

INFLUENCIA DE LA EVAPORACIÓN EN EL CRECIMIENTO FORESTAL

EFFECT OF EVAPORATION ON FOREST GROWTH

Marín Pompa-García^{1*}, Felipa J. Rodríguez-Flores², Carlos A. Aguirre-Salado³, Liliana Miranda-Aragón⁴

¹Facultad de Ciencias Forestales, UJED. Boulevard Durango y Papaloapan s/n. Colonia Valle del Sur. 34120. Durango, Durango. México. (mpgarcia@ujed.mx). ²Universidad Politécnica de Durango, Carretera Durango-México Km. 9.5 Dolores Hidalgo. 34300. Durango, Durango, México. (jesu_rgz@hotmail.com). ³Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 78290. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. (carlos.aguirre@uaslp.mx). ⁴Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 78321. Carretera San Luis Potosí-Matehuala, km. 14.5, Ej. Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. (lilianaragon@gmail.com)

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue modelar la dinámica anual de la evaporación (E) durante el crecimiento radial de *Pinus cooperi* Blanco, con importancia económica y ecológica alta en el norte de México. Se usaron datos dendrocronológicos y se identificó un modelo que los relacionara con registros instrumentales de E para el período de 1964 a 2010. Los análisis de correlación y regresión mostraron que E afecta negativamente el crecimiento durante los meses previos a la estación de crecimiento y durante el verano del año de crecimiento (junio y julio). E es una variable significativa que permite explicar el estrés por deficiencia de humedad y puede tener implicaciones en el manejo de *P. cooperi* ante variaciones climáticas.

Palabras clave: dendrocronología, incremento radial, relaciones clima-árbol.

INTRODUCCIÓN

La sensibilidad de los ecosistemas forestales a las variaciones climáticas fue documentada por Sheffield *et al.* (2012) y Sáenz-Romero *et al.* (2012). La disminución de la precipitación y el incremento de la temperatura repercuten en la vulnerabilidad de las especies forestales (Williams *et al.*, 2012). Es probable que las sequías aumenten en frecuencia e intensidad (IPCC, 2007) y plausiblemente provocará que las especies forestales modifiquen su distribución (Gómez-Mendoza y Arriaga, 2007) y tiendan a contraerse en sitios con climas propicios para su

ABSTRACT

The objective of this study was to model the dynamics of annual evaporation (E) during radial growth of *Pinus cooperi* Blanco, which is economically and ecologically important for northern México. Dendrochronological data were used to identify a model that would, with instrumental records, relate E for the period 1964 to 2010. The correlation and regression analyses showed that E negatively affects growth during the months previous to the growth season and during the summer of the growth year (June and July). E is a significant variable that can explain water stress and that can have implications for management of *P. cooperi* in the face of climatic variation.

Key words: dendro-chronology, radial increase, climate-tree relationships.

INTRODUCTION

Sheffield *et al.* (2012) and Sáenz-Romero *et al.* (2012) documented the sensitivity of forest ecosystems to climatic variations. Decrease in precipitation and increase in temperature have repercussions in forest species' vulnerability (Williams *et al.*, 2012). It is likely that droughts increase in frequency and intensity (IPCC, 2007), plausibly causing modification of forest species distribution (Gómez-Mendoza and Arriaga, 2007), tending to migrate to sites with climates that favor their adaptation (Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Rehfeldt *et al.*, 2012). Price *et al.* (2001) and Flores and Allen (2004) report models for forest species and climatic variables relationship, and according to Stahle *et al.* (2011) and Constante-García *et al.* (2009), the association between temperature and precipitation is

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: junio, 2013. Aprobado: octubre, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 47: 829-836. 2013.

adaptación (Sáenz-Romero *et al.*, 2010; Rehfeldt *et al.*, 2012). Price *et al.* (2001) y Flores y Allen (2004) reportan modelos para las relaciones de las especies forestales con las variables climáticas y, según Stahle *et al.* (2011) y Constante-García *et al.* (2009), la asociación entre temperaturas y precipitación es valiosa para estudiar la sensibilidad al clima del crecimiento de las coníferas.

Diversos procedimientos se han desarrollado para cuantificar la sequía (Mishra y Singh, 2010), cada uno con sus fortalezas y debilidades, pero prácticamente todos usan la precipitación en sus formulaciones. Estos enfoques son apropiados para asociar el crecimiento de las especies con el estrés regional por falta de humedad, e indican que el déficit de agua se debe a la escasez de precipitación y al incremento de la temperatura. Pero esas modelaciones no consideran el efecto específico de la evaporación anual (E) en la dinámica del crecimiento forestal. La influencia de E en la vegetación en tiempos de sequía puede ser mayor que en las temporadas sin limitaciones de humedad. E es influenciada por elementos climáticos, como la velocidad del viento, la radiación solar y la humedad relativa, y puede variar en escalas temporales breves (Seneviratne, 2012). Por tanto tiene una función relevante en las relaciones clima-planta.

Pinus cooperi Blanco es una especie con distribución geográfica amplia (González *et al.*, 2007) y utilizada mayormente por la industria forestal en el estado de Durango, México, por sus características tecnológicas (Cruz *et al.*, 2008). Modelar la contribución de E en su crecimiento radial es útil para conocer los escenarios que podría enfrentar la especie ante variaciones de humedad durante el año. Por tanto, el objetivo de este estudio fue analizar la relación entre E , a lo largo del ciclo anual, y el crecimiento radial de *P. cooperi* mediante un enfoque dendroclimático. La hipótesis fue que esa relación es estadística.

MATERIALES Y MÉTODOS

En dos rodales localizados en la Sierra Madre Occidental del estado de Durango, México (24° 8' 27" N, 105° 3' 18" O y 24° 4' 43" N, 105° 1' 15" O, y 2362 msnm) se seleccionaron 10 árboles de *P. cooperi*. Los sitios seleccionados fueron de mala calidad, pendiente similar (5 %) y exposición (SE) para reducir sus efectos en el crecimiento del arbolado y con ello mejorar la extracción de la señal climática. Se extrajeron dos o tres virutas por árbol, a 1.3 m de altura, con taladros de Pressler (Haglof, Sweden). Como medida de suficiencia del tamaño de la muestra

valuable to study the sensitivity of conifers growth to climate.

Several procedures have been developed to quantify drought (Mishra and Singh, 2010). Each has its strengths and weaknesses, but practically all use precipitation in their formulation. These approaches are appropriate for associating species growth with regional stress caused by lack of moisture. They indicate that water deficit is due to the scarcity of rainfall and to rising temperatures. But these models do not consider the specific effect of annual evaporation (E) on the dynamics of forest growth. The effect of E on vegetation during drought can be greater than during seasons in which moisture is not limited. E is influenced by elements of climate such as wind speed, solar radiation and relative humidity, and it can vary over short time scales (Seneviratne, 2012). Therefore, it has a relevant role in climate-plant relationships.

Pinus cooperi Blanco is a species widely distributed geographically (González *et al.*, 2007). It is mostly used by the forest industry in the state of Durango, México, because of its technological characteristics (Cruz *et al.*, 2008). Modelling the contribution of E to radial growth is useful in defining the scenarios that the species may confront moisture variation during the year. Therefore, the objective of this study was to analyze the relationship between E , throughout the yearly cycle, and radial growth of *P. cooperi*, using the dendro-climatic approach. The hypothesis was that this relationship is statistical.

MATERIALS AND METHODS

Ten *P. cooperi* trees were selected from two stands located in the Sierra Madre Occidental in the state of Durango, México (24° 8' 27" N, 105° 3' 18" W ad 24° 4' 43" N, 105° 1' 15" W, 2362 masl). The selected plots were of low productivity with similar slopes (5 %) and exposition (SE) to reduce other effects on growth of the stand and thus improve extraction of climate signal. Two or three cores per tree were extracted at a height of 1.3 m using a Pressler increment borer (Haglof, Sweden). The statistic EPS (expressed population signal) was used as a measure of sufficiency of sample size, recommended for paleoclimatic studies (Mérián *et al.*, 2013). Sampling damaged or deformed trees or trees whose growth had been subjected to competence for light and nutrients was avoided. This allowed characterizing the stands' response to climate.

Cores were mounted, dried and sanded progressively until the rings were clearly visible for measurement. The readings were

se usó el estadístico *EPS* (señal expresada de la población), recomendado para estudios paleoclimáticos (Mérián *et al.*, 2013). Se evitó muestrear arboles dañados, deformes o cuyo crecimiento haya estado sujeto a competencia por luz y nutrientes. Esto permitió caracterizar la respuesta climática del arbolado.

Los núcleos fueron montados, secados y lijados progresivamente hasta que los anillos fueron claramente visibles para la medición. Las lecturas se hicieron con un estereomicroscopio (precisión de 0.001 mm) integrado a una computadora (Velmex Inc., NY). La calidad del fechado y de las mediciones se verificó mediante el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con el clima se removieron con el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1984). El resultado fue una serie residual estandarizada de anillos anuales (*R_s*) con media de uno y varianza cero, que representó la señal común de crecimiento para el sitio, de un ciclo anual, repetida indefinidamente. Esta cronología se usó para analizar las relaciones entre el crecimiento del arbolado y la variable climática.

Para determinar el efecto predictivo de *E* sobre el crecimiento radial, se utilizó la información mensual instrumental de *E* (en mm) de la estación meteorológica Santa Bárbara (CNA, 2012), localizada a ±5 km de los sitios de muestreo). La base de datos incluyó los meses de enero del año previo al crecimiento a diciembre del año actual, periodo de 1964 a 2010 (Figura 1).

Las relaciones entre *R_s* y *E* se obtuvieron mediante análisis de correlación y regresión. Para correlación se usó DendroClim2002 (Biondi y Waikul, 2004), que calcula el coeficiente de correlación de Pearson, con 1000 réplicas de cada dato en un

done with a stereomicroscope (0.001 mm precision) integrated with a computer (Velmex Inc., NY). The quality of dating and measurements was verified with the software COFECHA (Holmes, 1983). Biological and geometric tendencies not related to climate were removed with the software ARSTAN (Cook and Holmes, 1984). The result was a standardized residual series of yearly rings (*R_s*) with a mean of one and variance zero. This represented the common growth signal for the site, of one yearly cycle, repeated indefinitely. This chronology was used to analyze the relationships between stand growth and the climate variable.

To determine the predictive effect of *E* on radial growth, we used monthly instrumental information on *E* (in mm) from the Santa Barbara weather station (CNA, 2012) (located ±5 km from the sampling sites). The data base included the months of January of the year previous to growth and December of the current year, period 1964 to 2010 (Figure 1).

The relationships between *R_s* and *E* were obtained through correlation and regression analyses. For correlation DendroClim 2002 (Biondi and Waikul, 2004) was used, and it calculates the Pearson correlation coefficient with 1000 replications of each datum in the randomized re-sampling. This procedure enabled to obtain the months in which instrumental evaporation has greater effect on *R_s*. Once the evaporation response period was established, the predictive effect of *E* on radial growth was modeled using regression with SAS/STAT™ (SAS, 2004). The procedure Stepwise was applied with a significance level of 0.01 for *R_s* significantly correlated with the predictive variable. This method searches for the variable included in the model and

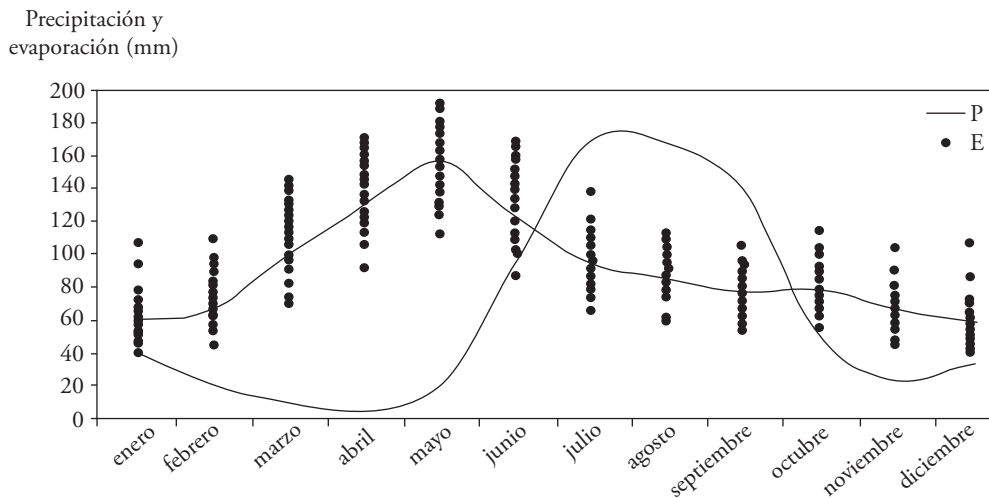


Figura 1. Diagrama de la estación meteorológica “Santa Bárbara” para el periodo de 1964 a 2010 (CNA, 2012). P es la precipitación mensual en mm; E es la evaporación mensual en mm; y los puntos muestran la dispersión de datos anuales.

Figure 1. Diagram of the Santa Barbara weather station for the period 1964 to 2010 (CNA, 2012). P is monthly precipitation in mm; E is monthly evaporation in mm; and the dots show the dispersion of yearly data.

remuestreo aleatorizado. Este procedimiento permitió obtener los meses en que la evaporación instrumental tiene mayor efecto en R_s . Una vez establecido el periodo de respuesta de la evaporación, se modeló el efecto predictivo de E en el crecimiento radial usando con el SAS/STAT® (SAS, 2004). El procedimiento stepwise se aplicó con un nivel de significancia de 0.01 para R_s significativamente correlacionado con la variable predictiva. Este método busca las variables incluidas en el modelo y elimina aquellas sin una F estadísticamente significativa (SAS, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un total de 28 muestras de *P. cooperi* fueron analizadas. El diámetro normal medio fue 48.2 cm. La sensibilidad media fue 0.45 y la inter correlación de series 0.61; esto indica una respuesta climática común. La longitud de la cronología fue 111 años y la proporción de la señal expresada de la población fue 89 % (Figura 2).

R_s se correlacionó significativamente con E en el área de estudio, con coeficientes máximos de -0.49 (Figura 3). Hubo una tendencia consistente para E durante el periodo de análisis. E se correlacionó negativamente con los valores de septiembre a diciembre previos a la estación de crecimiento y de enero a julio del año actual. Los valores altos de los coeficientes de Pearson sobresalieron durante enero, previo a la estación de crecimiento ($r=-0.49$; $p\leq 0.001$). En escala menor, los valores durante el verano del año actual del crecimiento también influenciaron negativamente el crecimiento radial, como en junio ($r=-0.36$, $p\leq 0.001$).

La regresión lineal indicó que R_s estuvo asociada significativamente con la variable climática. E tuvo influencia negativa en R_s durante los meses del año

eliminate those without an F statistically significant (SAS, 2004).

RESULTS AND DISCUSSION

A total of 28 samples of *P. cooperi* were analyzed. The normal diameter was 48.2 cm. Mean sensitivity was 0.45 and the series intercorrelation was 0.61, indicating a common response to climate. Length of the chronology was 111 years and the proportion of the expressed signal of the population was 89% (Figure 2).

R_s correlated significantly with E in the study area, with maximum coefficients of 0.49 (Figure 3). A consistent trend for E during the analyzed period was observed. E correlated negatively with the values of September and December previous to the growth season and with January to July of the current year. The high values of the Pearson coefficients during January previous to the growth season were notable ($r=-0.49$; $p\leq 0.001$). At a lower scale, the values during the summer of the current year also had negative influence on radial growth, for example June ($r=-0.36$, $p\leq 0.001$).

Linear regression indicated that R_s was associated significantly with the variable climate. E had negative influence on R_s during the months of the growth year (Table 1; Figure 3). However, the other months showed no statistically significant relationship. Evaporation during January and June explained 33 % of the total variance of R_s , indicating that radial growth of *P. cooperi* reacted negatively to winter and summer evaporation. Particularly, in January there was a stronger negative effect on growth given its higher coefficient.

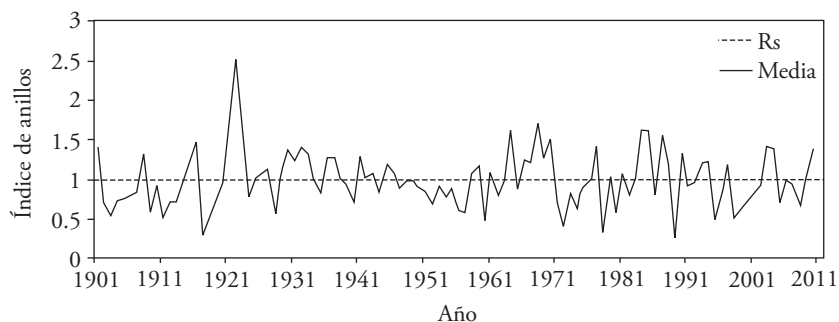


Figura 2. Cronología residual de *Pinus cooperi*.
Figure 2. Residual chronology of *Pinus cooperi*.

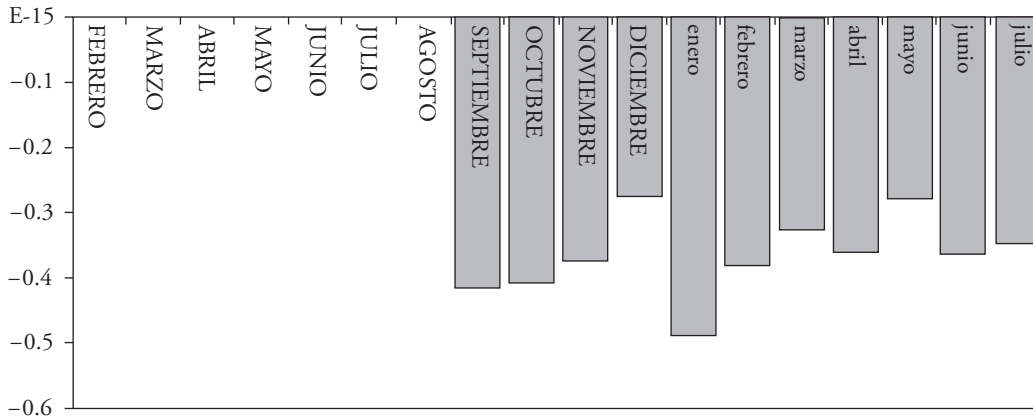


Figura 3. Análisis de correlación entre la cronología residual de *Pinus cooperi* y datos de evaporación instrumental del periodo de 1964 a 2010. Meses con mayúscula denotan periodos previos a la estación de crecimiento y con minúsculas corresponden a meses del año actual del crecimiento.

Figure 3. Correlation analysis between residual chronology of *Pinus cooperi* and instrumental evaporation data from the period 1964 to 2010. Months in upper case denote periods previous to the growth season and those in lower case correspond to months of growth of the current year.

del crecimiento (Cuadro 1; Figura 3); sin embargo, los demás meses no mostraron relación estadísticamente significativa. La evaporación durante enero y junio explicó 33 % de la varianza total de *R_s*, indicando que el crecimiento radial de *P. cooperi* reaccionó negativamente a la evaporación de invierno y verano. Particularmente, en enero hubo un efecto negativo mayor en el crecimiento dado su coeficiente mayor en del modelo.

Los resultados del potencial dendrocronológico de *P. cooperi* en el norte de México fueron similares a los de las coníferas en los ecosistemas vecinos (Constante-García *et al.*, 2009; Santillán-Hernández *et al.*, 2010). La información obtenida con *EPS* (>0.85)

The results of *P. cooperi*'s dendrochronological potential in northern Mexico were similar to those found for conifers in nearby ecosystems (Constante-García *et al.*, 2009; Santillán-Hernández *et al.*, 2010). The information obtained with *EPS* (>0.85) showed that sample size was a reliable estimator of the climatic signal quality (Mérian *et al.*, 2013).

E was identified as a factor that affects radial growth of *P. cooperi*. *R_s* correlated more highly during the months previous to growth (Figure 3). This negative response indicates that evaporation during this period causes stress to *P. cooperi*. High rates of evaporation increase respiration and evapotranspiration, resulting in deficit of water

Cuadro 1. Modelos seleccionados para *R_s* con el procedimiento stepwise (p ≤ 0.01).
Table 1. Models selected for *R_s* with the stepwise procedure (p ≤ 0.010).

Modelo	Variable	Parámetros estimados	Error estándar	Cuadrado medio del error	R ²	Pr>F
<i>R_s</i>	Intercepto	2.7617	0.3968	0.0955	0.33	0.0001
	ene	-0.0099	0.0027			0.0008
	jun	-0.0046	0.0017			0.0097

R_s: serie residual estandarizada de anillos anuales; ene, jun: meses del año actual del crecimiento (enero y junio); R²: coeficiente de determinación ajustado ♦ *R_s*: standardized residual series of yearly rings; ene, jun: months of current year of growth (January and June); R²: adjusted coefficient of determination.

permite identificar que el tamaño de muestra empleado fue un estimador confiable de la calidad de la señal climática (Mérián *et al.*, 2013).

E fue identificado como un factor que afecta el crecimiento radial de *P. cooperi*. *Rs* tuvo la correlación mayor durante los meses previos al crecimiento (Figura 3). Esta respuesta negativa indica que la evaporación en ese periodo provoca estrés a *P. cooperi*. Tasas altas de evaporación aumentan la respiración y la evapotranspiración, lo que resulta en déficit de agua necesaria para la síntesis de carbohidratos durante la próxima estación de crecimiento (Huang *et al.*, 2010). Esto afecta el desarrollo del cambium y consecuentemente el crecimiento radial (Linares y Tiscar, 2010).

Los resultados del presente estudio concuerdan con los de Shibu *et al.* (2003) y Flores y Allen (2004) quienes reportan que el crecimiento y la productividad de coníferas dependen de la disponibilidad de humedad en el suelo. Según Adams y Kolb (2005), el crecimiento radial de *Picea engelmannii*, *P. flexilis*, *Pinus ponderosa* y *Pseudotsuga menziesii* es sensitivo a la sequía regional en ecosistemas montañosos. En un sitio vecino, Bickford *et al.* (2011) confirmaron que dos especies de *Pinus* reducirán su crecimiento debido a sequías.

El análisis de regresión mostró que la evaporación de enero y junio es una limitación para el crecimiento radial de la especie (Cuadro 1), lo que confirma la importancia de la humedad en el suelo para el crecimiento radial, particularmente en invierno y durante el verano (Kerhoulas *et al.*, 2013). El incremento de la tasa de evaporación puede reducir la captura de carbono y en algunos casos provocar disfunciones fisiológicas (Lebourgeois *et al.*, 2012).

Los resultados evidencian que *E* tiene implicaciones directas en el estrés por deficiencia de humedad en los ecosistemas forestales. Según Muller *et al.* (2011), los árboles pueden tolerar tasas bajas de precipitación, pero la formación de tejidos es afectada seriamente por el estrés hídrico. Por tanto, *E*, más que las temperaturas extremas o precipitaciones bajas, puede ser una causa de declinación forestal. Por lo anterior, el estudio del comportamiento de *P. cooperi* en condiciones precarias de humedad es esencial para los planes de manejo y conservación de coníferas sensibles a variaciones climáticas (Martíñón-Martínez *et al.*, 2011). Según Seager *et al.* (2009), se prevén condiciones de estrés hídrico en ecosistemas

necesario for synthesis of carbohydrates during the next growth season (Huang *et al.*, 2010). This affects development of the cambium and, consequently, of radial growth (Linares and Tiscar, 2010).

The results of this study agree with those of Shibu *et al.* (2003) and Flores and Allen (2004), who report that growth and productivity of conifers depend on the availability of soil moisture. According to Adams and Kolb (2005), radial growth of *Picea engelmannii*, *P. flexilis*, *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii* is sensitive to regional drought in mountain ecosystems. In a neighboring site, Bickford *et al.* (2011) confirmed that growth of two *Pinus* species will decrease due to droughts.

The regression analysis showed that evaporation in January and June limits radial growth of the species (Table 1), confirming the importance of soil moisture for radial growth, particularly in winter and summer (Kerhoulas *et al.*, 2013). An increase in evaporation rate can reduce carbon sequester and in some cases it can cause physiological disorders (Lebourgeois *et al.*, 2012).

The results give evidence that *E* has direct implications in stress caused by moisture deficiency in forest ecosystems. According to Muller *et al.* (2011), trees can tolerate low rates of precipitation, but tissue formation is seriously affected by water stress. Therefore, *E*, more than extreme temperatures or low rainfall, can be a cause of forest decline. For this reason, the study of *P. cooperi* under precarious conditions of moisture is essential for planning management and conservation of conifers sensitive to climatic variations (Martíñón-Martínez *et al.*, 2011). According to Seager *et al.* (2009), conditions of water stress are forecast for ecosystems in northern Mexico. Availability of water during young ages of the vegetation is a decisive factor for forest regeneration (Gómez-Romero *et al.*, 2012). Thus, some reforestation practices, such as assisted migration (Sáenz-Romero *et al.*, 2011), can take these findings into account to enhance the capacity for adaptation of forest species. For subsequent studies, analysis of other variables associated with the microsite are not ruled out, since they may have implications for plant development (López-Upton *et al.*, 2004) and of atmospheric stability (Englehart and Douglas, 2002, Balbontín *et al.*, 2011) that can also affect *E*.

del norte de México. La disponibilidad de agua a edades tempranas de la vegetación es un factor decisivo para la regeneración forestal (Gómez-Romero *et al.*, 2012). Así, algunas prácticas de reforestación pueden tomar en cuenta estos hallazgos, incluyendo la migración asistida, para apoyar la capacidad de adaptación de las especies forestales (Sáenz-Romero *et al.*, 2011). Para estudios subsecuentes no se descarta el análisis de otras variables asociadas al micrositio, que pueden tener implicaciones en el desarrollo de las plantas (López-Upton *et al.*, 2004), y de las condiciones de estabilidad atmosférica (Englehart y Douglas, 2002, Balbontín *et al.*, 2011) que también pueden influir en *E*.

CONCLUSIONES

E es un factor que afectó negativamente el crecimiento de *P. cooperi*. La influencia mayor se presentó durante el invierno previo a la estación de crecimiento y el verano actual. Las implicaciones en las estrategias de conservación de la especie pueden relacionarse con la selección de la época idónea de reforestación de estos ecosistemas. En el ámbito de las variaciones climáticas, no se descarta asociar a *E* con otras anomalías climáticas.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el apoyo del laboratorio CENID-RASPA del INIFAP, en el procesado y recolección de material de campo. Así mismo, se agradecen las observaciones de revisores anónimos y del editor asociado que contribuyeron a mejorar este trabajo.

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.
- Balbontín C., A. Calera, J. González-Piqueras, I. Campos, M. L. López, y E. Torres. 2011. Comparación de los sistemas de covarianza y relación de Bowen en la evapotranspiración de un viñedo bajo clima semiárido. *Agrociencia* 45(1): 87-103.
- 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 Am. Naturalist* 71(3): 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.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2012. Datos climáticos de estaciones meteorológicas de Durango: Santa Barbara.

CONCLUSIONS

E is a factor that negatively affected growth of *P. cooperi*. The greatest influence occurred during the winter previous to the growth season and the current summer. The implications of these findings in strategies for conservation of the species can be related to selecting the ideal time for reforesting these ecosystems. In the scope of climatic variations, it is not ruled out that *E* is associated with other climatic anomalies.

—End of the English version—



- 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.* 34(106): 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.
- Englehart, P. J., and A. V. Douglas 2002. México's summer rainfall patterns: an analysis of regional models and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera* 15: 147-164.
- Flores F. J., y H. K. Allen. 2004. Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque* 25(3): 11-24.
- 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.
- Gómez-Romero, M., J. C. Soto-Correa, J. A. Blanco-García, C. Sáenz-Romero, J. Villegas, y R. Lindig-Cisneros. 2012. Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia* 46(8): 795-807.
- 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.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin.* 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 Re-*

- port of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, 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-Struct. Funct.* 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.
- Martínón-Martínez, R. J., J. J. Vargas-Hernández, A. Gómez-Guerrero, y J. López-Upton. 2011. Composición isotópica de carbono en follaje de *Pinus pincea* Gordon sometido a estrés hídrico y térmico. *Agrociencia* 45(2): 245-258.
- 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.
- Mishra, A. K., and V. P. Singh. 2010. A review of drought concepts. *J. Hydrol.* 391(1-2): 202-216.
- Muller, B., F. Pantin, M. Génard, O. Turc, S. Freixes, M. C. Piques, and Y. Gibon. 2011. Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. *J. Exp. Bot.* 62: 1715-1729.
- Price, T. D., N. E. Zimmermann, P. Van Der Meer, M. J. Lexer, P. Leadley, I. T. M. Jorristma, J. Schaber, D. F. Clark, P. Lasch, S. McNulty, W. Jianguo, and B. Smith. 2001. Regeneration in gap models: Priority issues for studying forest responses to climate change. *Climatic Change* 3-4 (51): 475-508.
- 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., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu, and B. A. Richardson. 2010. Splines models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102: 595-623.
- 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(3): 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(1): 17-30.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS / STAT 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 4975 p.
- Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Naik, J. Nakamura, C. Li, E. Cook, and D. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmosfera* 22: 1-31.
- Seneviratne, S. I. 2012. Historical drought trends revisited. *Nature* 491: 338-339.
- Sheffield, J., E. F. Wood, and M. L. Roderick. 2012. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature* 491: 435-438.
- Shibu, J., C. Merritt, and C. L. Ramsey. 2003. Growth, nutrition, photosynthesis and transpiration responses of longleaf pine seedling to light, water and nitrogen. *For. Ecol. Manage.* 180(10): 335-344.
- 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.
- 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. 2012. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, In press. doi:10.1038/NCLIMATE1693.