

Response of tree radial growth to evaporation, as indicated by earlywood and latewood

Respuesta del crecimiento radial a la evaporación, a partir de maderas temprana y tardía

José E. Chacón-de la Cruz; Marín Pompa-García.

Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan y bulevar Durango s/n, col. Valle del Sur. C. P. 34120. Durango, Durango, México. Correo-e: mpgaarcia@ujed.mx
Tel.: 01 618 130 1096 (Autor para correspondencia).

Abstract

Most dendrochronological studies are based on the relationship between total radial growth and precipitation; however, very few studies have considered the responses of early (EW) and late (LW) wood growth or the role of evaporation. In this study, residual indices for forests in the state of Durango (Mexico) during the period 1964-2010 were used to evaluate the response of EW and LW growth in *Pinus cooperi* Blanco to evaporation. DENDROCLIM software was used to correlate dendrochronological data to total monthly evaporation. Evaporation from January of the previous year to December of the current year was considered in a simple interval analysis. The coefficients of correlation indicated a consistent negative relationship between both EW and LW growth and evaporation in the fall/winter prior to the growth season. Nevertheless, LW growth was more consistent in terms of climatic sensitivity, which may indicate that measurement of this parameter may be more useful in dendroclimatic studies.

Keywords:

Dendrochronology, correlation, sensitivity, hydric stress.

Resumen

La mayoría de los estudios dendrocronológicos se basan en la relación del crecimiento radial y la precipitación; sin embargo, pocos estudios han considerado las respuestas de la madera temprana (EW, por sus siglas en inglés) y tardía (LW, por sus siglas en inglés) al efecto de la evaporación. En este estudio se usaron índices residuales para evaluar la respuesta de crecimiento de EW y LW de *Pinus cooperi* Blanco al efecto de la evaporación en bosques del estado de Durango, México, durante el periodo 1964-2010. El software DENDROCLIM fue utilizado para correlacionar datos dendrocronológicos con la evaporación total mensual. En un análisis de intervalo simple se utilizaron datos de evaporación a partir del mes de enero del año previo a la estación de crecimiento a diciembre del año de la formación del anillo. Los coeficientes de correlación indicaron una relación negativa consistente de EW y LW con la evaporación del otoño-invierno previo a la estación de crecimiento. No obstante, el crecimiento de la madera tardía fue más consistente en términos de sensibilidad climática, lo cual puede indicar que la medición de dicha variable puede ser de utilidad en estudios dendroclimáticos.

Palabras clave:

Dendrocronología, correlación, sensibilidad, estrés hídrico.

Introduction

The climatic parameters temperature and precipitation are often considered in dendrochronological studies because they are directly related to soil moisture content and evaporative demand (rising vapour pressure deficit). Measurement of these parameters has become standard for evaluation of radial growth in response to climatic variations. It has proven valuable for reconstructing chronologies (Cerano-Paredes et al., 2013; Stahle et al., 2011), analyzing the effects of local (Gochis, Brito-Castillo, & Shuttleworth, 2006) and global (Yocom et al., 2010) climate change, and constructing future scenarios in which climate, vegetation and water availability play a principal role (Meko et al., 2013). However, evaluation of radial growth as a function of hydric stress associated exclusively with precipitation and temperature may overlook information provided by other variables. For example, the effect of evaporation on growth has yet to be fully established. This could yield new data for the study of climate-plant relationships, as evaporation is governed by factors such as solar incidence, wind speed and relative humidity. Pompa-García, Rodríguez-Flores, Aguirre-Salado, and Miranda-Aragón (2013) modeled evaporation dynamics in relation to radial growth in *Pinus cooperi* Blanco during the period 1964-2010 and found that evaporation plays an important role in increasing moisture stress.

These authors also suggested additional effects of drought and extreme temperatures. The tree ring index (TRI) is commonly used as an indicator of response to changes in climate (Woodhouse & Lukas, 2006); however, recent studies have explored the potential use of late and early wood growth measurements, particularly in markedly seasonal environments (Meko et al., 2013). For example, Griffin, Meko, Touchan, Leavitt, and Woodhouse (2011) considered how both early wood (EW) and late wood (LW) growth were correlated with seasonal precipitation in *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Although total and early growth were reliable indicators of precipitation in the dry season, these parameters did not reflect the changes in this variable during the wet season. However, late growth did not respond to variations in precipitation between October and April, but was highly sensitive to rain during the wet season.

The present study considers the association between evaporation and both LW and EW growth in *P. cooperi*. This coniferous tree, which has high ecological and economic value, is representative of northern Mexico and its growth has previously been shown to relate to climatic drivers (Cruz-Cobos, De los Santos-Posadas, & Valdez-Lazalde, 2008; Pompa & Jurado, 2013), but which has not previously been the subject of such analysis. In this context, the aim of the study was to compare the responses of EW and LW growth to instrumental evaporation in the Sierra Madre Occidental mountain

Introducción

Los parámetros climáticos temperatura y precipitación a menudo son considerados en estudios dendrocronológicos ya que están directamente relacionados con el contenido de humedad del suelo y la demanda evaporativa (aumento del déficit de presión de vapor). La medición de estos parámetros se ha vuelto común para la evaluación del crecimiento radial en respuesta a las variaciones climáticas. Esta medición ha sido valiosa para reconstruir cronologías (Cerano-Paredes et al., 2013; Stahle et al., 2011), analizar los efectos de cambio climático locales (Gochis, Brito-Castillo, & Shuttleworth, 2006) y globales (Yocom et al., 2010), y construir escenarios futuros en los que el clima, la vegetación y la disponibilidad de agua juegan un papel importante (Meko et al., 2013). Sin embargo, con la evaluación del crecimiento radial como una función del estrés hídrico asociado exclusivamente con la precipitación y la temperatura, se puede pasar por alto la información proporcionada por otras variables. Por ejemplo, el efecto de la evaporación en el crecimiento que aún no se ha establecido plenamente. Esto podría producir nuevos datos para el estudio de las relaciones clima-planta, ya que la evaporación se rige por factores como la incidencia solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. Pompa-García, Rodríguez-Flores, Aguirre-Salado, y Miranda-Aragón (2013) modelaron la dinámica de evaporación en relación con el crecimiento radial de *Pinus cooperi* Blanco durante el periodo de 1964 a 2010 y descubrieron que la evaporación juega un papel importante en el aumento del estrés hídrico. Estos autores también sugirieron efectos adicionales de sequía y temperaturas extremas.

El índice de anillos de árboles (TRI, por sus siglas en inglés) se utiliza comúnmente como un indicador de respuesta a los cambios en el clima (Woodhouse & Lukas, 2006); sin embargo, estudios recientes han explorado el uso potencial de las medidas de crecimiento de la madera tardía y temprana, sobre todo en ambientes notablemente estacionales (Meko et al., 2013). Por ejemplo, Griffin, Meko, Touchan, Leavitt, y Woodhouse (2011) consideraron cómo se correlacionó, tanto el crecimiento de la madera temprana (EW) y tardía (LW) con la precipitación estacional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Los autores concluyeron que aunque el crecimiento total y temprano fueron indicadores fiables de la precipitación en la estación seca, estos parámetros no reflejaron los cambios en dicha variable durante la estación húmeda. Sin embargo, el crecimiento tardío no respondió a las variaciones en las precipitaciones entre octubre y abril, pero fue muy sensible a la lluvia durante la estación húmeda.

El presente estudio considera la asociación entre la evaporación y el crecimiento de LW y EW en *P. cooperi*. Esta especie de coníferas, representativa del norte de México, tiene un alto valor ecológico y económico; se

range, a zone that is influenced by climatic patterns with ecological, economic and hydrological implications for the whole region. We hypothesized that EW and LW are statically different in climatic sensitivity.

Materials and methods

The study site was located in the Sierra Madre Occidental in the state of Durango, Mexico, between coordinates 24° 8' 27" N - 105° 3' 18" W and 24° 4' 43" N - 105° 1' 15" W and at a mean elevation of 2362 m (Figure 1). The vegetation in the area is predominated by *Pinus* and *Quercus* species (González-Elizondo, González-Elizondo, & Márquez, 2007).

At least three wood cores were removed from each of 18 *P. cooperi* trees, at a height of 1.3 m, with a Pressler borer (Haglof, Sweden). A low quality site with the following characteristics was chosen for study: elevation 2362 m, slope no greater than 5°; and semi-cold temperate climate with rainfall in summer. Only undamaged trees with no deformities or signs of competition for light or nutrients were included in the study, to highlight the environmental effects on the growth of the trees and to maximize the climatic signal. The expressed population response (EPS) was calculated as an indicator of sample size sufficiency, as often done in paleoclimatic studies (Mérián, Pierrat, & Lebourgeois, 2013). The cores were dried, mounted and sanded. Crossed dating was then conducted according to Stokes and Smiley (1996). Tree growth was measured under a stereoscopic microscope, and EW and LW growth were differentiated, to an accuracy of 0.001 mm, by using a Velmex 117 system (USA). The quality of the dating and measurements were evaluated using COFECHA software (Holmes, 1983).

Biological and geometric effects not associated with climate were minimized using ARSTAN software (Cook & Holmes, 1984) to obtain standardized residuals of annual EW and LW with a mean of 1 and 0 variance. In this process, the series were fitted to a negative exponential function and were then processed using the spline interpolation technique for cubic softening to reduce the non-climatic variance while preserving the annual or sub-decadal information. Early residual (ER) and late residual (LR) indices of radial growth were calculated by dividing the observed radial growth by the adjusted values. The results were analyzed by using autoregression models to eliminate temporal autocorrelation.

Monthly evaporation (mm) for the period 1964-2010 was considered as a climatic variable. This data was obtained from the Santa Bárbara (Durango) climatological station (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012), located less than 50 km from the sampling sites. The recordings included the period

ha mostrado previamente que su crecimiento puede estar relacionado con los factores climáticos (Cruz-Cobos, De los Santos-Posadas, & Valdez-Lazalde, 2008; Pompa & Jurado, 2013) pero no ha sido objeto de dicho análisis. En tal contexto, el objetivo de este estudio fue comparar las respuestas de crecimiento de EW y LW con la evaporación instrumental en la Sierra Madre Occidental, una zona influenciada por los patrones climáticos con consecuencias ecológicas, económicas e hidrológicas para toda la región. Nuestra hipótesis es que EW y LW son estadísticamente diferentes con respecto a la sensibilidad climática.

Materiales y métodos

El sitio de estudio se encuentra en la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, México, entre las coordenadas 24° 8' 27" N - 105° 3' 18" O y 24° 4' 43" N - 105° 1' 15" W, a una elevación media de 2,362 m (Figura 1). Las especies *Pinus* y *Quercus* destacan en la vegetación de la zona (González-Elizondo, González-Elizondo, & Márquez, 2007).

Para el estudio se eligió un sitio de baja calidad con las siguientes características: 2,362 m de altitud, pendiente no mayor de 5° y clima templado semifrío con lluvias en verano. En este trabajo se estudiaron 18 árboles de *P. cooperi*. Al menos tres núcleos de madera fueron extraídos de cada árbol, a una altura de 1.3 m, con un taladro Pressler (Haglof, Suecia). Sólo los árboles en buen estado, sin deformidades o signos de competencia por la luz o nutrientes fueron incluidos en el estudio, para resaltar los efectos ambientales sobre el crecimiento de los árboles y para maximizar la señal climática. La señal expresada de la población (EPS) se calculó como un indicador de suficiencia de tamaño de la muestra, como se hace a menudo en los estudios paleoclimáticos (Mérián, Pierrat, & Lebourgeois, 2013). Los núcleos se secaron, montaron y lijaron. Posteriormente, la datación cruzada se realizó de acuerdo con Stokes y Smiley (1996). El crecimiento del árbol se midió con un microscopio estereoscópico y se diferenció el crecimiento de EW y LW con una precisión de 0.001 mm, mediante el uso de un sistema Velmex 117 (EE.UU.). La calidad de la datación y las mediciones fueron evaluadas utilizando el software COFECHA (Holmes, 1983).

Los efectos biológicos y geométricos no asociados con el clima se redujeron al mínimo con el software ARSTAN (Cook & Holmes, 1984), para obtener residuos estandarizados de EW y LW anual con media 1 y varianza 0. En este proceso, las series se ajustaron a una función exponencial negativa y se procesaron usando la técnica de interpolación *spline* por suavizado cúbico con el fin de reducir la varianza no climática, preservando al mismo tiempo la información anual o subdecenal. Los índices residuales tempranos (ER, por sus siglas en inglés) y tardíos (LR, por sus siglas en inglés) de crecimiento radial

from January of the year prior to the growth season until December of the current year (Figure 1).

The effect of evaporation on EW and LW growth was determined by using the DENDROCLIM2002 program (Biondi & Waikul, 2004) to calculate Pearson's correlation coefficients between evaporation and both EW and LW and random resampling to estimate the significance of the correlations. This process identified the months in which association between these variables was the strongest. Furthermore, we also evaluated the association of LW and EW to winter evaporation (WE) variability within this region, using scatter plots.

Results and discussion

A total of 28 core samples (mean diameter at breast height, 48.2 cm) from *P. cooperi* were analyzed. The EPS value was 82 %. The chronology had a duration of 177 years, between 1834 and 2010, while the study period comprised 47 years during the period from 1964-2010. The EPS value provided valuable information to confirm the quality of the assessment of climate-growth relationships (Mérian et al., 2013). The tree-ring index for EW and LW showed similar trends during the period they overlapped, indicating that the *P. cooperi* shared an interannual growth variation (Figure 2). In general, evaporation showed an inverse relationship with tree-ring growth.

Figure 2 shows a comparison between EW and LW growth and evaporation, expressed as a ring index (RI). For EW growth, the smallest increase occurred in 1983 and the maximum increase in 2010, while LW growth was minimal in 1991 and maximal in 2010. A negative association between both growth types and evaporation

se calcularon dividiendo el crecimiento radial observado entre los valores ajustados. Los resultados se analizaron mediante el uso de modelos autorregresivos para eliminar la autocorrelación temporal.

La evaporación mensual (mm) en el periodo 1964-2010 fue considerada como la variable climática. Estos datos se obtuvieron de la estación meteorológica 'Santa Bárbara' (Durango) (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012), situada a menos de 50 km de los sitios de muestreo. Los registros incluyen el periodo de enero del año previo a la temporada de crecimiento hasta diciembre del año de la formación del anillo (Figura 1).

El efecto de la evaporación sobre el crecimiento de EW y LW se determinó mediante el programa DENDROCLIM2002 (Biondi & Waikul, 2004), para calcular los coeficientes de correlación de Pearson entre la evaporación con EW y LW, y a través del remuestreo aleatorio para estimar la significancia de las correlaciones. Este proceso identificó los meses en los que la asociación entre dichas variables fue más fuerte. Por otra parte, también se evaluó la asociación de LW y EW con la variabilidad de la evaporación en invierno (EI) en esta región, utilizando gráficas de dispersión.

Resultados y discusión

En total 28 muestras de núcleos (diámetro medio normal, 48.2 cm) de *P. cooperi* fueron analizadas. El valor EPS fue 82%. La cronología tuvo una duración de 177 años (1834-2010), mientras que el periodo de estudio comprendió 47 años (1964-2010). El valor EPS proporcionó información valiosa para confirmar la calidad de la evaluación de las relaciones clima-crecimiento (Mérian et al., 2013). El índice de anillos de EW y LW mostró tendencias

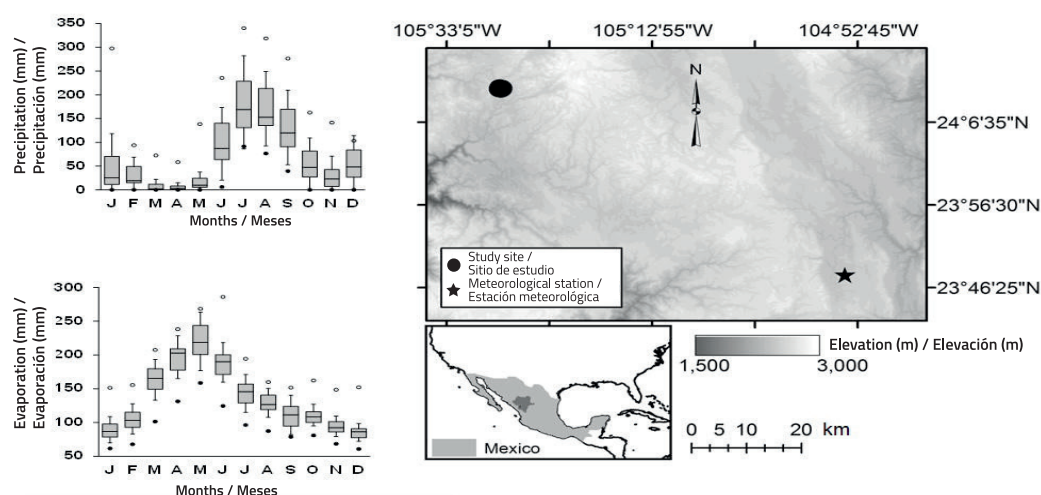


Figure 1. Study area (Sierra Madre Occidental in the state of Durango, México) and regional climatogram for the period 1964-2010.

Figura 1. Área de estudio (Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, México) y climograma regional del periodo 1964-2010.

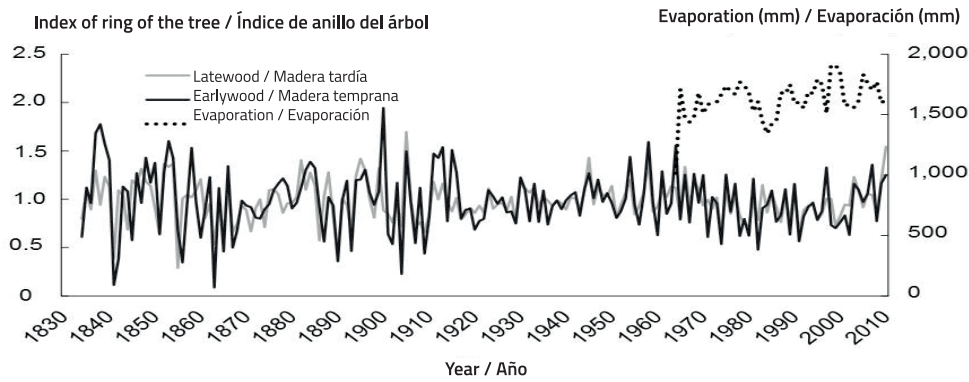


Figure 2. Variation in ring index for earlywood and latewood growth (1834-2010) in relation to annual evaporation (1964-2010).

Figura 2. Variación en el índice de anillo del árbol para el crecimiento de maderas temprana y tardía (1834-2010) en relación con la evaporación anual (1964-2010).

was profiled graphically throughout the series. Short periods with positive responses were evident in 1967-1968, 1970-1971, 1975-1977, 1993-1994 and 2009-2011; however, LW growth was more consistent and closely reflecting than the magnitude and direction of the variations in evaporation, which supports the hypothesis that climatic signal may be better represented by analyzing EW and LW growth separately.

Negative correlation coefficients were obtained, with values of -0.38 to 0.29 ($P < 0.05$) for LW and ER; these are considered low, but significant. Evaporation was negatively and constantly correlated with LW growth in the period between September of the previous year and January of the current year, as well as in June and September of the same year. The association between evaporation and EW growth was variable. Evaporation was positively correlated with EW growth in the months of February, April and May prior to the growth stage and negatively with EW growth between September and January. In the period September to February, the correlation values and trends for both types of wood growth were similar (Figure 3).

In general, the correlation coefficients were low; however, the trends were consistent during the study period, especially in the months of September, October and November of the previous year, for both types of wood growth, and in the period February to April, for EW growth.

Graphs showing the influence of WE on EW and LW are displayed on Figure 4. WE exhibits negative strong association on radial tree growth ($r = -0.4$). In a reconstruction of winter-spring precipitation by using *P. menziesii*, Díaz, Therrell, Stahle, and Cleaveland (2002) found a positive association between EW growth and precipitation for the period November to May. This

similares durante el periodo en que se sobreponen, lo que indica que *P. cooperi* compartió una variación interanual de crecimiento (Figura 2). En general, la evaporación mostró relación inversa con el crecimiento de anillos.

En la Figura 2 se observa una comparación entre el crecimiento de EW y LW con la evaporación, expresada como un índice de anillo (RI, por sus siglas en inglés). En el caso de EW, el menor incremento de crecimiento se produjo en 1983 y el máximo incremento en 2010, mientras que el crecimiento de LW fue mínimo en 1991 y máximo en 2010. A lo largo de las series se perfila gráficamente una asociación negativa entre los dos tipos de crecimiento y la evaporación. En 1967-1968, 1970-1971, 1975-1977, 1993-1994 y 2009-2011, los periodos cortos con respuestas positivas fueron evidentes; sin embargo, el crecimiento de LW fue más consistente y estrecho que la magnitud y dirección de las variaciones en la evaporación, lo que apoya la hipótesis de que la señal climática puede ser mejor representada al realizar el análisis de crecimiento de EW y LW por separado.

Los coeficientes de correlación negativa tuvieron valores de -0.38 a 0.29 para LW y ER; estos fueron considerados bajos, pero significativos ($P < 0.05$). La evaporación se correlacionó negativa y constantemente con el crecimiento de LW en el periodo comprendido entre septiembre del año previo y enero del año de la formación del anillo, así como en junio y septiembre del mismo año. La asociación entre la evaporación y el crecimiento de EW fue variable. La evaporación se correlacionó positivamente con el crecimiento de EW en los meses de febrero, abril y mayo antes de la etapa de crecimiento, y negativamente con el crecimiento de EW entre septiembre y enero. En el periodo de septiembre a febrero, los valores de correlación y las

pattern reflects the effect of the moisture produced by rain, but does not distinguish the effect of evaporation, especially between March and May, when hydric stress may be greater because of the lack of rain. This could explain the contrasting growth responses to drought before or during the growing season (Figure 3 and Figure 4). In the analysis prior to the reconstruction of precipitation based on TRI, Pompa and Jurado (2013) report a positive response to the availability of water and a graphic correspondence between precipitation and TRI for the same period analyzed in the present study, in an area neighboring the study site. However, the correlation coefficients found in the present study for LW growth with respect to evaporation are higher than those reported for the relationship between TRI and precipitation.

tendencias para los dos tipos de crecimiento de madera fueron similares (Figura 3).

En general, los coeficientes de correlación fueron bajos; sin embargo, las tendencias fueron consistentes durante el periodo de estudio, sobre todo en los meses de septiembre, octubre y noviembre del año previo, para ambos tipos de crecimiento de madera, y en el periodo de febrero a abril, para el crecimiento de EW.

En la Figura 4 se aprecian las gráficas de dispersión que muestran la influencia del WE sobre EW y LW. WE muestra una fuerte asociación negativa con el crecimiento radial ($r = -0.4$). En una reconstrucción de la precipitación de invierno-primavera utilizando *P. menziesii*, Díaz, Therrell, Stahle y Cleaveland (2002) encontraron una asociación

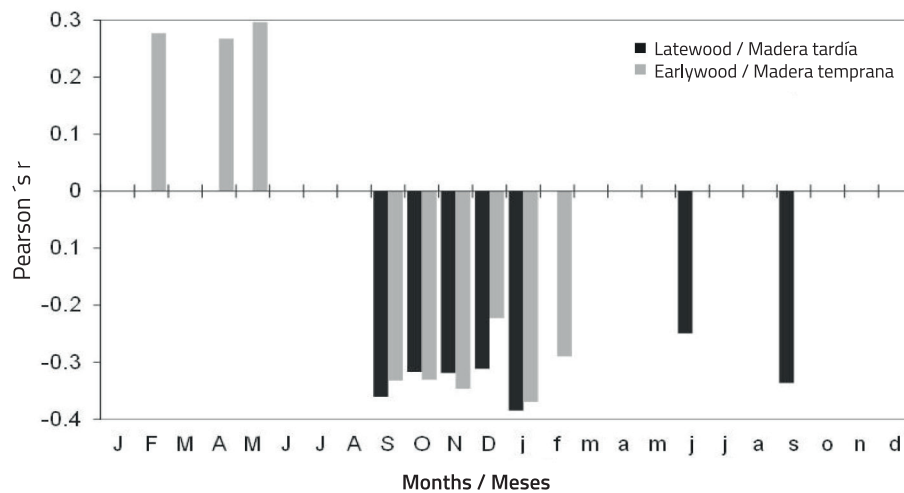


Figure 3. Correlation between evaporation and earlywood and latewood growth in *Pinus cooperi*. Instrumental records for the period 1964-2010 are included. Capital letters denote months prior to the growth season and small letters indicate months in the current year.

Figura 3. Correlación entre la evaporación y el crecimiento de maderas temprana y tardía de *Pinus cooperi*. Se incluyen los registros instrumentales del periodo 1964-2010. Las letras mayúsculas indican los meses antes de la temporada de crecimiento y las minúsculas los meses del año de la formación del anillo.

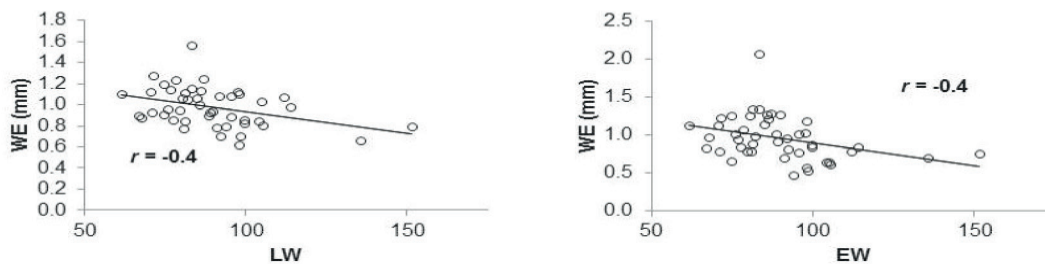


Figure 4. Correlation of winter evaporation (WE) with latewood (LW, left) and earlywood (EW, right).

Figura 4. Correlación de la evaporación de invierno (WE) con la maderas tardía (LW, izquierda) y la maderas temprana (EW, derecha).

Pompa et al. (2013) also reported a negative effect of evaporation on growth. The results of the aforementioned study are consistent with those of the present study in terms of the direction of the correlation, but differ in intensity, indicating a greater response of total growth than of LW growth. However, although the response of LW growth was less intense, it was more seasonally specific and it was concentrated in the dry period between September and January, while total growth responded more variably over a wider period including both wet and dry months. In an exploration of the relationship between LW growth and seasonal precipitation, Griffin et al. (2011) reported high positive correlation coefficients for the wet season, but a weak response to the hydric stress caused by the low precipitation in the dry season. This emphasizes the need to eliminate the effect of EW on LW growth for a more accurate explanation of the variations in the rains caused by the North American monsoon. A climate reconstruction based only on LW growth revealed that the historical occurrence of recurrent and random extreme precipitation events is an effect of the monsoon region, which contrasts with the stability recorded in the last century for this area (Griffin et al., 2013). In this sense, the results of the present study indicate that LW growth could be used in the study region to directly evaluate the response of *P. cooperi* to hydric deficit during stages prior to growth, without the application of any adjustments with respect to the effect of EW growth.

Our findings have notable implications to interpret the role played by evaporation on tree-ring growth. We show that LW is also very sensitive to water deficit and high evaporation rates which suggests that evaporation by itself may be a likely direct driver of growth decline and forest dieback rather than warmer temperatures or low rainfall (Liang, Eckstein, & Liu, 2008). Radial growth shows considerable dependence on the climatic conditions of the winter months preceding the growing season and hence on evaporation conditions.

Conclusions

EW and LW growth respond negatively to evaporation in *P. cooperi*. In particular tree radial growth was constrained by drought stress related to high evaporation rates during the previous winter and the current spring. However, LW growth proved a particularly sensitive indicator of hydric deficit by evaporation during the winter prior to the growth season. In contrast, EW growth responded to evaporation positively in spring and negatively during the summer prior to the growth season, albeit with a lower degree of association. These characteristics highlight the potential usefulness of LW growth as a study parameter for climatic reconstruction, prognosis of climatic trends and the analysis of markedly seasonal forest ecosystems such as those in the Sierra Madre Occidental. Dry and hot winters in northern Mexico negatively affect forest

positiva entre el crecimiento de EW y la precipitación para el periodo de noviembre a mayo. Este patrón refleja el efecto de la humedad producida por la lluvia, pero no distingue el efecto de la evaporación, especialmente entre marzo y mayo, cuando el estrés hídrico puede ser mayor debido a la falta de lluvia. Esto podría explicar las contrastantes respuestas de crecimiento a la sequía antes o durante la temporada de crecimiento (Figura 3, Figura 4). En el análisis previo a la reconstrucción de la precipitación con base en TRI, Pompa y Jurado (2013) reportan una respuesta positiva a la disponibilidad de agua y una correspondencia gráfica entre la precipitación y TRI para el mismo periodo analizado en el presente estudio, en un área vecina al sitio de estudio. A pesar de ello, los coeficientes de correlación encontrados en el presente estudio para el crecimiento de LW con respecto a la evaporación son más altos que los reportados para la relación entre TRI y la precipitación.

Pompa et al. (2013) también reportaron un efecto negativo de la evaporación en el crecimiento. Los resultados de dicho estudio son consistentes con los del presente estudio en términos de la dirección de la correlación, pero difieren en intensidad, lo que indica mayor respuesta de crecimiento total que de crecimiento de LW. Sin embargo, aunque la respuesta de crecimiento de LW fue menos intensa, también fue más específica estacionalmente y se concentró en el periodo seco entre septiembre y enero, mientras que el crecimiento total fue más variable durante un periodo más amplio, incluyendo meses tanto húmedos como secos. En una exploración de la relación entre el crecimiento de LW y la precipitación estacional, Griffin et al. (2011) reportaron altos coeficientes de correlación positivos para la temporada de lluvias, pero una respuesta débil al estrés hídrico causada por la baja precipitación en la estación seca. Esto enfatiza la necesidad de eliminar el efecto de EW sobre el crecimiento de LW para una explicación más precisa de las variaciones en las lluvias provocadas por el monzón norteamericano. Una reconstrucción del clima basada sólo en el crecimiento de LW reveló que la aparición histórica de eventos extremos de precipitación recurrentes y aleatorios es un efecto de la región de los monzones que contrasta con la estabilidad registrada en Norteamérica durante el siglo pasado (Griffin et al., 2013). En este sentido, los resultados del presente estudio indican que el crecimiento de LW podría ser utilizado en la región de estudio para evaluar directamente la respuesta de *P. cooperi* al déficit hídrico durante las etapas previas al crecimiento, sin la aplicación de algún ajuste con respecto al efecto de crecimiento de EW.

Las deducciones tienen implicaciones notables para interpretar el papel que la evaporación desempeña en el crecimiento de los anillos. Se muestra que LW también es muy sensible al déficit hídrico y a las tasas altas de evaporación, lo que sugiere que la evaporación

productivity. This negative impact indicates that rising evaporation rates constitute an important driver of forest growth decline.

Acknowledgments

We would like to thank the support given by Julián Cerano and Omar Durán at the INIFAP CENID-RASPA Lab in Mexico, who helped in the gathering and processing of dendrochronological data. We thank Carlos A. Aguirre-Salado, three anonymous reviewers and the editorial team for their useful comments that improved the manuscript.

End of English Version

References / Referencias

- Biondi, F., & Waikul, K. (2004). DENDROCLIM2002: A C program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 30, 303–311. doi:10.1016/j.cageo.2003.11.004
- Cerano-Paredes, J., Méndez-González, J., Amaro-Sánchez, A., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Rubio-Camacho, E. A. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(3), 413–423. doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.02.007
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). Consultado 15-04-2013 en <http://smn.cna.gob.mx/emas/>
- Cook, E. R., & Holmes, R. H. (1984). *Program ARSTAN user manual*. Tucson, AZ, USA: University of Arizona Press.
- Cruz-Cobos, F., De los Santos-Posadas, H. M., & Valdez-Lazalde, J. R. (2008). Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia*, 42, 473–485. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v42n4/v42n4a10.pdf>
- Díaz, S. C., Therrell, M. D., Stahle D. W., & Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings 1647-1992. *Climate Research*, 22, 237–244. Obtenido de <http://www.intres.com/articles/cr2002/22/c022p237.pdf>
- Gochis, D. J., Brito-Castillo, L., & Shuttleworth, W. J. (2006). Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. *Journal of Hydrology*, 316, 53–70. Obtenido de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/outreach/proceedings/cdw29_proceedings/Gochis.pdf
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., & Márquez, M. A. (2007). *Vegetación y ecorregiones de Durango*. México: Plaza y Valdés.
- Griffin, D., Meko, D. M., Touchan, R., Leavitt, S. W., & Woodhouse, C. A. (2011). Latewood chronology development for summer-moisture reconstruction in the U. S. Southwest. *Tree-Ring Research*, 67(2), 87–101. doi: 10.3959/2011-4.1

por sí misma puede ser, probablemente, un impulsor directo del declive de crecimiento y muerte de los bosques, en lugar de las temperaturas más cálidas o las precipitaciones bajas (Liang, Eckstein, & Liu, 2008). El crecimiento radial muestra dependencia considerable de las condiciones climáticas de los meses de invierno anteriores a la estación de crecimiento y, por tanto, de las condiciones de evaporación.

Conclusiones

El crecimiento de EW y LW respondió negativamente a la evaporación en *P. cooperi*. En particular, el crecimiento radial fue limitado por el estrés derivado de las sequías relacionadas con las altas tasas de evaporación durante el invierno anterior y la primavera actual. Sin embargo, el crecimiento de LW resultó ser un indicador particularmente sensible al déficit hídrico por evaporación durante el invierno antes de la temporada de crecimiento. En contraste, el crecimiento de EW respondió positivamente a la evaporación en la primavera y negativamente durante el verano antes de la temporada de crecimiento, aunque con menor grado de asociación. Estas características destacan la utilidad potencial del crecimiento de LW como parámetro de estudio para la reconstrucción climática, el pronóstico de las tendencias climáticas y el análisis de los ecosistemas forestales marcadamente estacionales como los de la Sierra Madre Occidental. Los inviernos secos y calientes en el norte de México afectan negativamente la productividad forestal. Este impacto negativo indica que el aumento de las tasas de evaporación constituye un motor importante en la disminución del crecimiento de los bosques.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo proporcionado por Julián Cerano y Omar Durán, quienes ayudaron con la recolección y procesamiento de los datos dendrocronológicos en el laboratorio de CENID-RASPA del INIFAP en México. También agradecemos a Carlos A. Aguirre-Salado, a tres revisores anónimos y al equipo editorial por sus útiles comentarios que mejoraron el manuscrito.

Fin de la versión en español

- Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Stahle, D. W., Faulstich, H. L., Carrillo, C., ...Leavitt, S. W. (2013). North American monsoon precipitation reconstructed from tree-ring latewood. *Geophysical Research Letters*, 40(5), 1–5. doi: 10.1002/grl.50184
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78. Obtenido de <http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/261223/1/trb-43-069-078.pdf>
- Liang, E. Y., Eckstein, D., Liu, H. Y. (2008). Climate-growth relationships of relict *Pinus tabulaeformis* at the northern limit of its natural distribution in northern China. *Journal of Vegetation Science*, 19, 393–406. doi: 10.3170/2008-8-18379
- Meko, D. M., Touchan, R., Villanueva-Díaz, J., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Castro, C. L., ...Leavitt, S. W. (2013). Sierra San Pedro Mártir, Baja California, cool-season precipitation reconstructed from earlywood width of *Abies concolor* tree rings. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118, 1660–1673. doi: 10.1002/2013JG002408
- Mérian, P., Pierrat, J. C., & Lebourgeois, F. (2013). Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia*, 31, 58–67. doi:10.1016/j.dendro.2012.07.001
- Pompa-García, M., & Jurado, E. (2013). Seasonal precipitation reconstruction and teleconnections with ENSO based on tree ring analysis of *Pinus cooperi*. *Theoretical and Applied Climatology*. doi: 10.1007/s00704-013-1018-6
- Pompa-García, M., Rodríguez-Flores, F. J., Aguirre-Salado, C. A., & Miranda-Aragón, L. (2013). Effect of evaporation on forest growth. *Agrociencia*, 47, 829–836. Obtenido de <http://scielo.unam.mx/pdf/agro/v47n8/v47n8a7.pdf>
- Stahle, D. W., Villanueva-Díaz, J., Burnette, D. J., Cerano-Paredes, J., Heim, J. R. R., Fye, F. K., ...Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*. doi: 10.1029/2010GL046472
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. Tucson, AZ, USA: University of Arizona Press.
- Woodhouse, C. A., & Lukas, J. J. (2006). Multi-century tree-ring reconstructions of Colorado streamflow for water resource planning. *Climate Change*, 78, 293–315. doi: 10.1007/s10584-006-9055-0
- Yocom, L. L., Fulé, P. Z., Brown, P. M., Cerano, J. N., Villanueva-Díaz, J., Falk, D. A., & Cornejo-Oviedo, E. (2010). El Niño–Southern Oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology*, 91, 1660–1671. Obtenido de <http://library.eri.nau.edu/gsd/collect/erilibra/index/assoc/HASH0e72.dir/doc.pdf>