

# POTENCIAL DENDROCLIMÁTICO DE LA MADERA TEMPRANA Y TARDÍA DE *Pinus cooperi* Blanco

## DENDROCLIMATIC POTENTIAL OF EARLYWOOD AND LATEWOOD IN *Pinus cooperi* Blanco

Marín Pompa-García<sup>1</sup>\* y J. Julio Camarero-Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Forestales, UJED. Bulevard Durango y Papaloapan s/n. Colonia Valle del Sur. 34120. Durango, Durango. México. (marinpompagarcia@gmail.com). <sup>2</sup>ARAID-Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Avenida Montaña 1005, 50080 Zaragoza, España.

### RESUMEN

La variación intra-anual del anillo de crecimiento contiene señales climáticas estacionales que representan registros valiosos en paleoclimatología y que podrían ayudar a entender mejor los mecanismos de respuesta del árbol. El objetivo de este estudio fue modelar la respuesta de la madera temprana (*EW*) y la tardía (*LW*) ante variables climáticas del crecimiento radial de *Pinus cooperi* Blanco. Mediante series dendrocronológicas de *EW* y *LW* se establecieron análisis de correlación con registros instrumentales mensuales de precipitación (*P*), temperatura máxima (*Tmax*), media (*Tmed*), mínima (*Tmin*) y teleconexiones atmosféricas de gran escala, expresadas por el Índice multivariado de la Oscilación atmosférica austral de “El Niño” (*ENSO-MEI*; por sus siglas en inglés) para el período 1964-2010. La madera temprana y la tardía presentaron correlaciones significativamente diferentes. La madera temprana es más sensible a las lluvias del invierno previo a la estación de crecimiento; la madera tardía se asoció mejor al fenómeno atmosférico de acuerdo con sus valores *MEI*. Este diferencial en la respuesta de ambos tipos de madera representa el potencial dendroclimático de *P. cooperi*, el cual tiene implicaciones ante las variaciones climáticas locales.

**Palabras clave:** *Pinus cooperi*, incremento radial, relaciones clima-árbol, dendrocronología, madera temprana, madera tardía.

### INTRODUCCIÓN

La sensibilidad de los ecosistemas forestales ante el cambio climático fue documentado por Sáenz-Romero *et al.* (2011, 2012). La sequía es un componente de ese cambio que puede afectar el crecimiento de los bosques en proporción mayor (Sheffield *et al.*, 2012). El estudio de la respuesta de

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: septiembre, 2014. Aprobado: febrero, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 49: 177-187. 2015.

### ABSTRACT

Intra-annual variation of the growth ring contains seasonal climate signals that represent valuable records of paleoclimatology and can help better understand tree response mechanisms. The objective of this study was to model the response of earlywood (*EW*) and latewood (*LW*) to climatic variables in *Pinus cooperi* Blanco. Using dendrochronological series of *EW* and *LW*, correlation analyses were established with monthly instrumental registers of precipitation (*P*), maximum temperature (*Tmax*), mean temperature (*Tmed*), minimum temperature (*Tmin*) and large-scale atmospheric teleconnections expressed by the Multivariate “El Niño” Southern Oscillation Index (*ENSO-MEI*) for the period 1964-2020. Earlywood and latewood had different significant correlations. Earlywood is more sensitive to winter rains before the growing season. Latewood was better associated to the *ENSO-MEI* values. This difference in the response of the two types of wood represents the dendroclimatic potential of *P. cooperi*, which has implications in the face of local climatic variables.

**Key words:** *Pinus cooperi*, radial increment, climate-tree relationships, dendrochronology, earlywood, latewood.

### INTRODUCTION

Sensitivity of forest ecosystems to climate change was documented by Sáenz-Romero *et al.* (2011, 2012). Drought is a component of this change that can affect forest growth in greater proportion (Sheffield *et al.*, 2012). The study of forest response to individual climatic variables is a prerequisite to understanding ecological processes. Tree responses depend largely on its functional conditions and on the local characteristics of the site (Pompa-García *et al.*, 2013). For this reason, dendrochronology is a useful science for the study of those responses in

los bosques ante las variables climáticas individuales, es un prerrequisito para entender los procesos ecológicos. Las respuestas del árbol dependen en gran medida de sus condiciones funcionales y de las características locales del sitio (Pompa-García *et al.*, 2013), por lo cual la dendrocronología es una ciencia útil para estudiar esa respuesta en forma de cambios en el crecimiento radial (Fritts, 1976). A través del análisis de los anillos anuales de crecimiento se puede establecer una correspondencia cronológica con variables ambientales de larga temporalidad (Stahle *et al.*, 2011).

No obstante, las variaciones de crecimiento en respuesta al clima también pueden caracterizarse estacionalmente (Griffin *et al.*, 2011), en particular en zonas como el norte de México donde la precipitación muestra un patrón claramente estacional (Pompa-García y Jurado, 2013). Los dendrocronólogos se enfocan ahora al estudio de las interrelaciones climáticas de la madera temprana (early wood, abreviada *EW*) y tardía (late wood, abreviada *LW*). La variación intra-anual del anillo de crecimiento contiene señales climáticas estacionales que pueden estudiarse cuantificando la variabilidad en el espesor de la *EW* y la *LW*. Lo anterior representa un valioso registro en paleoclimatología que podría ayudar a entender mejor los mecanismos de respuesta del árbol (Griffin *et al.*, 2013; Meko *et al.*, 2013; Camarero *et al.*, 2014).

La especie *Pinus cooperi* C.E. Blanco es endémica y dominante en la sierra madre occidental del norte mexicano (González-Elizondo *et al.*, 2007; Cruz *et al.*, 2008). Su amplitud ecológica provee una buena oportunidad para evaluar su potencial dendroclimático y dendroecológico en una escala temporal estacional. Los bosques de esta especie también representan un componente ecológico muy valioso para monitorear la sensibilidad climática ante escenarios climáticos y ecológicos diversos (IPCC, 2007; Williams *et al.*, 2013).

El objetivo de este estudio fue analizar las respuestas de las variaciones en el espesor de la *EW* y la *LW* de *P. cooperi* ante variables climáticas, para determinar su potencial dendroclimático. La hipótesis fue la existencia de diferencias estadísticas en la sensibilidad climática de ambas variables con implicaciones funcionales para el árbol.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localizó en la Sierra Madre Occidental del estado de Durango, México (24°8'27" N, 105°3'18" O

terms of changes in radial growth (Fritts, 1976). By analyzing annual growth rings, a chronological correspondence to long-term environmental variables can be established (Stahle *et al.*, 2011).

Nevertheless, variations in growth in response to climate can also be characterized seasonally (Griffin *et al.*, 2011), particularly in regions such as northern Mexico, where precipitation exhibits a clearly seasonal pattern (Pompa-García and Jurado, 2013). Dendrochronologists today focus on the study of climate interrelationships of earlywood (*EW*) and latewood (*LW*). Intra-annual variation of growth rings provides seasonal climate signals that can be studied by quantifying the variability in the *EW* and *LW* thickness. This variation is a valuable paleoclimatological record that could help to improve understanding of tree response mechanisms (Griffin *et al.*, 2013; Meko *et al.*, 2013; Camarero *et al.*, 2014).

The species *Pinus cooperi* C.E. Blanco is endemic and dominant in the Sierra Madre Occidental in northern Mexico (González-Elizondo *et al.*, 2007; Cruz *et al.*, 2008). Its ecological amplitude provides a good opportunity to evaluate its dendroclimatic and dendroecological potential at a seasonal scale. Forests of this species also represent a very valuable ecological component in monitoring sensitivity to climate in the face of diverse climate and ecological scenarios (IPCC, 2007; Williams *et al.*, 2013).

The objective of this study was to analyze the responses of thickness variations of *EW* and *LW* of *P. cooperi* to climate variables to determine its dendroclimatic potential. The hypothesis was the existence of statistical differences in sensitivity of the two variables to climate with functional implications for the tree.

## MATERIALS AND METHODS

The study area is located in the Sierra Madre Occidental in the state of Durango, Mexico (24° 8' 27" N, 105° 3' 18" W and 24° 4' 43" N, 105° 1' 15" W with an average altitude of 2362 m). Predominantly pine and oak forest cover, hilly topography and temperate subhumid climate with dry summers influenced by monsoons characterize the region (Figure 1).

To highlight the climate sign in the growth series, ten dominant relatively isolated *P. cooperi* trees were selected. The sites had low productivity, 5 % slope and SE exposure. Diameter at breast height (1.3 m) averaged 47.1 cm. At that height,

y 24°4'43" N, 105°1'15" O, y una altitud promedio de 2362 m). Esta región se caracteriza por la cobertura de un bosque predominante de pinos y encinos, con topografía accidentada y un clima templado subhúmedo con verano seco y húmedo debido a la influencia monzónica (Figura 1).

Para resaltar la señal climática en las series de crecimiento se seleccionaron 10 árboles dominantes relativamente aislados de *P. cooperi*. Los sitios fueron de baja productividad, pendiente (5 %) y exposición SE. El diámetro medio a 1.3 m promedió 47.1 cm; además se extrajeron de cada árbol a 1.3 m de altura dos o tres núcleos de crecimiento usando taladros Pressler (Haglof, Suecia). El tamaño mínimo de muestra se determinó con el estadístico EPS, (señal específica de la población, abreviada EPS) recomendada para estudios paleoclimáticos (Mérián *et al.*, 2013). En la muestra se evitaron árboles dañados, enfermos y deformes, así como aquellos cuyo crecimiento pudiera estar sujeto a la competencia por luz y nutrientes.

Las muestras de madera se pulieron con lijas de granulometría progresiva de gruesa a fina (120 a 1200) para resaltar sus

two or three cores were extracted from each tree using Pressler increment borers (Haglof, Sweden). The minimum sample size was determined when the EPS > 0.85; this statistic (Expressed Population Signal) is recommended for dendroclimatic studies (Mérián *et al.*, 2013). Damaged, sick and deformed trees, as well as those whose growth might have been subject to competition for light and nutrients, were avoided in sampling.

The samples were polished with progressively finer (120 to 1200) sandpaper to highlight the growth rings. The rings were visually cross-dated following Stokes and Smiley (1968) in the Dendrochronology Laboratory of INIFAP-CENID-RASPA in Gómez Palacio, Durango. EW and LW widths were measured with a precision of 0.001 mm with a computer-integrated sliding stage under a stereomicroscope (Velmex Inc., NY). For this study, EW was defined as the growth ring component that is light-colored and less dense, whereas LW corresponded to the dark-colored more dense structure that is visibly discernible at the lastly formed edge of the growth ring (Griffin *et al.*, 2011). Precision of dating and measurements was verified

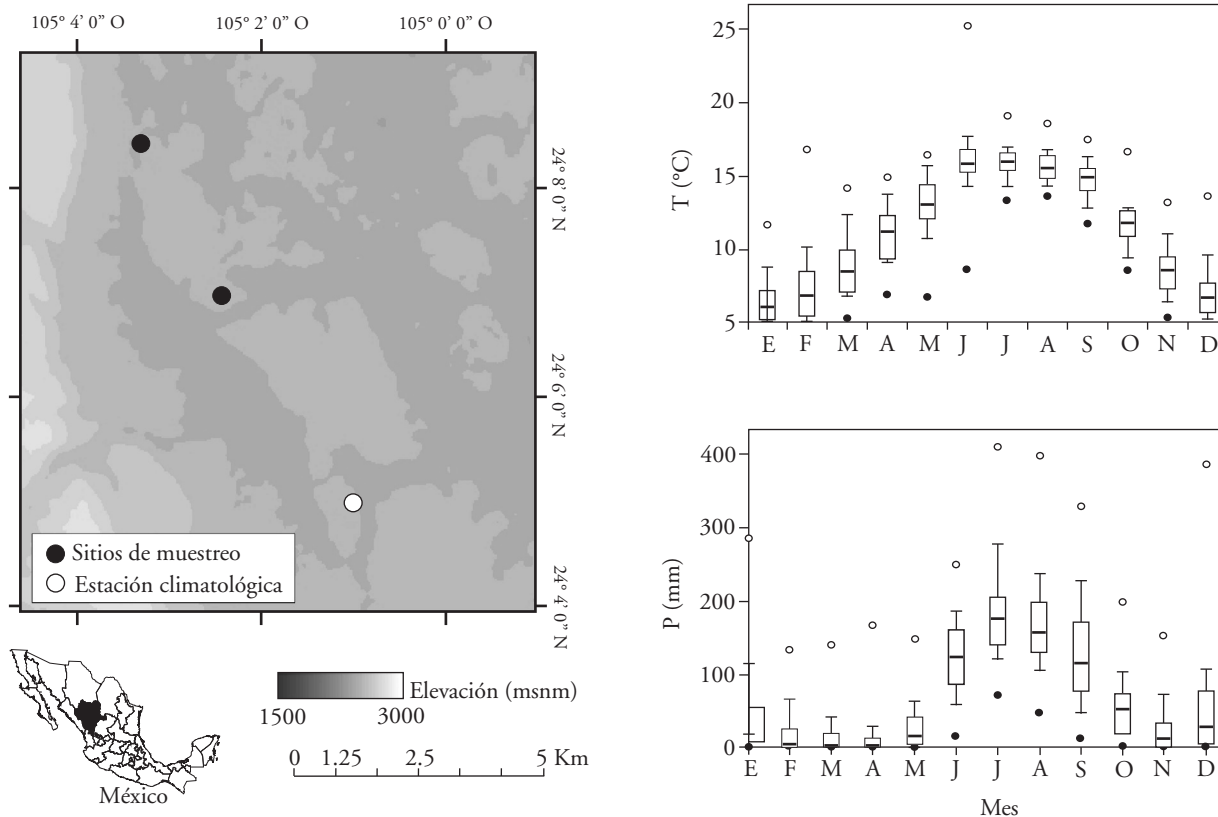


Figura 1. Localización del área de estudio y las condiciones climáticas mensuales (*T*, temperatura y *P*, precipitación) que prevalecen.

Figure 1. Location of the study area and prevailing monthly climate conditions (*T*, temperature and *P*, precipitation).

crecimientos. Los anillos se contaron y fecharon con el procedimiento estándar de técnicas dendrocronológicas (Stokes y Smiley, 1968) en el laboratorio de Dendrocronología del INIFAP CENID-RASPA en Gómez Palacio, Durango. El crecimiento de *EW* y *LW* se midió con una precisión de 0.001 mm, con un estereomicroscopio integrado a una computadora (Velmex Inc., NY). Para este estudio, *EW* se definió como el componente del anillo de crecimiento de color claro y menos denso, mientras que *LW* correspondió a la estructura de color oscuro y más densa que visualmente es discernible al final del anillo de crecimiento (Griffin *et al.*, 2011). La precisión del fechado y de las mediciones se verificaron con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con el clima se eliminaron usando el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1984). Las series se ajustaron a una función cúbica de tipo spline con 50 % de frecuencia de respuesta a 64 años. Esta función fue lo suficientemente flexible como para reducir la variabilidad no climática, preservando la señal del clima local. Esta transformación del ancho de anillo permitió obtener dos índices de crecimiento, uno para *EW* y otro para *LW*, que ajustados mediante modelos autoregresivos no contenían autocorrelación temporal significativa (series residuales).

Para evaluar la variabilidad del clima que refleja el potencial dendrocronológico de *EW* y *LW*, se efectuó un análisis de correlación de Pearson comparando dichas series residuales con los datos climáticos mensuales de precipitación (*P*) en mm, temperatura máxima (*Tmax*), temperatura media (*Tmed*), y temperatura mínima (*Tmin*) en grados centígrados. Para este fin se usaron 1000 réplicas para obtener los intervalos de confianza utilizando el software DendroClim2002 (Biondi and Waikul, 2004). Este procedimiento permitió seleccionar aquellos meses en que los datos climatológicos tienen mayor influencia sobre la *EW* y *LW*.

Los registros instrumentales de clima provinieron de la estación meteorológica Santa Bárbara (CNA, 2012), dada su proximidad a los sitios de muestreo ( $\pm 5$  km). Datos mensuales de enero del año previo al crecimiento hasta noviembre del año actual fueron correlacionados, considerando el periodo 1964-2010.

La precipitación en el área de estudio muestra un patrón estacional (Figura 1), muy influido por patrones atmosféricos de gran escala, medidos a través del índice multivariado de la Oscilación atmosférica austral de "El Niño" (ENSO-*MEI*, por sus siglas en inglés) (Pompa-García y Jurado, 2013). Por lo tanto, se dispuso de registros del *MEI* desde 1964 hasta 2010 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>). El índice *MEI* y los datos estacionales de precipitación en mm, del invierno previo (*PIP*), del verano previo (*PVP*), y del verano actual (*PVA*), se asociaron con los incrementos en *EW* y *LW* mediante un diagrama de dispersión como método de análisis gráfico complementario, con sus respectivas correlaciones.

with the software COFECHA (Holmes, 1983). Biological and geometric trends not related to climate were eliminated using the software ARSTAN (Cook and Holmes, 1984). The *EW* and *LW* width series were adjusted to a spline-type cubic function with 50 % response frequency to 64 years. This function was flexible enough to reduce non-climate variability while preserving the local climate signal. The transformation of ring width allowed us to obtain two growth indexes, one for *EW* and the other for *LW*, which, fit by autoregressive models, did not contain significant temporal autocorrelations (residual series).

To evaluate climate variability that reflects the dendrochronological potential of *EW* and *LW*, a Pearson correlation analysis compared the residual *EW* and *LW* width series with monthly data of precipitation (*P*), maximum temperature (*Tmax*), mean temperature (*Tmed*) and minimum temperature (*Tmin*). To this end, a bootstrap procedure based on 1000 replications was followed to calculate the confidence levels of climate-growth correlations using the software DendroClim2002 (Biondi and Waikul, 2004). This procedure enabled selection of those months in which the climatological data had greater influence on *EW* and *LW*.

Instrumental weather records were taken from the meteorological station Santa Barbara (CNA, 2012), given its proximity to the sampling sites ( $\pm 5$  km). Monthly data, from January of the year prior to growth to November of the growth year were correlated, considering the period 1964-2010.

Seasonal precipitation in the study area (Figure 1) is strongly influenced by large-scale atmospheric patterns measured by the Multivariate "El Niño" Southern Oscillation index (ENSO-*MEI*) (Pompa-García and Jurado, 2013). Therefore, ENSO-*MEI* records for the period 1964-2010 were obtained (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>). The ENSO-*MEI* and seasonal precipitation data of the previous winter (*PIP*), previous summer (*PVP*) and summer in which growth occurred (*PVA*) were associated with *EW* and *LW* and their respective correlations were calculated.

## RESULTS AND DISCUSSION

Mean sensitivity of the analyzed *P. cooperi* samples was 0.45, and the mean inter-correlation of the series was 0.61, indicating common response climate (Fritts, 1976). Total length of the chronology was 111 years, but the *EPS* indicated a good replication of residual *EW* and *LW* series for the period 1949-2010 (Figure 2). For this period, the mean series of *EW* and *LW* correlated significantly ( $r=0.90$ ;  $p\leq 0.0001$ ).

The *EW* and *LW* series showed similar trends, decreasing and increasing chronologically according to the expected dynamic (Fritts, 1976). Precipitation

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La sensibilidad media de las muestras analizadas de *P. cooperi* fue 0.45 y la inter correlación media de las series fue 0.61 lo que indica una respuesta climática común (Fritts, 1976). La longitud total de la cronología fue 111 años, y en el periodo 1949-2010 se contó como mejores repeticiones de las series medias residuales del estadístico *EPS* asociado a *EW* y *LW* (Figura 2). Para dicho periodo, las series medias de *EW* y *LW* mostraron una correlación significativa entre ellas ( $r=0.90$ ;  $p\leq 0.0001$ ).

Las series de *EW* y *LW* tuvieron tendencias similares, decreciendo y ascendiendo cronológicamente según la dinámica esperada (Fritts, 1976). La precipitación (*P*) se correlacionó significativamente con *EW* y *LW* de manera positiva con valores de 0.29 a 0.37 (Figura 3A). La *EW* se correlacionó positivamente con la precipitación de septiembre y diciembre del año previo y de enero, marzo y junio del año actual; mientras que la *LW* se correlacionó positivamente con la precipitación de julio, noviembre y diciembre del año previo y de enero del año de la formación del anillo. *T<sub>min</sub>* tuvo respuesta negativa para *EW* durante febrero y octubre del año previo al crecimiento radial del árbol, así como en mayo del año de crecimiento *LW* mostró respuestas similares para febrero, marzo y noviembre del año anterior, y en mayo del año actual, pero las correlaciones fueron positivas en agosto y septiembre de la estación de crecimiento (Figura 3B). Para las temperaturas *T<sub>max</sub>* y *T<sub>med</sub>* no se encontraron correlaciones significativas ni con *EW* ni con *LW* por lo cual no se presentan resultados para estas variables climáticas.

(*P*) correlated significantly and positively with *EW* and *LW*, with coefficients of 0.29 to 0.37 (Figure 3A). *EW* correlated positively with September and December precipitation of the previous year and January, March and June precipitation of the growth year; whereas *LW* correlated positively with previous-year July, November and December precipitation and January of the year of ring formation. *T<sub>min</sub>* had a negative response for *EW* during February and October of the year prior to tree radial growth, as well as in May of the growth year. *LW* showed similar responses for *T<sub>min</sub>* of February, March and November of the previous year and in May of the growth year, but the correlations were positive in August and September of the growth season (Figure 3B). For *T<sub>max</sub>* and *T<sub>med</sub>* temperatures, no significant correlations were found with either *EW* or with *LW*, and so results for these climatic variables are not presented.

Regarding the ENSO-MEI, the correlation coefficients showed negative relationships for *EW* and *LW* from January to April of the previous year, whereas, from June of the previous year to March of the growth year the association was positive (Figure 3C). The high values of the correlation coefficients for *LW* were significant ( $p\leq 0.001$ ). Finally, for the seasonal precipitation variables and the ENSO-MEI, the most robust relationships were obtained between the *EW* series and *PIP* and between *LW* and ENSO-MEI (Figure 4).

These results show the dendroclimatic potential of the series of earlywood (*EW*) and latewood (*LW*) of *P. cooperi* and give evidence of the statistically significant associations with certain climate elements, concurring with those reported

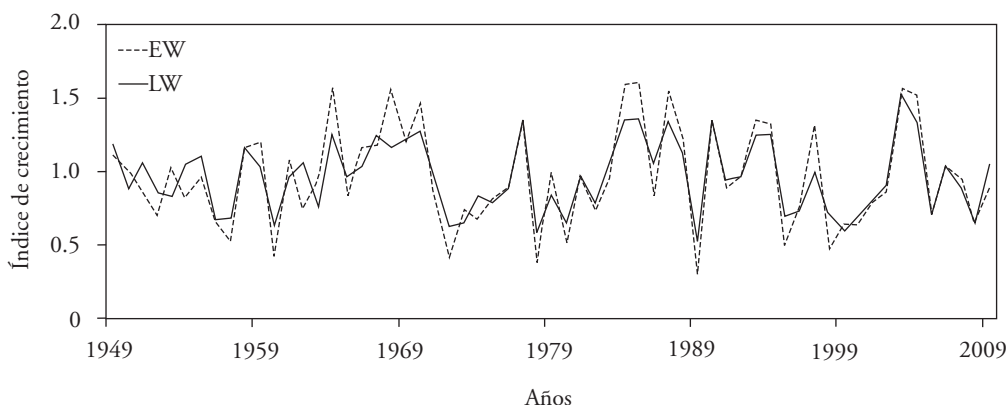
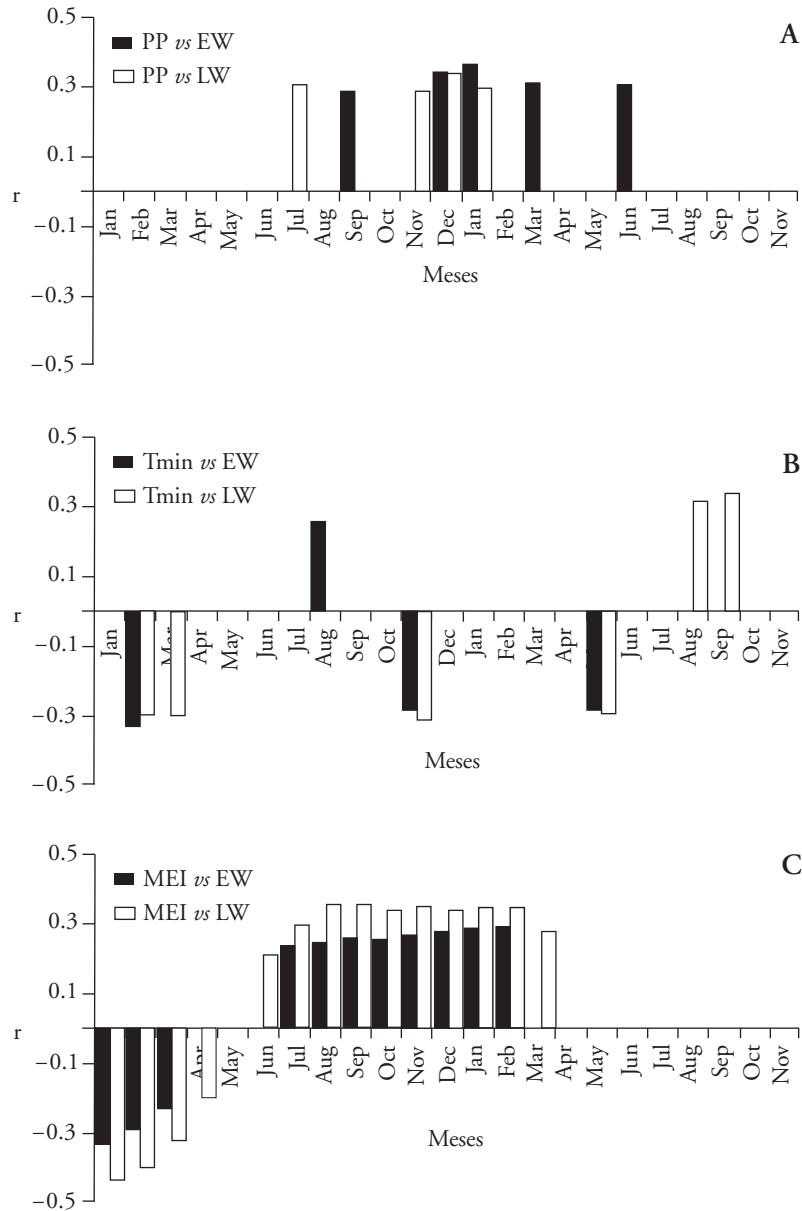


Figura 2. Periodo bien replicado y cronologías residuales de las maderas temprana (*EW*) y tardía (*LW*) para *Pinus cooperi*.  
 Figure 2. Well-replicated period and residual chronologies of earlywood (*EW*) and latewood (*LW*) for *Pinus cooperi*.



**Figura 3.** Correlaciones ( $r$ ) significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre cronologías de maderas temprana ( $EW$ , barras negras) y tardía ( $LW$ , barras grises) de *Pinus cooperi*, con datos climáticos mensuales y el índice multivariado del ENSO ( $MEI$ ). Meses escritos con mayúsculas denotan los periodos previos a la estación de crecimiento, mientras que los escritos en minúsculas corresponden a meses del año actual del crecimiento.

**Figure 3.** Significant ( $p \leq 0.05$ ) correlations ( $r$ , Pearson coefficient) between chronologies of earlywood ( $EW$ , black bars) and latewood ( $LW$ , gray bars) of *Pinus cooperi*, with monthly climate data and multivariate EMSO ( $MEI$ ) index. Months written in upper case denote the periods previous to the growth season, while those written in lower case are months of the year of growth.

Con respecto al índice  $MEI$ , los coeficientes de correlación mostraron relaciones negativas para  $EW$  y  $LW$  desde enero a abril del año previo, mientras que de junio del año previo a marzo del año actual tuvieron

for conifers in similar forest ecosystems of México (Constante-García *et al.*, 2009; Santillán-Hernández *et al.*, 2010) or of the US southwest (Griffin *et al.*, 2011). These findings are relevant because, to date,

asociación positiva (Figura 3C). Fueron notables los valores mayores de los coeficientes de correlación para *LW* (de -0.44 hasta 0.36;  $p \leq 0.001$ ). Finalmente, para las variables estacionales de precipitación y el fenómeno ENSO, las relaciones más robustas se obtuvieron entre las series de *EW* con *PIP* y *LW* con *MEI* (Figura 4).

Estos resultados muestran el potencial dendroclimático de las series de madera temprana (*EW*) y tardía (*LW*) de *P. cooperi* y evidencian las asociaciones estadísticamente significativa con ciertos elementos climáticos, lo cual concuerda con aquellos reportados para coníferas en ecosistemas vecinos de México (Constante-García *et al.*, 2009; Santillán-Hernández *et al.*, 2010) o del suroeste de EE.UU. (Griffin *et al.*, 2011). Igualmente el estadístico *EPS* ( $>0.85$ ) proporcionó información confiable como un estimador de la calidad de la señal climática del tamaño de la muestra (Mérian *et al.*, 2013). Estos hallazgos son relevantes porque a la fecha no se habían documentado las respuestas climáticas en un mismo año de variables medidas en anillos de crecimiento de *P. cooperi*.

En el caso de la precipitación se observa cierta diferenciación temporal entre *EW* y *LW*, puesto que *EW* respondió mejor a las condiciones previas del crecimiento, mientras que *LW* extendió su sensibilidad hasta la estación de crecimiento. De esta forma la recarga de humedad en el suelo en respuesta a las lluvias invernales es fundamental como precursor del crecimiento radial en primavera y durante el verano (Kerhoulas *et al.*, 2013). El agua es necesaria en la fotosíntesis para sintetizar carbohidratos usados en la formación de las traqueidas, lo cual reactiva el cambium e impacta el crecimiento radial (Lebourgeois *et al.*, 2012; Linares y Tiscar, 2010).

En relación a la contribución de las lluvias estacionales al crecimiento de la madera temprana y tardía (*EW* y *LW*), las precipitaciones estivales actuales y del año precedente (*PVA* y *PVP*) se diferenciaron poco entre sí. Pero la precipitación invernal del año precedente (*PIP*) fue la más relevante, porque funcionó como una reserva hídrica para la siguiente estación de crecimiento. Esto soporta la hipótesis de que los inviernos más húmedos contribuyen al crecimiento del árbol, como se observa en distintos ecosistemas con claras limitaciones hídricas (Pasho *et al.*, 2012; Pompa-García *et al.*, 2013). Dado a que la precipitación invernal suele ser de menor intensidad que la del verano, se favorece su infiltración en el suelo y las bajas temperaturas evitan las tasas altas de evaporación,

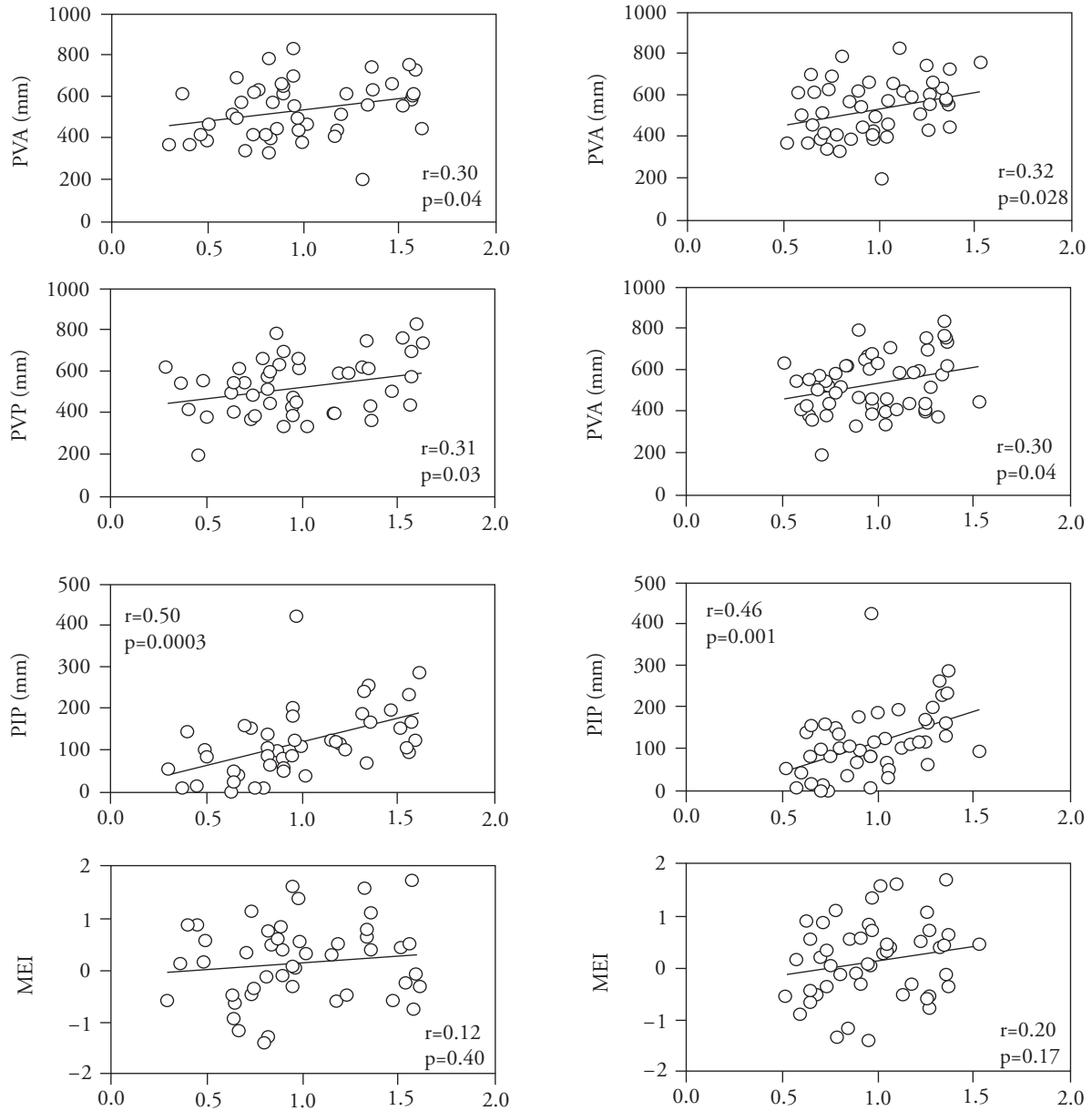
climate responses of the variables measured in *P. cooperi* growth rings of the same year have not been documented.

In the case of precipitation, certain temporal differentiation between *EW* and *LW* is observed since *EW* responded better to previous conditions of growth, whereas *LW* extended its sensitivity to the growing season. In this way, soil moisture recharge from winter rains is fundamental as a precursor of radial growth in spring and summer (Kerhoulas *et al.*, 2013). Water is necessary for photosynthesis in order to synthesize carbohydrates used to form tracheids and to reactivate the cambium, and its availability is potentially linked to radial growth in conifers (Lebourgeois *et al.*, 2012; Linares and Tiscar, 2010).

Relative to the contribution of seasonal rains to earlywood and latewood growth (*EW* and *LW*), summer rains of the growth year and those of the preceding year (*PVA* and *PVP*) differ little. But winter rain of the preceding year (*PIP*) was the most relevant because it functioned as a moisture reserve for the following growth season. This supports the hypothesis that wetter winters contribute to tree growth as observed in different forest ecosystems with clear limitations of water (Pasho *et al.*, 2012; Pompa-García *et al.*, 2013). Because winter precipitation tends to be less intense than in summer, infiltration into the soil is favored and the low temperatures prevent high rates of evaporation, contrasting with the negative balance resulting from summer rains (Bickford *et al.* 2011). This shows the importance of evapotranspiration and temperatures as final determinants of the water balance and the functioning of trees in drought-prone ecosystems (Williams *et al.*, 2013).

Regarding *Tmin*, growth response was negative since cold conditions favored greater development of *EW* and *LW*, possibly related to reduced evapotranspiration. Nevertheless, *LW* had a positive association with *Tmin* during August and September of the growth year, which Adams and Kolb (2005) interpret it as a reduction of metabolic activity and, as a consequence, a decrease in availability of carbohydrates. This is consistent with Huang *et al.* (2010), who attributed tree growth to diverse ecophysiological mechanisms related to low rates of evaporation.

The ENSO teleconnection have been shown for the study area in northern México (Pompa-García and Jurado, 2013; Pompa-García *et al.*, 2014). In



**Figura 4.** Coeficientes de correlación ( $r$ ) y probabilidad asociada ( $p$ ) entre las series residuales de *EW* y *LW* de *Pinus cooperi* con los datos de la precipitación estacional ( $P$ ) y el índice *MEI*.

**Figure 4.** Correlation coefficients ( $r$ , Pearson coefficient) and associated probability ( $P$ ) between the residual *EW* and *LW* width series of *Pinus cooperi*, seasonal precipitation data ( $P$ ) and the *MEI* index.

en contraste con el balance negativo que resulta en las lluvias del verano (Bickford *et al.* 2011). Esto muestra la importancia de la evapotranspiración y las temperaturas como determinantes finales del balance hídrico y del funcionamiento del árbol en sistemas secos (Williams *et al.*, 2013).

Respecto a la *Tmin* la respuesta del crecimiento fue negativa, y las condiciones frías favorecieron un

this sense, it was found that large-scale circulatory events estimated with the ENSO-*MEI* index showed consistent differentiated relationships to the *EW* and *LW* series. Tree growth is sensitive to wet years (“La Niña” phenomena) and to dry years (“El Niño” phenomena). These responses, particularly, are always clearer for *LW*. Thus, Meko *et al.* (2013) reported that variability of winter precipitation is strongly



mayor desarrollo de *EW* y *LW*, lo cual puede estar relacionado con la evapotranspiración. No obstante, la *LW* mostró asociación positiva durante agosto y septiembre del año del crecimiento con la *Tmin*, lo que Adams y Kolb (2005) interpretan como una disminución de la actividad metabólica y por ende baja disponibilidad de carbohidratos. Esto es consistente con Huang *et al.*, (2010), quienes atribuyeron el crecimiento del árbol a diversos mecanismos ecofisiológicos relacionados con las tasas bajas de evaporación.

Las teleconexiones ENSO se han mostrado para la región de estudio en el norte de México (Pompa-García y Jurado, 2013; Pompa-García *et al.*, 2014). En este sentido se encontró que los fenómenos circulatorios de gran escala estimados con el índice *MEI*, mostraron relaciones consistentes y diferenciadas con las series de *EW* y *LW*. El crecimiento del árbol es sensible a los años húmedos (fenómenos de la “Niña”) y a los años secos (fenómenos del “Niño”). Particularmente estas respuestas son siempre más claras para *LW*. Así, Meko *et al.* (2013) reportaron que la variabilidad de la precipitación invernal se asocia fuertemente al ENSO en el norte de México. De acuerdo a esto, la mayor correlación encontrada para *LW* se explica por el cambio de fase del ENSO (Stahle *et al.* 2012); es decir, el crecimiento de *LW* es provocado por la alta disponibilidad de humedad y la elevada cantidad de vapor atmosférico durante las lluvias estacionales en México (Griffin *et al.* 2013). Lo anterior abre una oportunidad de investigación en paleoclimatología al considerar crecimientos de los anillos en un mismo año y la variabilidad de los rasgos de las maderas temprana y tardía (anchura, densidad, discriminación isotópica, etcétera), como valiosos estimadores intermediarios

Este conocimiento tiene más importancia porque ante los cambios climáticos, las especies forestales modificarán su distribución (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007). Algunas especies podrían mostrar contracciones en su área de distribución en respuesta a las condiciones más cálidas y posiblemente más secas del futuro, manteniéndose en zonas con climas propicios para su adaptación (Rehfeldt *et al.*, 2012). Otros estudios podrían evaluar el efecto de variables en una escala de micrositio sobre el crecimiento de las plantas y su respuesta a la sequía (López-Upton *et al.*, 2004).

associated with ENSO in northern México. Accordingly, the highest correlation found for *LW* is explained by the ENSO phase change (Stahle *et al.* 2012); that is, *LW* growth is caused by high moisture availability and high amounts of atmospheric vapor during seasonal rains in México (Griffin *et al.*, 2013). The above opens up opportunities for research in paleoclimatology by considering rings growth in a same year and the variability of the features of earlywood and latewood (width, anatomy, density, isotopic discrimination, etc.) as valuable climatic proxies.

This knowledge is more important because with climate change, forest species will modify their distribution (Gómez-Mendoza and Arriaga, 2007). Some species may undergo contractions of their area of distribution in response to the warmer, and possibly drier, conditions of the future, remaining in areas with climates that favor their adaptation (Rehfeldt *et al.*, 2012). Other studies could evaluate the effect of different variables at a micro scale, upon plant growth and response to drought (López-Upton *et al.*, 2004).

## CONCLUSIONS

Measurement of variables, such as width of earlywood and latewood of growth rings, showed potential for indicating responses of *Pinus cooperi* to the climate in northern Mexico.

Earlywood was more sensitive to winter rains before the growth season, whereas latewood width was better related to the ENSO-*MEI*. This is an important result for future dendroclimatic studies since it shows the susceptibility of *Pinus cooperi* to seasonal climatic anomalies in the study area.

Winter rains prior to the growing season are crucial for wood formation of the studied species, according to the correlations found.

—End of the English version—

-----\*

## CONCLUSIONES

La medición de variables, como la anchura de las maderas temprana y tardía de los anillos de crecimen-

to, mostró potencial para indicar las respuestas de *Pinus cooperi* ante el clima.

La madera temprana fue más sensible a las lluvias del invierno previo a la estación de crecimiento, mientras que la tardía se relacionó mejor con el índice atmosférico *MEI*. Este es un resultado importante para estudios dendroclimáticos futuros, pues muestra la susceptibilidad de *Pinus cooperi* a las anomalías climáticas en el área de estudio.

Las lluvias del invierno previo a la estación de crecimiento son cruciales para el incremento radial de la especie estudiada, según lo muestran las correlaciones encontradas.

#### AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el apoyo del laboratorio del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria de la Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (el CENID-RASPA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Gomez Palacio, Durango, para la recolección y el procesamiento del material leñoso de *Pinus cooperi* Blanco elegido en campo. También se agradecen las observaciones a revisores anónimos y al equipo editorial, cuyo esfuerzo mejoró el manuscrito.

#### LITERATURA CITADA

- Adams, H. D., and T. E. Kolb. 2005. Tree growth response to drought and temperature in a mountain landscape in northern Arizona, USA. *J. Biogeogr.* 32: 1629-1640.
- Bickford, I. N., P. Z. Fulé, and T. E. Kolb. 2011. Growth sensitivity to drought of co-occurring *Pinus* spp. along an elevation gradient in northern Mexico. *Western North American Naturalist* 71: 338-348.
- Biondi F., and J. Waikul. 2004. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Comp. Geosci.* 30: 303-311.
- Camarero, J. J., V. Rozas, and J. M. Olano. 2014. Minimum wood density of *Juniperus thurifera* is a robust proxy of spring water availability in a continental Mediterranean climate. *J. Biogeogr.* 41: 1105-1114.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2012. Datos climáticos de estaciones meteorológicas de Durango: Santa Barbara.
- Constante-García, V., J. Villanueva-Díaz, J. Cerano Paredes, E. H. Cornejo-Oviedo, y S. Valencia-Manzo. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia For. Méx.* 1-39.
- Cook, E. R. and R. H. Holmes. 1984. Program ARSTAN and users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ. USA. 15 p.
- Cruz C. F., H. M. de los Santos P., y J. R. Valdez L. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42(4): 473-485.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press. New York, NY, USA. 567 p.
- Gómez-Mendoza, L., and L. Arriaga. 2007. Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biol.* 21(6): 1545-1555.
- González-Elizondo, M. S., M. González-Elizondo, y M. A. Márquez L. 2007. *Vegetación y Ecorregiones de Durango*. Plaza y Valdés, S.A. de C.V. México, D.F. 219 p.
- Griffin, D., Meko, D.M., Touchan, R., Leavitt, S.W., and C. A. Woodhouse. 2011. Latewood chronology development for summer-moisture reconstruction in the U.S. Southwest. *Tree-Ring Res.* 67:87-101. DOI:10.3959/2011-4.1
- Griffin, D., Woodhouse, C.A., Meko, D.M., Stahle, D.W., Faulstich, H. L., Carrillo, C., Touchan, R., Castro, C.L., and S. W. Leavitt. 2013. North American monsoon precipitation reconstructed from tree-ring latewood. *Geophys. Res. Lett.* 40: 954-958. DOI:10.1002/grl.50184
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.* 43: 69-78.
- Huang, J., J. C. Tardif, Y. Bergeron, B. Denneler, F. Berninger, and M. P. Girardin. 2010. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biol.* 16: 711-731.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p.
- Kerhoulas, L. P, T. E. Kolb, and G. W. Koch. 2013. Tree size, stand density, and the source of water used across seasons by ponderosa pine in northern Arizona. *For. Ecol. Manage.* 289: 425-433.
- Lebourgeois, F., P. Mérian, F. Courdier, J. Ladier, and P. Dreyfus. 2012. Instability of climate signal in tree-ring width in Mediterranean mountains: a multi-species analysis. *Trees-Structure and Function* 26: 715-729.
- Linares, J. C., and P. A. Tiscar. 2010. Climate change impacts and vulnerability of the southern populations of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. *Tree Physiol.* 30: 795-806.
- López-Upton, J., C. Ramírez-Herrera, O. Plascencia-Escalante, y J. Jasso-Mata. 2004. Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus greggii*. *Agrociencia* 38(4): 457-464.
- Meko, D. M., Touchan, R., Villanueva-Díaz, J. Griffin, D., Woodhouse, C.A., Castro, C.L., Carillo, C., and S. W. Leavitt. 2013. Sierra San Pedro Mártir, Baja California, cool-season precipitation reconstructed from earlywood width of *Abies concolor* tree rings. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 118: 1660-1673. DOI:10.1002/2013JG002408.
- Mérian, P., J. C. Pierrat, and F. Lebourgeois. 2013. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* 31: 58-67.
- Pasho, E., J. J. Camarero and S. M. Vicente-Serrano. 2012. Climatic impacts and drought control of radial growth and seasonal wood formation in *Pinus halepensis*. *Trees: Structure and Function* 26: 1875-1886.

- Pompa-García, M., Cerano-Paredes, J., and P. Fulé. 2013. Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia* 31(3), 198-204. DOI: 10.1016/j.dendro.2013.05.003
- Pompa-García, M. and E. Jurado. 2013. Seasonal precipitation reconstruction and teleconnections with ENSO based on tree ring analysis of *Pinus cooperi*. *Theor. Appl. Climatol.* DOI: 10.1007/s00704-013-1018-6
- Pompa-García, M., Miranda-Aragón, L., and C. Aguirre-Salado. 2014. Tree growth response to ENSO in Durango, Mexico. *Int. J. Biometeorol.* 1-9. DOI: 10.1007/s00484-014-0828-2
- Rehfeldt, G. E., N. L. Crookston, C. Sáenz-Romero, and E. Campbell. 2012. North American vegetation analysis for land use planning in a changing climate: A statistical solution to large classification problems. *Ecol. Appl.* 22(1): 119-141.
- Sáenz-Romero, C., J. Beaulieu, and G. E. Rehfeldt. 2011. Altitudinal genetic variation among *Pinus patula* populations from Oaxaca, México, in growth chambers simulating global warming temperatures. *Agrociencia* 45: 399-411.
- Sáenz-Romero, G. E. Rehfeldt, P. Duval, and R.A. Lindig-Cisneros. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *For. Ecol. Manage.* 275: 98-106.
- Santillán-Hernández M., E. Cornejo-Oviedo, J. Villanueva-Díaz, J. Cerano-Paredes, S. Valencia-Manzo, y M. A. Capó-Arteaga. 2010. Potencial dendrocronológico de *Pinus pincea* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques* 16: 17-30.
- Sheffield, J., E. F. Wood, and M. L. Roderick. 2012. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature* 491: 435-438.
- Stahle, D. W., J. Villanueva-Díaz, D. J. Burnette, J. Cerano-Paredes, R. R. Jr. Heim, F. K. Fye, R. Acuna-Soto, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, and D. K. Stahle. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophys. Res. Lett.* 38: L05703.
- Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva-Díaz, R. R. Jr. Heim, F. K. Fye, J. Cerano-Paredes, R. Acuna-Soto, and M. K. Cleaveland. 2012. Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Clim. Dyn.* 39(6): 1431-1446. DOI:10.1007/s00382-011-1205-z
- Stokes, M. A., and T. L. Smiley. 1968. *An Introduction to Tree-ring Dating*. University of Chicago Press. Chicago, IL. USA. 73 p.
- Williams, A. P., C. D. Allen, A. K. Macalady, D. Griffin, C. A. Woodhouse, D. M. Meko, T. W. Swetnam, S. A. Rauscher, R. Seager, H. D. Grissino-Mayer, J. S. Dean, E. R. Cook, C. Gangodagamage, M. Cai and N. G. McDowell. 2013. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change* 3: 292-297.