

## Evaluación del potencial para la reconstrucción multiproxy de episodios de sequía en el noreste de España desde el siglo XVII

M.A. Saz,<sup>1</sup> E. Tejedor<sup>1</sup>, J.M. Cuadrat<sup>1</sup>, M. Barriendos<sup>2</sup>, M. De Luis<sup>1</sup>, R. Serrano<sup>1</sup>, K. Novak<sup>1</sup>, E. Martínez<sup>1</sup>, L.A. Longares<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Instituto Universitario de Ciencias Ambientales. Universidad de Zaragoza. C. Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza.

<sup>2</sup> Facultad de Geografía e Historia. Universidad de Barcelona. C. Montalegre 6, 08.001 Barcelona.

masaz@unizar.es, etejedor@unizar.es

**RESUMEN:** Las sequías son un fenómeno recurrente en la cuenca mediterránea con consecuencias negativas para la sociedad, las actividades económicas y los sistemas naturales. Sin embargo, el estudio de las sequías en España se ha limitado hasta ahora al relativamente corto período instrumental. En este trabajo se presenta el potencial de la dendrocronología para la reconstrucción del índice de precipitación normalizado (SPI) en la Cordillera Ibérica Turolense. Para ello hemos utilizado una red dendrocronológica compuesta por 336 muestras de 169 árboles de 5 especies diferentes de *Pinus sp.* La nueva cronología mostró una elevada y temporalmente estable correlación con el SPI de julio a 12 meses calculado a partir de una serie regional construida con observatorios del entorno. Además, se dispone de una base de datos de rogativas que servirá para corroborar los años de sequías extremas. Conocer e identificar la evolución de las sequías nos permitirá no sólo validar los escenarios de cambio climático proyectados a futuro, sino tratar de adaptar la sociedad a estos posibles cambios.

**Palabras-clave:** Reconstrucción dendroclimática, SPI, Cordillera Ibérica, España.

### 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, existe un alto consenso sobre el posible aumento de la temperatura media del planeta en las próximas décadas. Sin embargo, este consenso no es tan evidente en relación con la señal de la precipitación. Una posible disminución de ésta y un aumento en la frecuencia y magnitud de las sequías se han previsto para la cuenca del Mediterráneo a pesar de que la incertidumbre en las predicciones sigue siendo alta (IPCC, 2013).

El conocimiento sobre la evolución de las sequías en la Península Ibérica es notable, si bien se limita a conocer cuál ha sido su devenir en las últimas cinco o seis décadas (González-Hidalgo et al., 2011). Los trabajos más recientes sugieren que su gravedad ha aumentado en este periodo (Vicente-Serrano et al., 2011; Vicente-Serrano et al., 2014), pero no existe apenas información sobre su evolución en los últimos siglos, algo que nos ayudaría a evaluar la posible excepcionalidad de estos eventos climáticos en las décadas recientes.

La dinámica plurisecular de las temperaturas en el ámbito de la Europa central y del norte es bien conocida gracias a las reconstrucciones paleoclimáticas desarrolladas para los dos últimos milenios (entre otras Büntgen et al., 2005; Pauling et al., 2006; Büntgen et al., 2011). A escala regional, los esfuerzos recientes han aumentado el conocimiento sobre la dinámica de esta variable en el sur de Europa y en particular en la región del Mediterráneo occidental (Creus y Puigdefábregas 1982; Büntgen et al., 2008; Dorado-Liñan et al., 2014). Pero las reconstrucciones de la precipitación y de la evolución de las sequías son más escasas (véase Rodrigo et al., 1999 y Esper et al., 2014 como excepciones más significativas).

En España, la precipitación ha sido recientemente considerada como el elemento más importante no sólo desde el punto de vista climático, sino también porque afecta directamente a las sociedades humanas (disponibilidad de agua, consumo, nivel político, estabilidad social), las actividades económicas (ubicación de las presas, planificación del agua, regadíos, demanda industrial), y los sistemas naturales (estrés hídrico,

incendios, erosión) (de Castro et al., 2005; Randall et al., 2007). Mejorar el conocimiento sobre cómo se ha producido la frecuencia y la intensidad de las sequías en los últimos siglos es, por tanto, crucial para evaluar las tendencias recientes observadas, con el fin de validar los modelos climáticos futuros y ser capaces de adaptar la sociedad a los futuros escenarios de cambio climático (IPCC, 2007; IPCC, 2013).

Las sequías son un fenómeno complejo. Delimitar su inicio y final, su magnitud e intensidad y el área a la que afectan ha llevado a la creación de varios índices. Uno de los más conocidos es el índice de severidad de la sequía de Palmer (PDSI) basado en la precipitación y la temperatura en términos de un modelo de oferta y demanda de la humedad del suelo (Palmer, 1965). Tres reconstrucciones del PDSI se han desarrollado para Europa (Esper et al., 2007; Nicault et al., 2008; Esper et al., 2014). Ampliamente utilizado en las dos últimas décadas es el índice de precipitación normalizado (SPI) se basa en los datos de precipitación mensual y la probabilidad acumulada de un valor de lluvia dado, que ocurra en una estación (McKee et al., 1993). Por lo tanto, puede ser reproducible fácilmente en otras partes del mundo con datos instrumentales. Dos reconstrucciones del SPI se han desarrollado para Europa (Touchan et al., 2005a; Levanić et al., 2013.). En el caso de su aplicación en dendroclimatología, el SPI ha sido reconocido como muy eficaz para identificar los períodos secos en los bosques de pinos más meridionales (Pasho et al., 2011).

El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial de las bases de datos dendroclimáticas existentes en España para abordar por primera vez la reconstrucción del SPI y la posible comparación de los resultados obtenidos con otros proxy, en especial con la información documental (rogativas).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Dendroclimatología

Para este trabajo se han utilizado muestras (anillos de árboles) procedentes de 21 bosques de la zona oriental de la Cordillera Ibérica (CI) de la Península Ibérica (PI) (Fig. 1, Tab. 1). La CI es un sistema montañoso complejo, muy compartimentado y con composiciones litológicas variadas, que se extiende en dirección noreste sureste separando la depresión del Ebro de la Meseta. La mayoría de los 21 bosques utilizados en este estudio se encuentran en las áreas montañosas de mayor altitud, ya que estas son las áreas donde la explotación forestal y el proceso de deforestación han sido más limitados y donde, por lo tanto, podemos encontrar los árboles de mayor edad.

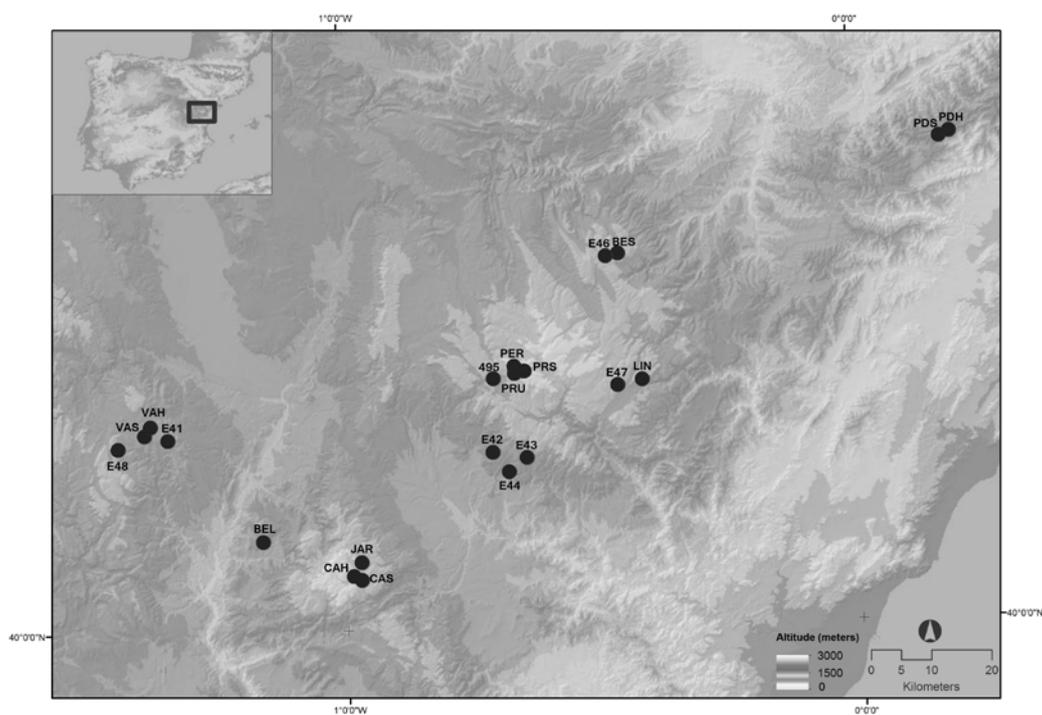


Figura 1. Mapa de localización de los sitios utilizados.

La altitud de las zonas de muestreo oscila entre 1.100 y 2.000 metros, con una altitud media de 1.600 metros sobre el nivel del mar. Los árboles localizados a mayor altitud pertenecen al piso bioclimático Oromediterráneo caracterizado por un clima extremo, con frecuentes y severas heladas en los meses invernales (con un periodo libre de heladas de poco más de un mes) y temperaturas máximas en verano que no es extraño puedan superar en muchas jornadas los 30 °C. La precipitación tiene un carácter equinoccial, con un máximo primaveral más marcado que el otoñal y una estación seca en verano, compensada en agosto y septiembre por las frecuentes precipitaciones de carácter convectivo que condicionan a menudo los totales anuales y por lo tanto la variabilidad interanual de esta variable.

La composición de especies de árboles en la CI es muy variada pero en este estudio se han utilizado únicamente pináceas con una distribución determinada por su plasticidad ecológica y su grado de adaptación a diferentes condiciones bioclimáticas. A menor altitud encontramos *Pinus halepensis*, asociado a climas mediterráneos, mientras que a medida que aumenta la altura son los *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris* los que representan las especies arbóreas dominantes, ya que se adaptan mejor a las condiciones climáticas más frías. Por último, en las mayores elevaciones encontramos *Pinus uncinata*, especie que en la CI tiene su límite sur de distribución en el continente europeo.

## 2.2. Elaboración de la cronología

Para generar la cronología regional se han utilizado un total de 336 muestras y 45.648 anillos de crecimiento de cinco especies de *Pinus* sp.; (*P. sylvestris*, *P. uncinata*, *P. nigra*, *P. halepensis* y *P. pinaster*). Estas muestras provienen de tres fuentes diferentes que constituyen la mayor base de datos dendrocronológica existente para la Cordillera Ibérica. Un primer grupo de 184 muestras de 9 sitios fueron extraídas en las campañas de campo llevadas a cabo entre 2012 y 2013 por el equipo de la Universidad de Zaragoza, donde se muestrearon árboles viejos dominantes y codominantes. Se eligieron árboles sanos sin signos de intervención humana o procesos geomorfológicos que podrían influir en su crecimiento radial. Se extrajeron dos muestras por árbol con barrenas de tipo Pressler a una altura de 1,3 metros y generalmente perpendicular a la pendiente para evitar la madera de compresión. Donde la pendiente era especialmente pronunciada, las muestras fueron tomadas a una altura mayor de lo habitual (1,5-2 m). Las muestras se fijaron en soportes de madera. Posteriormente fueron procesadas con papel de lija progresivamente más fino hasta obtener una superficie pulida que permite identificar los anillos de crecimiento (Stokes y Smiley 1996). A continuación, las muestras se escanearon y se sincronizaron con el software CoRecorder (Cybis Dendrocronología, 2014) para identificar la posición y la datación exacta de cada anillo de crecimiento. Finalmente, el proceso de medición se desarrolló con una mesa LINTAB asociado con el software Científico TsapWin (Rinn, 2005) dando una precisión de 0,01 mm para la anchura de cada anillo. El control de calidad de la sincronización se realizó utilizando el programa COFECHA (Holmes, 1983).

Un conjunto adicional de 101 muestras de 8 sitios se descargó del International Tree Ring Databak (ITRDB, <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/tree-ring>). Son muestras extraídas durante la década de 1980 por K. Richter y sus colaboradores. Por último, 4 sitios adicionales que incluyen 51 muestras fueron proporcionados por el proyecto CLI96-1862 (Creus et al., 1992; Genova et al., 1993; Manrique y Fdez Cancio 2000; Saz, 2003).

Para la conservación de la variabilidad interanual y con el fin de eliminar la tendencia biológica en el crecimiento radial de los árboles todas las series de medición procedentes de los tres conjuntos de datos se estandarizaron usando el paquete de estandarización dplR (Zang, 2009), ejecutado en R (R Desarrollo Core Team 2014). A cada serie de crecimiento se le aplicó una función spline con una respuesta de frecuencia de corte del 50% y ajustándose al 0,67 de la extensión de cada serie (Cook y Briffa 1990). Para generar la cronología regional (TRires) se obtuvieron los residuales de la cronología estándar (Cook y Peters 1997).

Para validar la robustez de la cronología para la posterior reconstrucción climática se calculó el Express Populaiton Signal (EPS) y la correlación Interseries (RBAR). La EPS proporciona una estimación del grado en el que una cronología media basada en un número finito de árboles expresa una hipotética perfecta cronología (Cook et al., 2011). Los valores iguales o superiores a 0,85 se consideran adecuados para la reconstrucción climática (Wigley et al., 1984). El RBAR estima que porcentaje de la varianza es común entre las series (Fig. 2).

## 2.3. Los datos climáticos instrumentales, la calibración con la cronología y la evaluación dendroclimática

Para la elaboración de la serie climática regional que se calibraría con la cronología, se utilizaron un total de 30 estaciones de temperatura y precipitación del entorno de la Cordillera Ibérica Turolense. Los

datos fueron facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y proceden de la base de datos climáticos generada en el Atlas Climático de Aragón (Cuadrat et al., 2007). Con esa base de datos termoplumiométrica se generó una serie regional, centrada en Teruel, mediante una media ponderada por la distancia que abarca el periodo 1950-2010.

**Tabla 1.** Lista de cronologías.

| Código | Localización    | Fuente   | Lat (N) | Long  | Elevación | Especies             | Árboles    | Muestras   | Número de anillos | Edad      |
|--------|-----------------|----------|---------|-------|-----------|----------------------|------------|------------|-------------------|-----------|
| 495    | A.de la Selva   | ITRDB    | 40.38   | -0.69 | 1980      | <i>P. uncinata</i>   | 5          | 11         | 1101              | 1820-1977 |
| BEL    | Bellena         | IPE-CSIC | 40.14   | -1.16 | 1100      | <i>P. nigra</i>      | 11         | 22         | 5843              | 1584-1993 |
| BES    | Castillo de B.  | UNIZAR   | 40.56   | -0.46 | 1700      | <i>P. sylvestris</i> | 11         | 22         | 2709              | 1837-2012 |
| CAH    | C. de la Sierra | UNIZAR   | 40.08   | -0.99 | 1600      | <i>P. halepensis</i> | 7          | 14         | 556               | 1939-2012 |
| CAS    | C. de la Sierra | UNIZAR   | 40.10   | -1.00 | 1800      | <i>P. sylvestris</i> | 12         | 25         | 4084              | 1719-2012 |
| E41    | Albarracín      | ITRDB    | 40.29   | -1.34 | 1225      | <i>P. pinaster</i>   | 9          | 18         | 2051              | 1836-1985 |
| E42    | Fuenterarices   | ITRDB    | 40.26   | -0.71 | 1450      | <i>P. nigra</i>      | 2          | 4          | 1078              | 1681-1984 |
| E43    | Pradillo        | ITRDB    | 40.26   | -0.65 | 1650      | <i>P. sylvestris</i> | 3          | 6          | 610               | 1865-1985 |
| E44    | Las Roquetas    | ITRDB    | 40.23   | -0.68 | 1475      | <i>Pinus nigra</i>   | 10         | 21         | 3199              | 1681-1985 |
| E46    | Cantavieja      | ITRDB    | 40.55   | -0.48 | 1750      | <i>P. sylvestris</i> | 9          | 18         | 2100              | 1844-1985 |
| E47    | Villarluengo    | ITRDB    | 40.36   | -0.46 | 1500      | <i>P. nigra</i>      | 9          | 17         | 2195              | 1829-1985 |
| E48    | Valdecuena      | ITRDB    | 40.28   | -1.44 | 1550      | <i>P. sylvestris</i> | 4          | 6          | 535               | 1891-1985 |
| JAR    | Javalambre      | IPE-CSIC | 40.10   | -0.97 | 1800      | <i>P. sylvestris</i> | 9          | 16         | 5106              | 1503-1992 |
| LIN    | Mosqueruela     | IPE-CSIC | 40.37   | -0.42 | 1450      | <i>P. nigra</i>      | 4          | 8          | 1730              | 1658-1993 |
| PDH    | Pinar de Pla    | UNIZAR   | 40.73   | 0.20  | 1200      | <i>P. halepensis</i> | 4          | 8          | 1233              | 1831-2013 |
| PDS    | Pinar de Pla    | UNIZAR   | 40.72   | 0.18  | 1250      | <i>P. sylvestris</i> | 8          | 16         | 1293              | 1865-2012 |
| PER    | Peñarroya       | IPE-CSIC | 40.38   | -0.65 | 1950      | <i>P. uncinata</i>   | 3          | 5          | 1239              | 1690-1992 |
| PRS    | Peñarroya       | UNIZAR   | 40.39   | -0.67 | 1950      | <i>P. sylvestris</i> | 7          | 13         | 1664              | 1830-2011 |
| PRU    | Peñarroya       | UNIZAR   | 40.38   | -0.67 | 2000      | <i>P. uncinata</i>   | 15         | 30         | 3303              | 1711-2011 |
| VAH    | Valdecuena      | UNIZAR   | 40.31   | -1.38 | 1650      | <i>P. halepensis</i> | 15         | 31         | 2497              | 1879-2012 |
| VAS    | Valdecuena      | UNIZAR   | 40.30   | -1.39 | 1600      | <i>P. sylvestris</i> | 12         | 25         | 1522              | 1916-2102 |
|        |                 |          |         |       |           | <b>Totales</b>       | <b>169</b> | <b>336</b> | <b>45648</b>      |           |

Además, también se utilizaron para la calibración con la cronología los datos del Climatic Research Unit (CRU TS v.3.22), que abarca el período de 1901 a 2012 y tiene una resolución de 0,5° x 0,5° para toda la Península Ibérica (Harris et al., 2014). Debido a las dimensiones de la zona de estudio, se utilizaron los promedios de los puntos de la tres cuadrículas incluidas en el área de estudio para la generación de una serie regional.

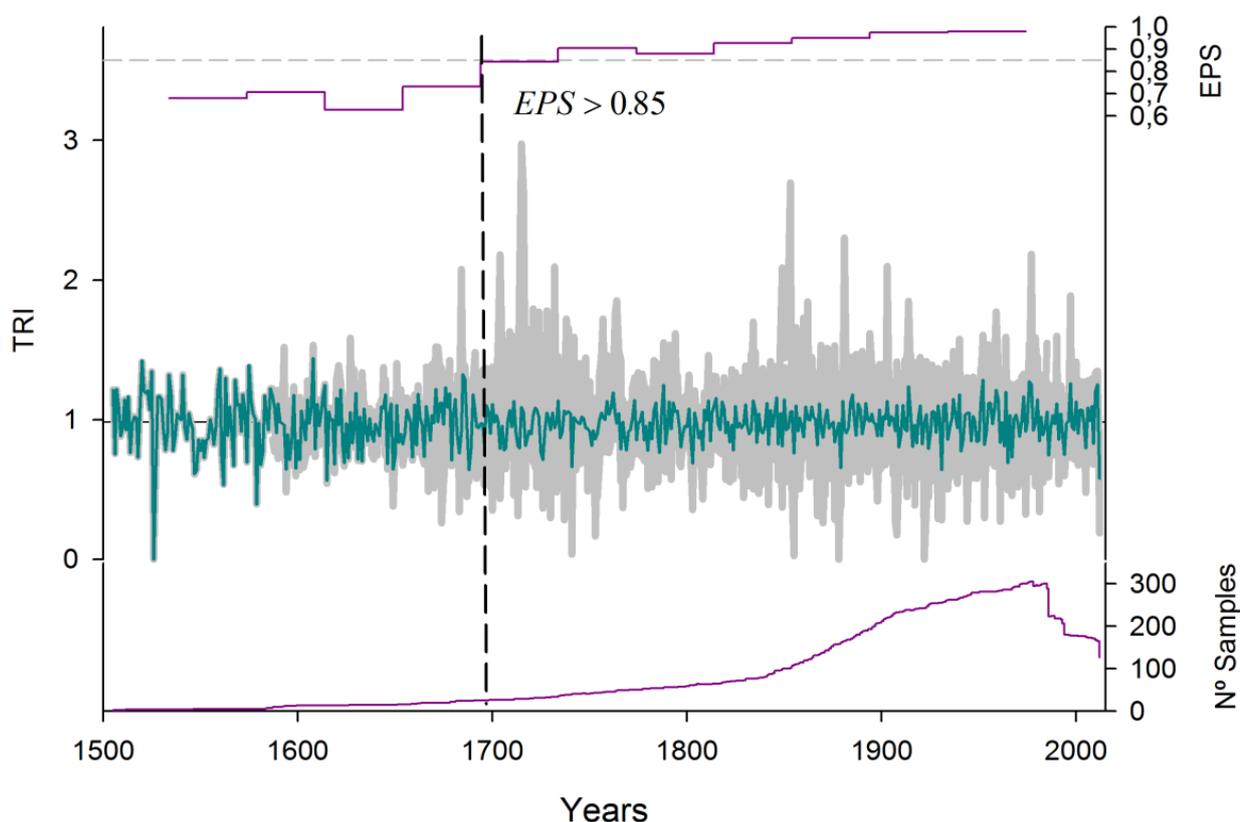
Con las dos datos climáticos instrumentales y los interpolados (CRU TS v.3.22) se calculó el Standardize Precipitation Index (SPI) para el periodo 1950-2010 con una escala temporal de 1 a 24 meses. El SPI (McKee et al. 1993) se utilizó para caracterizar los períodos de sequía a lo largo de la CI. La cronología residual se correlacionó con el SPI de 1 a 24 meses con las dos series climáticas regionales con el fin de evaluar la influencia de las sequías sobre el crecimiento de anillos de árboles.

### 3. RESULTADOS

Con la base dendrocronológica existente para la zona de estudio, uniendo en la misma los datos del ITRDB, del equipo de UNIZAR y de proyectos anteriores, se ha generado una cronología de 511 años (Fig.2) para la Cordillera Ibérica oriental que abarca el período de tiempo 1503-2013.

La cronología se basa en 336 series de crecimiento de cinco especies diferentes *Pinus* sp. La edad promedio de los árboles analizados fue de 134 años, con un mínimo de 20 años y un máximo de 489 años. La sensibilidad media fue de 1.529, el coeficiente de correlación (RBAR) inter series es de 0,28 mientras que la correlación entre las series es de 0.79. La varianza explicada por el primer componente principal es de 33,58% mostrando que la mayoría de la variabilidad puede deberse a un solo factor. Se utilizó el valor de 0,85 en el índice EPS para definir el valor umbral para la reconstrucción (Wigley et al., 1984). Por lo tanto, la cronología utilizada para la potencial reconstrucción se inicia en el año 1694 y termina en el año 2012, abarcando 318 años.

La cronología residual (TRIres) se correlacionó con el índice SPI de 1 a 24 meses tanto con la serie instrumental regional como con la serie regional con datos del CRU para el período 1950-2010. A pesar de que la señal siguió un patrón similar con ambas fuentes, la serie instrumental regional siempre mostró coeficientes de correlación más altos (Fig. 3). La señal más consistente se observó para el periodo de 10 a 14 meses de julio y agosto ( $r > 0,6$ ). Atendiendo a la alta correlación ( $r > 0.64$ ) de la cronología con el SPI12 de julio existe un potencial muy elevado para la generación de una reconstrucción del índice de sequía (SPI) para la Cordillera Ibérica en la que identificar no sólo los años extremos tanto de sequías como de precipitación, sino también los periodos húmedos o secos a lo largo de 318 años.



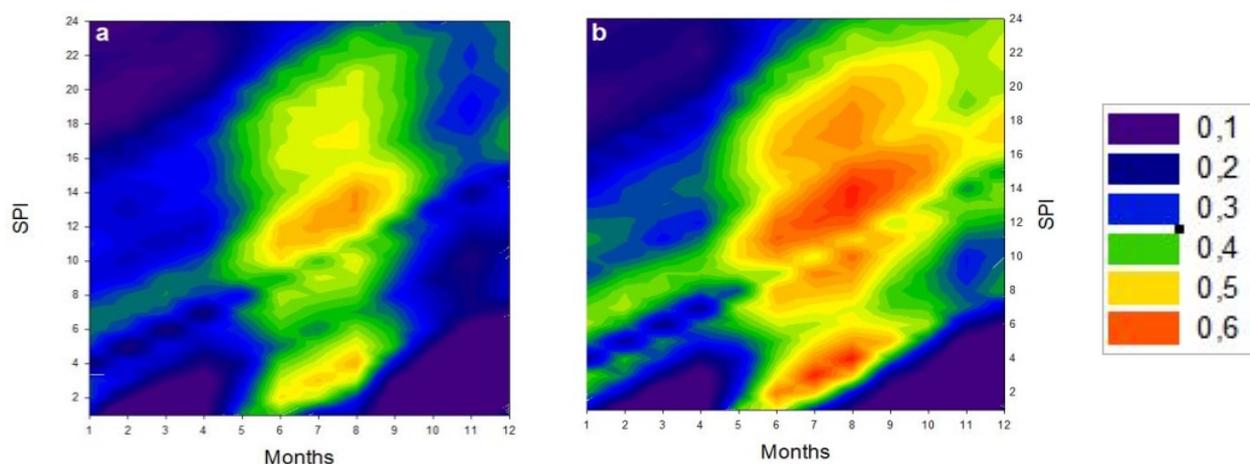
**Figura 2.** Cronología, número de muestras y valor del EPS.

### 4. DISCUSIÓN

Estudios paleoclimáticos muestran que las sequías son un fenómeno frecuente en toda la región mediterránea con enormes consecuencias ambientales y socioeconómicas (Martín-Vide y Barriendos 1995; Rodrigo et al., 1999). Además, la información sobre estos eventos a través de los siglos pasados, sobre todo en la Pequeña Edad de Hielo (PEH), es escasa. Aunque hay algunas referencias respecto a la evolución de precipitaciones durante este período (Nesje y Dahl 2003), hay mucha más información relacionada con la

temperatura.

Por primera vez y basado en 336 series de crecimiento de anillos de árboles, hemos desarrollado una cronología que permitirá la reconstrucción SPI de 318 años, lo cual la convertiría en la primera realizada en el sur de Europa. Así mismo, podría compararse con otras reconstrucciones del SPI generadas en Turquía (Touchan et al., 2005a) y Rumania (Levanic et al., 2013).



**Figura 3.** Correlación entre la cronología y el SPI obtenido a partir de los datos del CRU (a) y con los datos instrumentales (b).

La potencial reconstrucción sería de 318 años debido a un valor por debajo de 0.85 EPS en los primeros años de la cronología. Por tanto, con el fin de reconstruir las sequías para todo el evento de la Pequeña Edad de Hielo se necesitan más muestras de árboles vivos. Además, según lo sugerido por Esper et al., 2014, combinar las muestras de árboles vivos con muestras procedentes de las estructuras históricas permitiría extender la reconstrucción más allá del último milenio.

Nuestra cronología también tiene una buena correlación con los valores de SPI en escalas de tiempo más corto (agosto SPI a 4 meses) y muestra la fuerte influencia que la precipitación de finales de primavera y verano tiene en el crecimiento de *Pinus sp* en el área de estudio. Sin embargo, la correlación SPI12 de julio tiene una mayor consistencia y no sólo nos aporta información del año hidrológico completo, sino que también está apoyada por la fuerte influencia ejercida por el almacenamiento de nutrientes en el año anterior en el crecimiento del año siguiente (Levanic et al., 2013).

En relación con el período de correlación, somos conscientes de las limitaciones del corto periodo elegido con sólo 60 años de datos instrumentales. Sin embargo, la distribución general de los observatorios meteorológicos en España no comenzó hasta mediados del siglo XX (González-Hidalgo et al., 2011). Por lo tanto, a pesar de que el conjunto de datos CRU abarca el período 1901-2012, los primeros 50 años hubo una muy baja densidad de observatorios instrumentales que no cumplían las condiciones climáticas específicas de la zona de estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el Gobierno de España (CGL2011-28255) y el Gobierno de Aragón mediante el programa de grupos de investigación (grupo “Clima, agua, cambio global y sistemas naturales” BOA 147 de 18-12-2002) y fondos FEDER. Además, Ernesto Tejedor disfruta de una beca predoctoral concedida por el gobierno de Aragón 2012-2016.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Briffa, K. and P. , Jones, (1990): Basic chronology statistics and assessment. In *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, edited by E.Cook, and L. Kairiukstis, Kluwer Academic, Dordrecht; 137-152.

- Büntgen, U., Esper, J., Frank, D.C., Nicolussi, K., Schmidhalter, M. (2005): A 1052-year tree-ring proxy for Alpine summer temperatures *Climate Dynamics*, 25 (2-3), 141-153.
- Büntgen, U., Frank, D., Grudd, H., Esper, J. (2008): Long-term summer temperature variations in the Pyrenees *Climate Dynamics*, 31 (6), 615-631. DOI 10.1007/s00382-008-0390-x.
- Büntgen, U., Brázdil, R., Frank, D., Esper, J. (2010): Three centuries of Slovakian drought dynamics. *Clim Dyn* 35(2):315–329. doi:10.1007/s00382-009-0563-2.
- Cook, E.R., Peters, K. (1997): Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *Holocene* 7:361–370.
- Cook, E.R., Briffa, K., Shiyatov, S., Mazepa, V., (1990): Tree-ring standardization and growth trend estimation. In: Cook ER, Kairiukstis LA (eds) *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 104–162.
- Creus, J., and Puigdefabregas J., (1982): Climatología histórica y dendrocronología de *Pinus uncinata* R., *Cuadernos de Investigación Geográfica* 2(2): 17-30.
- Creus, J., Génova, M., Fernandez Cancio, A., Perez Antelo, A. (1992): New dendrochronologies for Spanish Mediterranean Zone. *Lundqua Report* 34: 76-78.
- De Castro, M., Martín-Vide, J., Alonso, S. (2005): El clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. In: Moreno Rodriguez JM. (Ed). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 1-65.
- Esper, J., Frank, D., Büntgen, U., Verstege, A., Luterbacher, J., Xoplaki, E., (2007): Long-term drought severity variations in Morocco. *Geophysics Research Letters* 34(17):L17702. doi:10.1029/2007gl030844.
- Esper, J., Großjean, J., Camarero, J.J., García-Cervigón, A.I., Olano, J.M., González-Rouco, J.F., Domínguez-Castro, F., Büntgen, U. (2014): Atlantic and Mediterranean synoptic drivers of central Spanish juniper growth. *Theoretical and Applied Climatology*.
- Fritts, H.C., Guiot, J., Gordon, G.A., Schweingruber, F.H. (1990): Methods of calibration, verification, and reconstruction. In *Methods of Dendrochronology*.
- Génova, M., Fernández Cancio, A., Creus, J. (1993): Diez series medias de anillos de crecimiento en los sistemas Carpetano e Ibérico. *Investigación agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 2, 151-172.
- Gonzalez-Hidalgo, J.C., Brunetti, M. and de Luis, M. (2011): A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945–November 2005). *Int. J. Climatol.* 31 715–31.
- Dorado Liñán, I., Zorita, E., González-Rouco, J.F., Heinrich, I., Campello, F., Muntán, E., Andreu-Hayles, L., Gutiérrez, E (2014): Eight-hundred years of summer temperature variations in the southeast of the Iberian Peninsula reconstructed from tree rings. *Climate Dynamics*.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J., Lister, D.H. (2014): Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34 (3), 623-642.
- Holmes, R.L., (1983): Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull* 43:69–78.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Levanič, T., Popa, I., Poljanšek, S., Nechita, C. (2013): A 323-year long reconstruction of drought for SW Romania based on black pine (*Pinus Nigra*) tree-ring widths, *International Journal of Biometeorology*, 57 (5), 703-714.

- Manrique, E., Fernandez-Cancio, A. (2000): Extreme climatic events in dendroclimatic reconstructions from Spain. *Climatic Change*, 44 (1-2), 123-138.
- Martín-Vide, J., Vallvé, M.B. (1995): The use of rogation ceremony records in climatic reconstruction: a case study from Catalonia (Spain). *Climatic Change*, 30 (2), 201-221.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kliest, J. (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, USA, 17–22. American Meteorological Society, Boston, MA, USA, 179–184.
- Nesje, A., Dahl, S.O. (2003): The 'Little Ice Age' - Only temperature?. *Holocene*, 13 (1), 139-145.
- Nicault, A., Alleaume, S., Brewer, S., Carrer, M., Nola, P., Guiot, J. (2008): Mediterranean drought fluctuation during the last 500 years based on tree-ring data. *Climate Dynamics* 31(2):227–245. doi:10.1007/s00382-007-0349-3.
- Palmer, W.C. (1965): *Meteorological drought*. Research Paper 45, US Dept. Commerce, Washington.
- Pasho, E., Camarero, J.J., de Luis, M., Vicente-Serrano, S.M., (2011): Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (12), 1800-1811.
- Pauling, A., Luterbacher, J., Casty, C., Wanner, H., (2006): Five hundred years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation. *Clim Dyn* 26 (4):387–405. doi:10.1007/s00382-005-0090-8.
- R Core Team (2014) *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Rinn, F. (2005): *TSAPWinTM – Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications*, Version 4.69.
- Rodrigo, F.S., Esteban-Parra, M.J., Pozo-Vázquez, D., Castro-Díez, Y. (1999): A 500-year precipitation record in Southern Spain *International Journal of Climatology*, 19 (11), 1233-1253.
- Saz, M.A., (2003): *Análisis de la evolución del clima en la mitad septentrional de España desde el siglo XV a partir de series dendroclimáticas*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1105 pp.
- Stokes, M.A., Smiley, T.L. (1968): *An introduction to tree-ring dating*. 2nd edn. The University of Arizona Press, Tucson.
- Touchan, R., Funkhouser, G., Hughes, M., Erkan, N. (2005a): Standardized precipitation index reconstructed from Turkish tree-ring widths. *Climatic Change* 72(3):339–353. doi:10.1007/s10584-005-5358-9.
- Touchan, R., Akkemik, Ü., Hughes, M.K., Erkan, N. (2007): May-June precipitation reconstruction of southwestern Anatolia, Turkey during the last 900 years from tree rings. *Quat Res* 68(2):196–202.
- Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Morán, E., Azorín-Molina, C. (2011): Effects of warming processes on droughts and water resources in the NW Iberian Peninsula (1930–2006). *Climate Research*, 31: 2102–2114.
- Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., Espejo, F. (2014): Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9 (4), art. no. 044001.
- Wigley, T.M.L., Briffa, K., Jones, P.D. (1984): On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201–213.
- Zang, C. (2009): *BootRes: The bootRes package for bootstrapped response and correlation functions*. R package, 1st edn. [www.Rproject.org](http://www.Rproject.org). Accessed 14 March 2014.