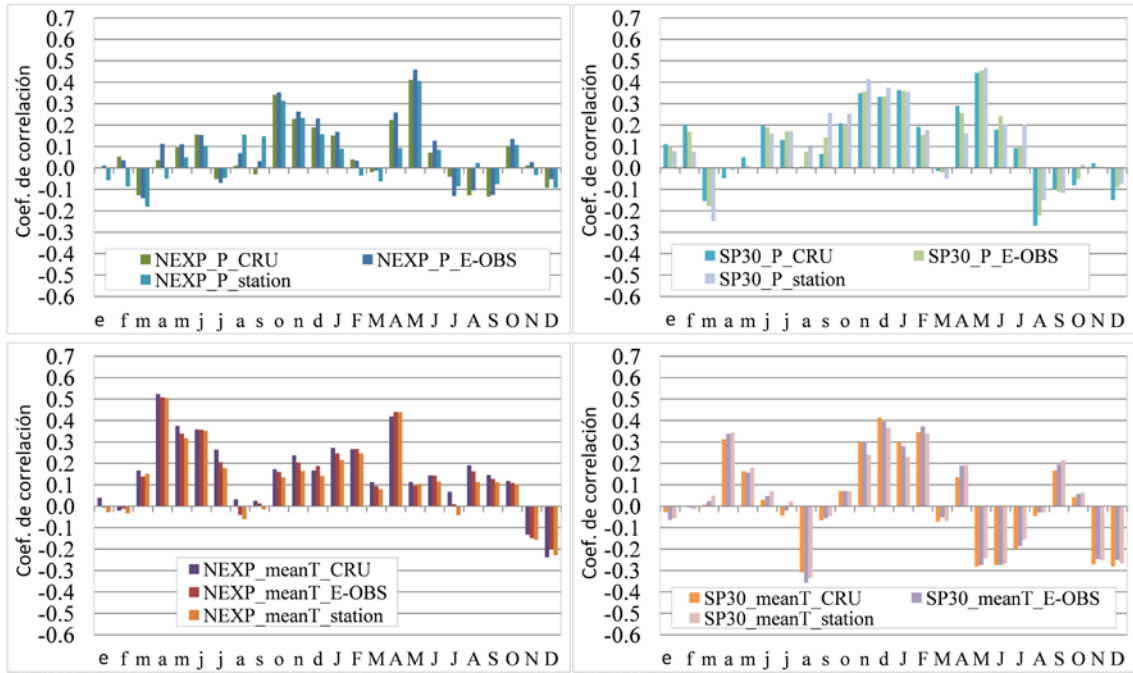


Figura 3. Correlaciones en VIA entre las cronologías de anillos (estandarizadas con curva exponencial negativa, NEXP, y con spline de 30 años, SP30) y los valores mensuales (desde enero del año anterior a la formación del anillo hasta diciembre del corriente) de precipitación (P) y temperaturas medias (meanT), obtenidos de estaciones meteorológicas (station) y de cuadrículas E-OBS y CRU.

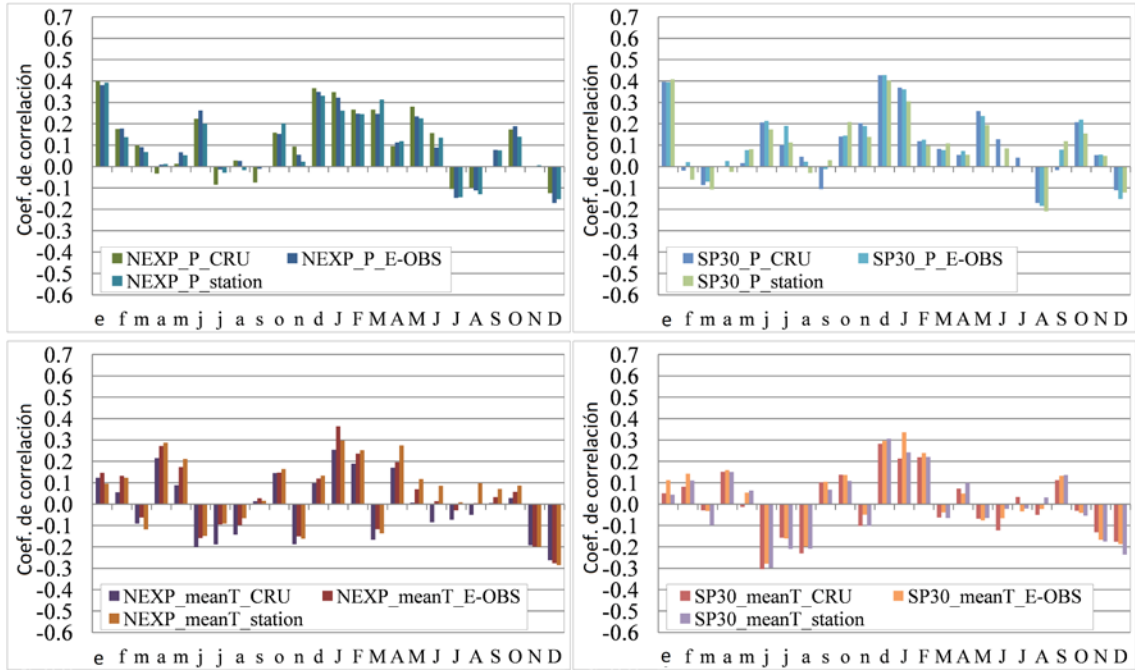


Figura 4. Correlaciones en VAL entre las cronologías de anillos (estandarizadas con curva exponencial negativa, NEXP, y con spline de 30 años, SP30) y los valores mensuales (desde enero del año anterior a la formación del anillo hasta diciembre del corriente) de precipitación (P) y temperaturas medias (meanT), obtenidos de estaciones meteorológicas (station) y de cuadrículas E-OBS y CRU.

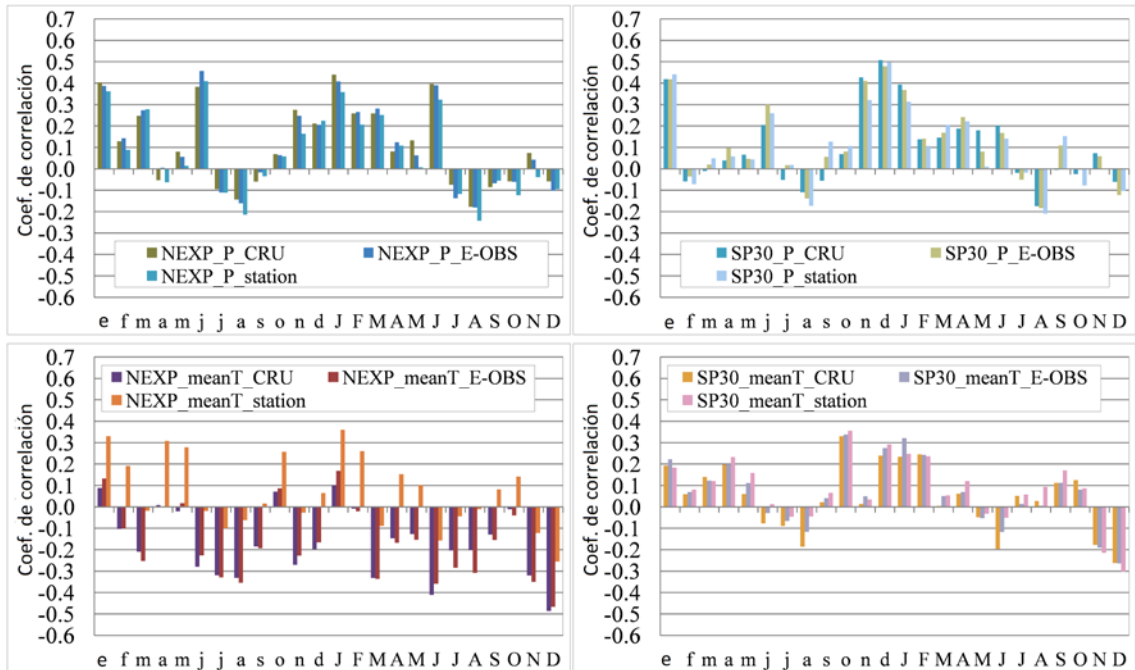


Figura 5. Correlaciones en HNJ entre las cronologías de anillos (estandarizadas con curva exponencial negativa, NEXP, y con spline de 30 años, SP30) y los valores mensuales (desde enero del año anterior a la formación del anillo hasta diciembre del corriente) de precipitación (P) y temperaturas medias (meanT), obtenidos de estaciones meteorológicas (station) y de cuadrículas E-OBS y CRU.

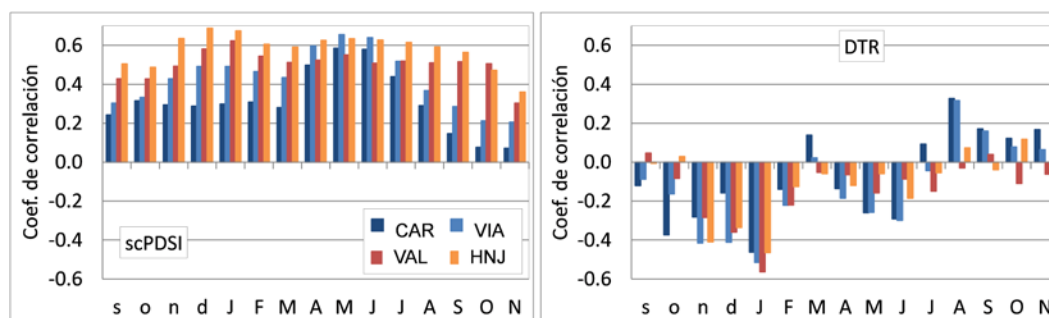


Figura 6. Correlaciones entre las cronologías SP30 y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior a la formación del anillo hasta noviembre del año corriente) del índice de sequía de Palmer (scPDSI) y de la variación de las temperaturas diurnas (DTR)

en estas condiciones, la eliminación de la señal no climática se puede obtener con curvas de detrending definidas por modelos que contemplan la existencia del azar en las tendencias de media/baja frecuencia del crecimiento, como curvas spline flexibles (Cook & Briffa, 1990). En VIA y HNJ, las liberaciones debidas a las claras podrían considerarse erróneamente como señales climáticas si un método de detrending conservador como la NEXP fuera elegido para la investigación dendroclimatológica. Por otro lado, en CAR, donde no se observaron efectos de alteraciones selvícolas, las cronologías estandarizadas con los dos métodos son muy parecidas y proporcionan correlaciones con el clima muy similares.

Una posible explicación a las discrepancias entre datos climáticos de distintas fuentes, reflejadas en las correlaciones clima-crecimiento, podría ser la inestabilidad temporal de la calidad de los registros meteorológicos. En el caso de Huelva los registros de temperatura de la estación meteorológica se desviaron de las series CRU y E-OBS en los años 1930, 1940, 1960 y 1980, mientras en las décadas siguientes hubo mayor semejanza (Figura 7). Esto puede ser debido a algún cambio en las características de la estación (p. ej. En las técnicas de registro de los datos, que podrían haber mejorado en décadas recientes). Por otra parte, el aumento reciente de la concordancia entre las series podría ser explicado por una mejora en las estimaciones en las que se basan las cuadrículas. En efecto, éstas proporcionan estimaciones elaboradas a partir de datos reales registrados por las estaciones de una determinada área, cuya disponibilidad puede variar en el tiempo. En Andalucía, el número de registros disponibles creció en el tiempo, especialmente en los últimos 20 años por la instalación de nuevas estaciones por la administración autonómica (Vázquez-Piqué, 2011). Por eso, el incremento de datos climáticos disponibles pudo mejorar las estimaciones en cuadrícula. De todas maneras, el efecto de las discrepancias entre fuentes de datos climáticos en el análisis de correlación clima-crecimiento fue menos acusado en comparación con el efecto de las diferentes curvas de detrending. Otro aspecto a considerar de las estaciones meteorológicas es su cercanía a los sitios de estudio: las distancias entre una misma estación y diferentes rodales (como en el caso de este trabajo, donde se encontró una sola estación cada dos sitios) puede afectar el análisis, mientras las cuadrículas (que en nuestro caso proporcionaron cuatro puntos distintos) pueden proporcionar datos con mayor resolución geográfica, y permitir una caracterización dendroclimática más precisa.

En base a estas consideraciones, una buena aproximación a la investigación dendroclimatológica en nuestras áreas de estudio incluye curvas de detrending flexibles, como la SP30, y datos climáticos de cuadrícula. Con esta aproximación, se observa que los coeficientes de correlación clima-crecimiento más altos se concentran en dos momentos del año (otoño/invierno del año anterior y primavera del corriente) en VIA y CAR, y en uno (otoño/invierno del año anterior) en VAL y HNJ (Natalini et al., 2016).

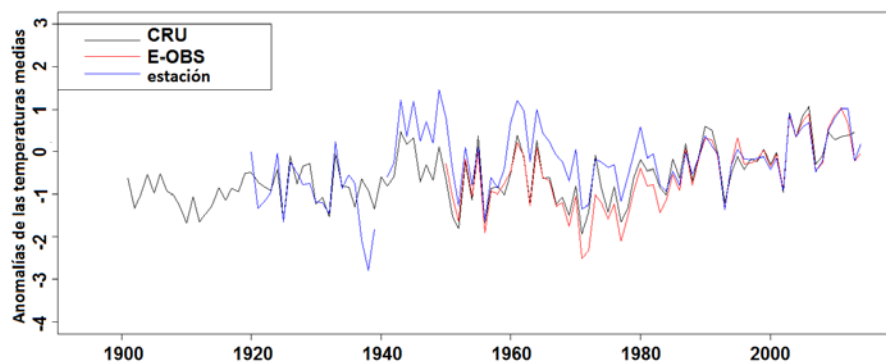


Figura 7. Anomalías de las temperaturas medias en Huelva, a partir de los registros de la estación meteorológica y de los datos de las cuadrículas CRU y E-OBS.

Esta distribución de los coeficientes de correlación, observada con los datos de temperatura y precipitación, se encuentra también en el análisis efectuado con scPDSI y DTR. Esto indica la idoneidad de estos dos parámetros para la investigación dendroclimatológica en estos bosques. Sin embargo, el uso combinado de precipitación y temperatura proporcionó patrones estacionales de los coeficientes de correlación más definidos, y explica satisfactoriamente el crecimiento en los sitios de estudio.

6. Conclusiones

La aproximación dendroclimatológica a las dinámicas forestales requiere una atenta evaluación del método de detrending y de los datos climáticos más apropiados. No existen métodos de detrending universalmente válidos, porque las cronologías procedentes de diferentes rodales, especialmente en bosques afectados por los aprovechamientos forestales, muestran diferentes alteraciones no climáticas que determinan qué método es aplicable y qué señal climática (en qué frecuencia) se puede extraer. Se pueden encontrar incertidumbres en las correlaciones clima-crecimiento debidas a los datos climáticos utilizados, por tanto el tipo, la calidad, la fuente y la validez geográfica de estos datos debería evaluarse también a la hora de examinar la respuesta del crecimiento. Para el estudio de la variabilidad del clima y de la respuesta del crecimiento forestal en bosques gestionados de *P. pinea* en España, una aproximación dendroclimatológica apropiada puede incluir curvas spline flexibles para el detrending y datos climáticos de cuadrícula.

7. Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto “Vulnerabilidad de las masas de *Pinus pinea* ante un escenario de cambio global” (Plan Nacional I+D+i RTA2013-00011-C02-02), Ministerio de Economía y Competitividad, Unión Europea (fondos FEDER) e Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Fabio Natalini recibió una beca del Campus de Excelencia Internacional de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambio Global para realizar una estancia de investigación en el Instituto Federal de Investigación para el bosque, la nieve y el paisaje (WSL, Birmensdorf, Suiza), durante la cual se realizó parte de este trabajo.

8. Bibliografía

Biondi, F., Qeadan, F., 2008. A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree Ring Res.* 64 (2), 81–96.

Büntgen, U., Martínez-Peña, F., Aldea, J., Rigling, A., Fischer, E.M., Camarero, J.J., Hayes, M.J., Fatton, V., Egli, S., 2013. Declining pine growth in Central Spain coincides with increasing diurnal temperature range since the 1970. *Global Planet. Change* 107, 177–185

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.R., Briffa, K.R. (1990): Data Analysis. En: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (eds.): *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 97-162

Cook, E.R., Seager, R., Kushnir, Y., Briffa, K.R., Büntgen, U., Frank, D., et al., 2015. Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. *Sci. Adv.* 1 (10), e1500561, <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1500561>.

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.

Frank, D., Büntgen, U., Böhm, R., Maugeri, M., Esper, J., 2007. Warmer early instrumental measurements versus colder reconstructed temperatures: shooting at a moving target. *Quat. Sci. Rev.* 26 (25), 3298–3310

Fritts, H.C. (1976): *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London

Gea-Izquierdo, G., Viguera, B., Cabrera, M., Cañellas, I. (2014): Drought induced decline could portend widespread pine mortality at the xeric ecotone in managed Mediterranean pine-oak woodlands. *Forest Ecology and Management*: 320:70-82.

Helama, S., Lindholm, M., Timonen, M., Eronen, M., 2004. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a comparison of tree-ring standardization methods. *Theor. Appl. Climatol.* 79 (3–4), 239–254.

Montero, G., Calama R., Ruiz-Peinado, R., 2008. Selvicultura de *Pinus pinea* L. En: Serrada, R., Montero, G., Reque, J.A. (eds.). *Compendio de selvicultura aplicada en España*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid, Spain, pp. 431-470

Natalini F., Alejano R., Vázquez-Piqué J., Pardos M., Calama R., Büntgen U., 2016. Spatiotemporal variability of stone pine (*Pinus pinea* L.) growth response to climate across its geographical range in the Iberian Peninsula. *Dendrochronología* 40, 72-84

Speer, J.H., 2010. *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press, Tuscon, USA

Vázquez-Piqué, J.; 2011. Clima. En: Alejano, R., Domingo, J.M., Fernández, M. (eds.). *Manual para la gestión sostenible de las dehesas andaluzas*. 85-107. Foro para la Defensa y Conservación de la Dehesa Encinal y Universidad de Huelva

Métodos dendroclimatológicos en bosques de *Pinus pinea* L. en España: estandarización de series de anchura de anillos y validación de datos climáticos

NATALINI, F.¹, ALEJANO MONGE¹, M. y VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.¹

¹Departamento de Ciencias Agroforestales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva, Campus de La Rábida, 21819 Palos de la Frontera, Huelva

Resumen

Los efectos del clima en el crecimiento forestal se pueden estudiar mediante los métodos dendroclimatológicos. Éstos aplican curvas ajustadas a las cronologías de anillos de crecimiento de los árboles para eliminar la varianza no climática. Curvas con diferente flexibilidad extraen diferentes señales climáticas según el dominio de frecuencias de las cronologías. Además, la interpretación de la señal extraída es influenciada por los datos climáticos utilizados. En este trabajo se han evaluado curvas spline con diversas longitudes de onda ajustadas a cronologías de pino piñonero en España. Se calcularon las correlaciones con datos climáticos (temperaturas, precipitación, índice de sequía de Palmer – PDSI – y variación de temperatura diurna – DTR) de estaciones meteorológicas y cuadrículas. Splines con longitud de 30 años retuvieron la señal climática y eliminaron el ruido debido a oscilaciones de crecimiento causadas por claros y claras. PDSI y DTR están relacionados con la señal dendroclimática, aunque precipitación y temperaturas explican satisfactoriamente la respuesta del crecimiento. Sin embargo, se encontraron incertidumbres respecto a los datos de las estaciones meteorológicas, debidas a diferencias en altitud entre estación y sitio de estudio o a la inestable calidad de los registros meteorológicos. Los datos de cuadrícula permitieron un análisis más robusto en los sitios de estudio.

Palabras clave

Dendroclimatología, Detrending, Relaciones clima-crecimiento, Incertidumbres

1. Introducción

A través de la información almacenada en los anillos de crecimiento anual de las especies leñosas, se pueden estudiar procesos y dinámicas medioambientales. El crecimiento diametral de los árboles es influenciado por distintos factores (Cook & Briffa, 1990), por tanto la extracción de la información sobre uno de estos factores a partir de una serie de anillos requiere la retención de la varianza relacionada a ese factor y la eliminación de la varianza relacionada a otros factores. La varianza en el crecimiento de los anillos relacionada con el clima es la señal de interés en la dendroclimatología, y se extrae mediante un procedimiento de estandarización que incluye tres pasos: (1) “detrending”, es decir la eliminación de las tendencias de crecimiento no relacionadas con el clima y debidas a otros factores (p. ej. la edad de los pies); (2) la computación de índices de crecimiento anual; (3) computación de una cronología media que contiene la señal climática común entre las series dendrocronológicas de árboles individuales (Cook & Briffa, 1990). El detrending se realiza típicamente mediante curvas ajustadas a las cronologías de anchura de anillos, y la selección de una curva apropiada es de gran importancia en la dendroclimatología. Curvas de detrending con distintos grados de flexibilidad enfatizan la señal climática y elimina la señal no climática en diferentes frecuencias, y su aplicabilidad depende del dominio de frecuencia de las series de anchura de anillo (Helama et al., 2004).

La interpretación de la señal climática extraída de las series dendrocronológicas se realiza estudiando las relaciones entre las series medias de anillos estandarizadas y variables climáticas (Fritts, 1976; Cook & Briffa, 1990). Sin embargo la varianza de las series dendrocronológicas explicada por el clima puede variar según las variables climáticas utilizadas, porque la sensibilidad

del crecimiento a distintas variables climáticas difiere según las condiciones ecológicas (véase p. ej. Büntgen et al., 2012). Además, incertidumbres en las relaciones entre clima y crecimiento pueden derivar de los propios datos climáticos, por la falta de disponibilidad y homogeneidad de los registros meteorológicos (Frank et al., 2007).

En los bosques ibéricos mediterráneos, los estudios dendrocronológicos pueden proporcionar información sobre las dinámicas ecosistémicas en relación al cambio climático (véase p. ej. Gea-lzquierdo et al. 2014). Sin embargo, estos bosques son sistemáticamente gestionados, y las perturbaciones antrópicas afectan el crecimiento forestal. *Pinus pinea* L. (pino piñonero) es una especie importante en la península ibérica mediterránea por su relevancia medioambiental y socio-económica (Montero et al., 2008). En los bosques ibéricos de pino piñonero, la producción de madera y piñones están entre las principales finalidades de las operaciones selvícolas, que incluyen claras para mejorar el crecimiento diametral y el desarrollo de las copas. Por eso, en las tendencias de crecimiento observadas en las series dendrocronológicas procedentes de estos bosques, se pueden encontrar oscilaciones (no climáticas) debidas a estas intervenciones.

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son: (1) evaluar las señales climáticas extraídas de series dendrocronológicas en bosques de pino piñonero en España mediante curvas de “detrending” con diferentes grados de flexibilidad ajustadas a las series; (2) evaluar la influencia de diferentes parámetros climáticos y de distintas fuentes de datos climáticos en la interpretación de la señal extraída.

3. Metodología

Las muestras dendrocronológicas se recogieron en 4 rodales maduros: “Carrascal” (CAR) y “Viana de Cega” (VIA) en la Meseta Norte, con altitudes entre 700 y 900 m s. n. m., en la provincia de Valladolid; Valverde del Camino (VAL) e “Hinojos” (HNJ), entre 50 y 300 m s. n. m., en la provincia de Huelva. La precipitación anual y la temperatura media son 404 mm y 12° C en CAR, 357 mm y 12° C en VIA, 525 mm y 17° C en VAL, 527 mm y 18° C en HNJ (valores calculados a partir de la cuadrícula de datos climáticos E-OBS del proyecto EU-FP6 ENSEMBLES, <http://ensembles-eu.metoffice.com>). Los bosques en CAR y VIA son gestionados con fines de protección (tienen una importante función de fijación de dunas continentales) y también para la producción de madera y piñón. Los bosques en VAL y HNJ se gestionan principalmente para producción maderera y de biomasa, con producción secundaria de piñón. La silvicultura en los cuatro sitios es caracterizada por claras para mejorar el desarrollo del fuste y de las copas. Las muestras se tomaron con barrena forestal de Pressler y se procesaron con las técnicas dendrocronológicas estándar (Speer. 2010). Las anchuras de anillos se midieron en centésimas de mm con un estereomicroscopio y una mesa LINTAB™ conectada al software TSAP-Win™ (Rinntech®) para la visualización y el análisis de las cronologías. La sincronización de las series se verificó mediante las técnicas de “cross-dating” (Cook & Briffa, 1990).

Se aplicaron 2 curvas de detrending en cada sitio de estudio: una curva exponencial negativa (NEXP), y una curva spline con longitud de 30 años (SP30). La NEXP ha sido típicamente utilizada en dendroclimatología para eliminar la tendencia del crecimiento relacionada a la edad de los pies (Fritts, 1976). La spline proporciona diversos ajustes según el grado de flexibilidad, definido por su frecuencia de corte y longitud de onda en años (Cook & Peters, 1981). La SP30 se puede definir “flexible”, ajustándose a oscilaciones de media frecuencia. Los índices se calcularon como ratios entre los valores observados (anchuras de anillos) y los estimados por la curva de detrending, y las cronologías medias se calcularon como media robusta entre las series de índices (Cook & Briffa, 1990).

Se utilizaron 4 parámetros climáticos: precipitación, temperatura media, índice de sequía de Palmer (scPDSI) – utilizado en reconstrucciones paleoclimáticas basadas en métodos

dendrocronológicos (Cook et al., 2015) –, y variación de la temperatura diurna (DTR) – cuya influencia en el crecimiento forestal se ha detectado en estudios previos (Büntgen et al., 2013). Las fuentes de los datos climáticos fueron: cuadrícula E-OBS (proyecto EU-FP6 ENSEMBLES, <http://ensembles-eu.metoffice.com>), cuadrícula CRU (Climatic Research Unit Time-Series, <http://www.cru.uea.ac.uk/>), y estaciones meteorológicas. Para cada sitio de estudio, se tomaron los datos del punto de cuadrícula más próximo, así como los registros de la estación más cercana (28 datasets climáticos en total, Tabla 1).

Tabla 1. Datos climáticos. Las columnas indican las fuentes de los datos (cuadrículas y estaciones meteorológicas), y las líneas indican los sitios de estudio (CAR, VIA, VAL y HNJ). Las celdas grises incluyen las coordenadas de los vértices de las cuadrículas (long. ° O, lat. ° N). Abajo, para cada fuente de datos climáticos, se indican el número de puntos de cuadrícula y de estaciones, el número de parámetros climáticos, y el número resultante (en **negrita**) de datasets climáticos.

	Cuadrículas				Estaciones meteorológicas
	CRU		E-OBS		
CAR	4.5	4	4.5	4.25	Valladolid-Villanubla
	41.5	42	41.5	41.75	
VIA	4.5	4	4.5	4.25	
	41	41.5	41.25	41.5	
VAL	7	6.5	7	6.75	Huelva-Ronda-este
	37.5	38	37.5	37.75	
HNJ	6.5	6	6.5	6.25	
	37	37.5	37.25	37.5	
	4 puntos de cuadrícula 4 parámetros ⁽¹⁾		4 puntos de cuadrícula 2 parámetros ⁽²⁾		2 estaciones 2 parámetros ⁽²⁾
	4 x 4 = 16		4 x 2 = 8		2 x 2 = 4

⁽¹⁾ precipitación, temperaturas medias, scPDSI y DTR

⁽²⁾ precipitación, temperaturas medias

Se calcularon las correlaciones entre las series dendrocronológicas medias estandarizadas con los dos métodos de detrending y los valores mensuales de todos los parámetros climáticos de las distintas fuentes de datos climáticos. Además, se calcularon las correlaciones entre las series temporales de precipitación y temperaturas obtenidas de las distintas fuentes de datos climáticos. Todas las correlaciones se calcularon en el lapso temporal común de las series dendrocronológicas y climáticas (1950-2011).

4. Resultados

Se encontraron discrepancias entre las cronologías NEXP y SP30, especialmente en VIA y HNJ, mientras en CAR hubo la mayor semejanza entre diferentes cronologías (Figura 1). Las discrepancias se deben a los efectos de claras ocurridas en los años 2000 en VIA y en los años 1960 en HNJ, que se reflejaron en aumentos de crecimiento en las series de anillos (señales no climáticas), y que no fueron eliminados por las curvas NEXP. Las correlaciones más altas entre cronologías de distintos sitios se encontraron con el método SP30 entre VIA y CAR, y entre VAL y HNJ (Figura 1), lo que indica que las curvas SP30 resaltaron la señal climática común entre sitios cercanos (CAR y VIA en Valladolid, y VAL y HNJ en Huelva).

Los efectos de diferentes métodos de detrending se vieron en las correlaciones clima-crecimiento. Las correlaciones obtenidas con las cronologías NEXP difirieron de las obtenidas con las

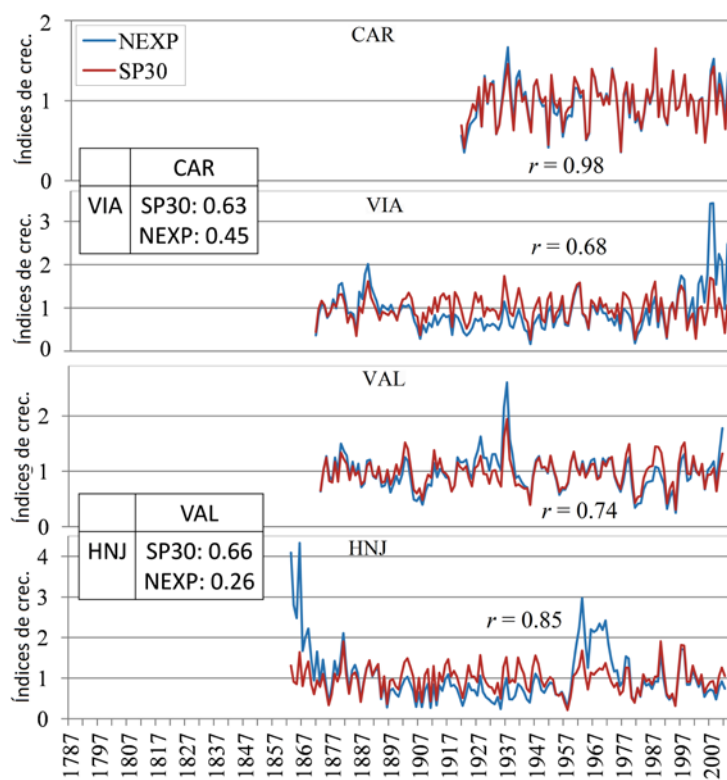


Figura 1. Cronologías estandarizadas con curva exponencial negativa (NEXP) y con spline de 30 años (SP30). Notar las diferentes escalas de la abcisa. Se indica el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre las cronologías NEXP y SP20 en cada sitio. En las tablas se indican los coeficientes de correlación entre CAR y VIA, y entre VAL y HNJ, calculados con las diferentes cronologías medias estandarizadas (correlaciones calculadas en el intervalo común 1931-2011).

cronologías SP30 en VIA, VAL y HNJ (Figuras 3, 4 y 5). Por otro lado, se observaron similitudes en las correlaciones de sitios cercanos (VIA y CAR, Figuras 2 y 3; VAL y HNJ, Figuras 4 y 5), lo que confirma la existencia de señales climáticas comunes. Se encontraron algunas discrepancias en el análisis de correlación también cuando se utilizaron datos climáticos de diferente fuente, especialmente en el caso de las temperaturas en HNJ, y en menor medida en VAL (Figuras 5 y 4). Estas discrepancias, aunque disminuyeron con las cronologías SP30 (especialmente en HNJ, Figura 5), se pueden relacionar con las diferencias existentes entre los valores climáticos de diferentes fuentes: las correlaciones entre las tres series de precipitación (estación, E-OBS y CRU) fueron altas (>0.8) en los cuatro sitios; por otro lado, en el caso de las temperaturas en Huelva, se encontraron correlaciones bajas (≈ 0.5) entre las series obtenidas de la estación y las obtenidas de las dos cuadrículas. Las correlaciones entre las series dendrocronológicas y los valores mensuales de scPDSI y DTR se muestran en la Figura 6.

5. Discusión

La curva NEXP no fue apropiada para estudiar la señal dendroclimática en VIA y HNJ. La NEXP es definida por un modelo paramétrico que retiene la variabilidad en las bajas frecuencias (salvo la tendencia relacionada a la edad), que puede estar relacionada con cambios climáticos a largo plazo, y por eso puede interesar su conservación como señal climática (Esper et al., 2002). Por tanto, el método NEXP se puede definir como “conservador” (Cook & Briffa, 1990). Sin embargo, como remarcan Biondi y Qeadan (2008), las aproximaciones conservadoras se han desarrollado con muestras dendrocronológicas procedentes de poblaciones de árboles dispersos y lugares donde las perturbaciones antrópicas son mínimas. La bondad de ajuste se reduce en las series dendrocronológicas de árboles que crecen en rodales sujetos a las dinámicas estructurales:

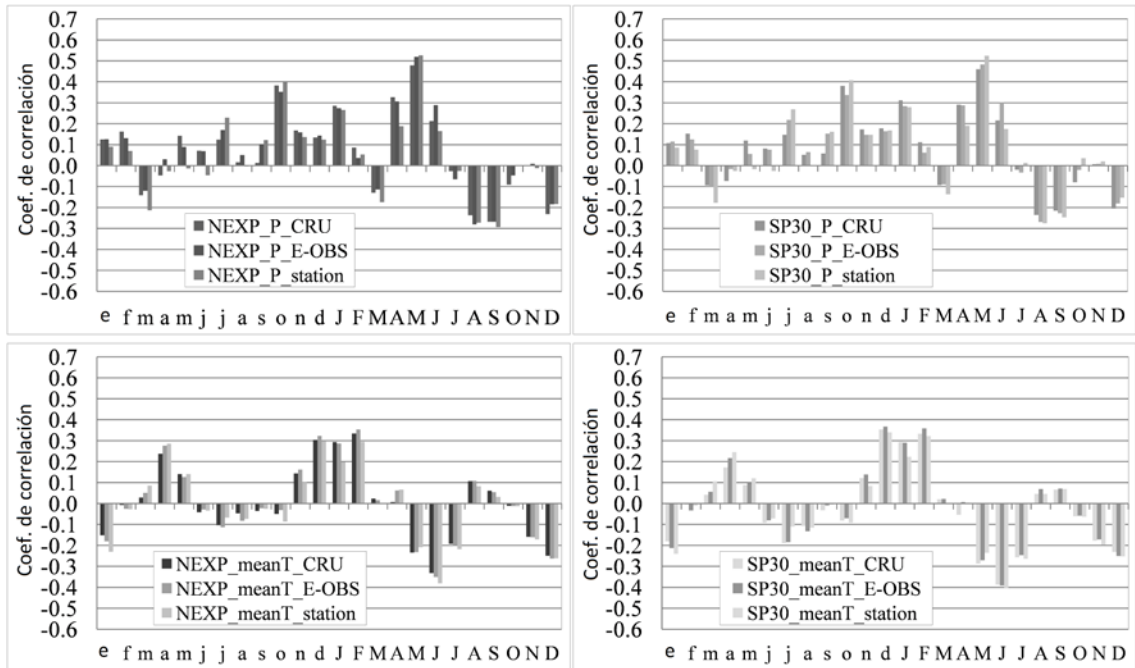


Figura 2. Correlaciones en CAR entre las cronologías de anillos (estandarizadas con curva exponencial negativa, NEXP, y con spline de 30 años, SP30) y los valores mensuales (desde enero del año anterior a la formación del anillo hasta diciembre del corriente) de precipitación (P) y temperaturas medias (meanT), obtenidos de estaciones meteorológicas (station) y de cuadrículas E-OBS y CRU.

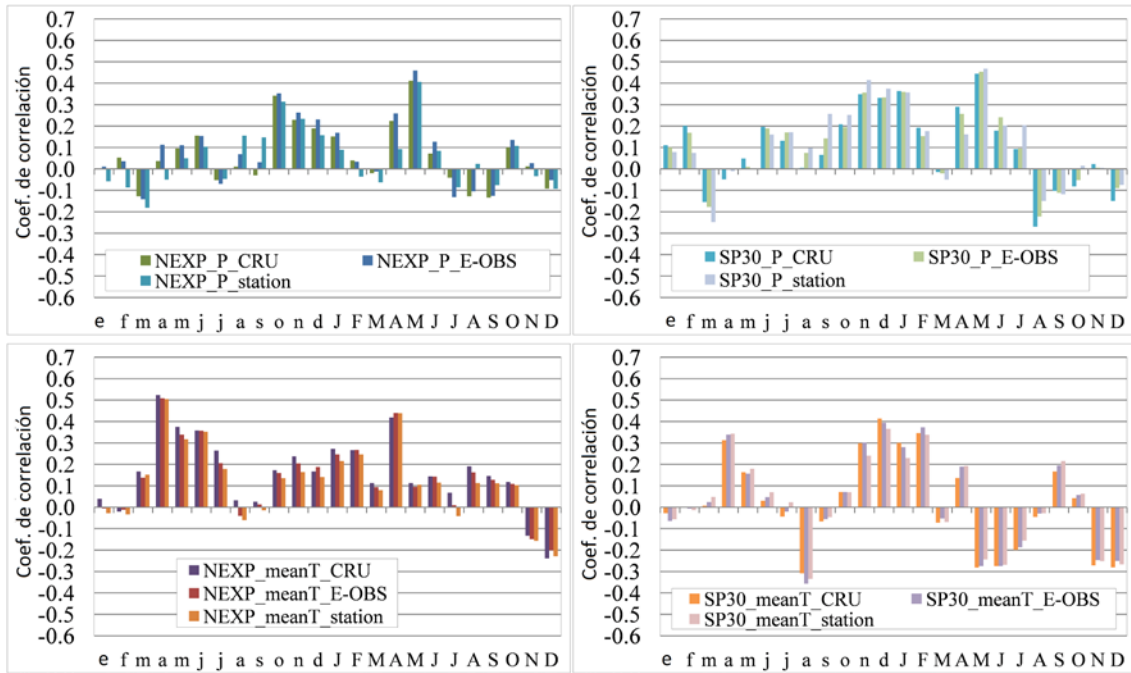


Figura 3. Correlaciones en VIA entre las cronologías de anillos (estandarizadas con curva exponencial negativa, NEXP, y con spline de 30 años, SP30) y los valores mensuales (desde enero del año anterior a la formación del anillo hasta diciembre del corriente) de precipitación (P) y temperaturas medias (meanT), obtenidos de estaciones meteorológicas (station) y de cuadrículas E-OBS y CRU.

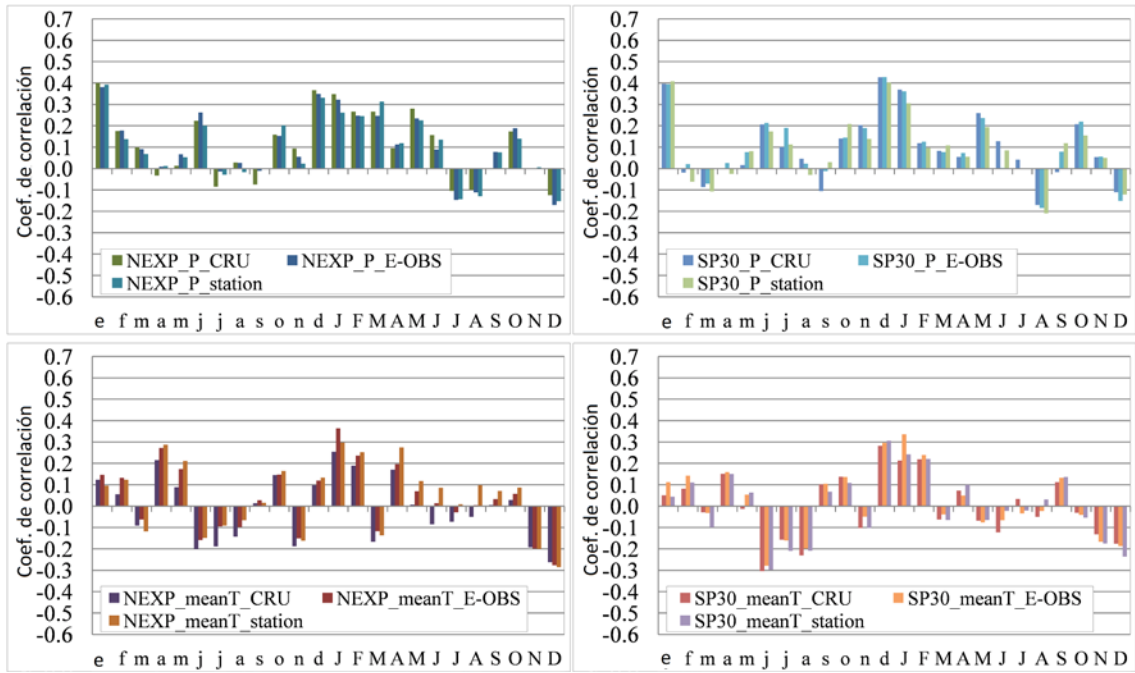


Figura 4. Correlaciones en VAL entre las cronologías de anillos (estandarizadas con curva exponencial negativa, NEXP, y con spline de 30 años, SP30) y los valores mensuales (desde enero del año anterior a la formación del anillo hasta diciembre del corriente) de precipitación (P) y temperaturas medias (meanT), obtenidos de estaciones meteorológicas (station) y de cuadrículas E-OBS y CRU.

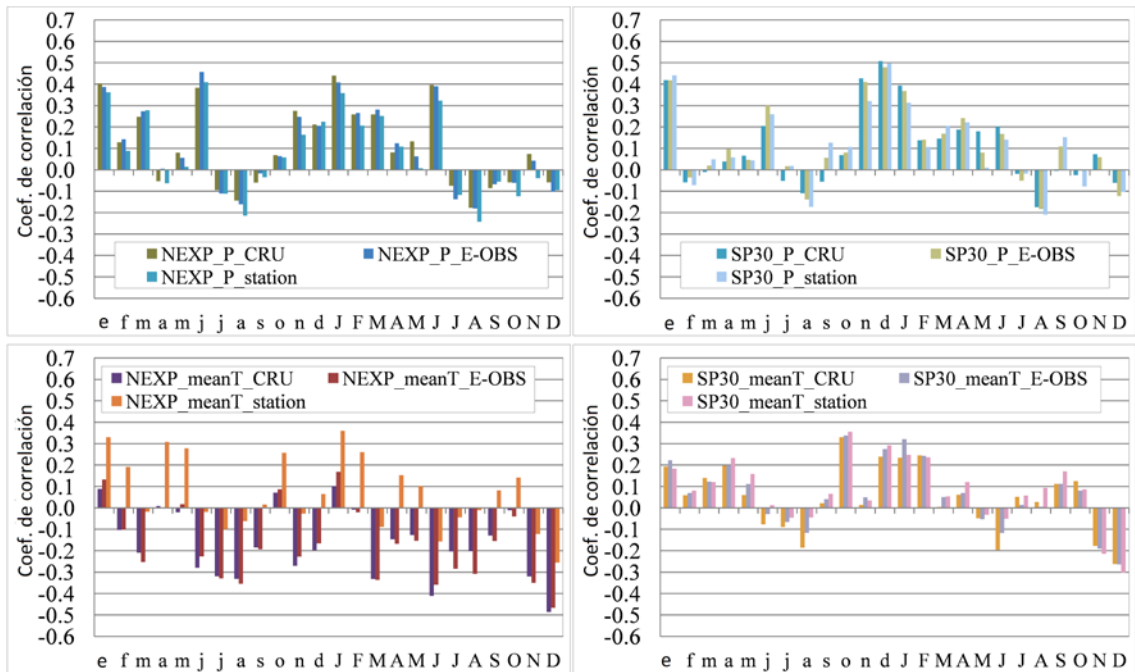


Figura 5. Correlaciones en HNJ entre las cronologías de anillos (estandarizadas con curva exponencial negativa, NEXP, y con spline de 30 años, SP30) y los valores mensuales (desde enero del año anterior a la formación del anillo hasta diciembre del corriente) de precipitación (P) y temperaturas medias (meanT), obtenidos de estaciones meteorológicas (station) y de cuadrículas E-OBS y CRU.

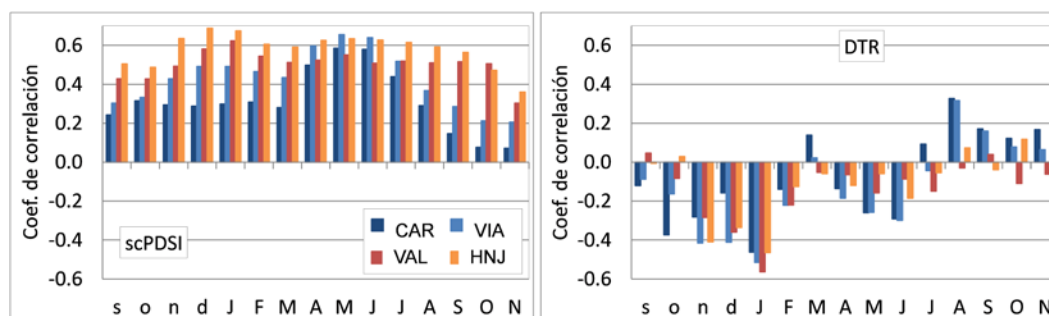


Figura 6. Correlaciones entre las cronologías SP30 y los valores mensuales (desde septiembre del año anterior a la formación del anillo hasta noviembre del año corriente) del índice de sequía de Palmer (scPDSI) y de la variación de las temperaturas diurnas (DTR)

en estas condiciones, la eliminación de la señal no climática se puede obtener con curvas de detrending definidas por modelos que contemplan la existencia del azar en las tendencias de media/baja frecuencia del crecimiento, como curvas spline flexibles (Cook & Briffa, 1990). En VIA y HNJ, las liberaciones debidas a las claras podrían considerarse erróneamente como señales climáticas si un método de detrending conservador como la NEXP fuera elegido para la investigación dendroclimatológica. Por otro lado, en CAR, donde no se observaron efectos de alteraciones selvícolas, las cronologías estandarizadas con los dos métodos son muy parecidas y proporcionan correlaciones con el clima muy similares.

Una posible explicación a las discrepancias entre datos climáticos de distintas fuentes, reflejadas en las correlaciones clima-crecimiento, podría ser la inestabilidad temporal de la calidad de los registros meteorológicos. En el caso de Huelva los registros de temperatura de la estación meteorológica se desviaron de las series CRU y E-OBS en los años 1930, 1940, 1960 y 1980, mientras en las décadas siguientes hubo mayor semejanza (Figura 7). Esto puede ser debido a algún cambio en las características de la estación (p. ej. En las técnicas de registro de los datos, que podrían haber mejorado en décadas recientes). Por otra parte, el aumento reciente de la concordancia entre las series podría ser explicado por una mejora en las estimaciones en las que se basan las cuadrículas. En efecto, éstas proporcionan estimaciones elaboradas a partir de datos reales registrados por las estaciones de una determinada área, cuya disponibilidad puede variar en el tiempo. En Andalucía, el número de registros disponibles creció en el tiempo, especialmente en los últimos 20 años por la instalación de nuevas estaciones por la administración autonómica (Vázquez-Piqué, 2011). Por eso, el incremento de datos climáticos disponibles pudo mejorar las estimaciones en cuadrícula. De todas maneras, el efecto de las discrepancias entre fuentes de datos climáticos en el análisis de correlación clima-crecimiento fue menos acusado en comparación con el efecto de las diferentes curvas de detrending. Otro aspecto a considerar de las estaciones meteorológicas es su cercanía a los sitios de estudio: las distancias entre una misma estación y diferentes rodales (como en el caso de este trabajo, donde se encontró una sola estación cada dos sitios) puede afectar el análisis, mientras las cuadrículas (que en nuestro caso proporcionaron cuatro puntos distintos) pueden proporcionar datos con mayor resolución geográfica, y permitir una caracterización dendroclimática más precisa.

En base a estas consideraciones, una buena aproximación a la investigación dendroclimatológica en nuestras áreas de estudio incluye curvas de detrending flexibles, como la SP30, y datos climáticos de cuadrícula. Con esta aproximación, se observa que los coeficientes de correlación clima-crecimiento más altos se concentran en dos momentos del año (otoño/invierno del año anterior y primavera del corriente) en VIA y CAR, y en uno (otoño/invierno del año anterior) en VAL y HNJ (Natalini et al., 2016).

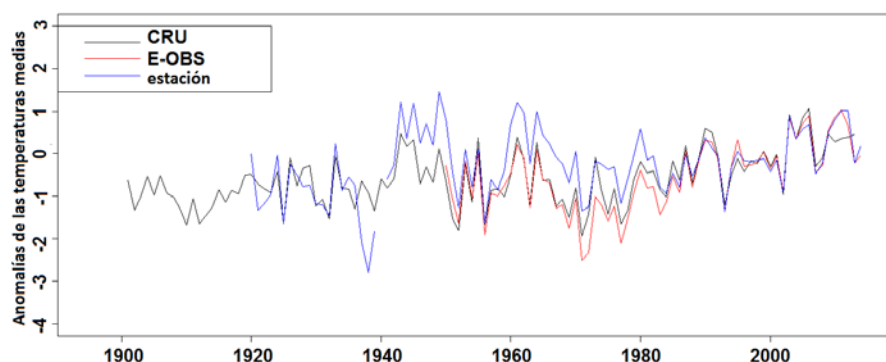


Figura 7. Anomalías de las temperaturas medias en Huelva, a partir de los registros de la estación meteorológica y de los datos de las cuadrículas CRU y E-OBS.

Esta distribución de los coeficientes de correlación, observada con los datos de temperatura y precipitación, se encuentra también en el análisis efectuado con scPDSI y DTR. Esto indica la idoneidad de estos dos parámetros para la investigación dendroclimatológica en estos bosques. Sin embargo, el uso combinado de precipitación y temperatura proporcionó patrones estacionales de los coeficientes de correlación más definidos, y explica satisfactoriamente el crecimiento en los sitios de estudio.

6. Conclusiones

La aproximación dendroclimatológica a las dinámicas forestales requiere una atenta evaluación del método de detrending y de los datos climáticos más apropiados. No existen métodos de detrending universalmente válidos, porque las cronologías procedentes de diferentes rodales, especialmente en bosques afectados por los aprovechamientos forestales, muestran diferentes alteraciones no climáticas que determinan qué método es aplicable y qué señal climática (en qué frecuencia) se puede extraer. Se pueden encontrar incertidumbres en las correlaciones clima-crecimiento debidas a los datos climáticos utilizados, por tanto el tipo, la calidad, la fuente y la validez geográfica de estos datos debería evaluarse también a la hora de examinar la respuesta del crecimiento. Para el estudio de la variabilidad del clima y de la respuesta del crecimiento forestal en bosques gestionados de *P. pinea* en España, una aproximación dendroclimatológica apropiada puede incluir curvas spline flexibles para el detrending y datos climáticos de cuadrícula.

7. Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto “Vulnerabilidad de las masas de *Pinus pinea* ante un escenario de cambio global” (Plan Nacional I+D+i RTA2013-00011-C02-02), Ministerio de Economía y Competitividad, Unión Europea (fondos FEDER) e Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Fabio Natalini recibió una beca del Campus de Excelencia Internacional de Medio Ambiente, Biodiversidad y Cambio Global para realizar una estancia de investigación en el Instituto Federal de Investigación para el bosque, la nieve y el paisaje (WSL, Birmensdorf, Suiza), durante la cual se realizó parte de este trabajo.

8. Bibliografía

- Biondi, F., Qeadan, F., 2008. A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree Ring Res.* 64 (2), 81–96.
- Büntgen, U., Martínez-Peña, F., Aldea, J., Rigling, A., Fischer, E.M., Camarero, J.J., Hayes, M.J., Fatton, V., Egli, S., 2013. Declining pine growth in Central Spain coincides with increasing diurnal temperature range since the 1970. *Global Planet. Change* 107, 177–185

- 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.R., Briffa, K.R. (1990): Data Analysis. En: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (eds.): *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 97-162
- Cook, E.R., Seager, R., Kushnir, Y., Briffa, K.R., Büntgen, U., Frank, D., et al., 2015. Old World megadroughts and pluvials during the Common Era. *Sci. Adv.* 1 (10), e1500561, <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1500561>.
- 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.
- Frank, D., Büntgen, U., Böhm, R., Maugeri, M., Esper, J., 2007. Warmer early instrumental measurements versus colder reconstructed temperatures: shooting at a moving target. *Quat. Sci. Rev.* 26 (25), 3298–3310
- Fritts, H.C. (1976): *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London
- Gea-Izquierdo, G., Viguera, B., Cabrera, M., Cañellas, I. (2014): Drought induced decline could portend widespread pine mortality at the xeric ecotone in managed Mediterranean pine-oak woodlands. *Forest Ecology and Management*: 320:70-82.
- Helama, S., Lindholm, M., Timonen, M., Eronen, M., 2004. Detection of climate signal in dendrochronological data analysis: a comparison of tree-ring standardization methods. *Theor. Appl. Climatol.* 79 (3–4), 239–254.
- Montero, G., Calama R., Ruiz-Peinado, R., 2008. Selvicultura de *Pinus pinea* L. En: Serrada, R., Montero, G., Reque, J.A. (eds.). *Compendio de selvicultura aplicada en España*. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid, Spain, pp. 431-470
- Natalini F., Alejano R., Vázquez-Piqué J., Pardos M., Calama R., Büntgen U., 2016. Spatiotemporal variability of stone pine (*Pinus pinea* L.) growth response to climate across its geographical range in the Iberian Peninsula. *Dendrochronologia* 40, 72-84
- Speer, J.H., 2010. *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press, Tuscon, USA
- Vázquez-Piqué, J.; 2011. Clima. En: Alejano, R., Domingo, J.M., Fernández, M. (eds.). *Manual para la gestión sostenible de las dehesas andaluzas*. 85-107. Foro para la Defensa y Conservación de la Dehesa Encinal y Universidad de Huelva