

ANÁLISIS DENDROCLIMÁTICO DE AHUEHUETE (*Taxodium mucronatum* Ten.) EN EL CENTRO DE MÉXICO

DENDROCLIMATIC ANALYSIS OF BALDCYPRESS (*Taxodium mucronatum* Ten.) IN CENTRAL MÉXICO

Arian Correa-Díaz¹, Armando Gómez-Guerrero^{1*}, José Villanueva-Díaz¹, L. Ubaldo Castruita-Esparza¹,
Tomás Martínez-Trinidad¹, Rosalinda Cervantes-Martínez²

¹Forestal. Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Estado de México. (agomezg@colpos.mx). ²Laboratorio de Dendrocronología, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Gómez Palacio, Durango, México.

RESUMEN

La información histórica de los anillos de crecimiento en árboles longevos y su relación con el clima es útil para comprender la variabilidad climática y los impactos del hombre en el ciclo del agua. El objetivo de este estudio fue desarrollar series dendrocronológicas de anillo total de ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el centro de México para estudiar su relación con el clima. Los sitios estudiados fueron: San Felipe, Estado de México (SF), San Miguel, estado de Querétaro (SM), Tasquillo, estado de Hidalgo (TA) y Jantetelco, estado de Morelos (JA); situados en condiciones climáticas diferentes. La amplitud mínima y máxima de las cronologías fueron 109 para SF y 260 años para TA. Excepto para TA, todas las cronologías fueron altamente significativas. La variación mayor entre índices de ancho de anillo (IAA) fue para SF ($\sigma=2.66$) y la menor para JA ($\sigma=0.97$). Hubo una correlación significativa entre IAA y el incremento en área basal (IAB). El IAB se ha mantenido estable en la mayoría de los sitios, pero en SF el IAB se redujo 85 % después de 1970, pese a tener los árboles más jóvenes. No se encontró asociación entre los índices dendrocronológicos de los sitios estudiados, pero en episodios de baja frecuencia hubo coincidencia. En la mayoría de los sitios, desde 1910 los periodos de exceso de humedad han sido menos frecuentes, pasando de un periodo de retorno aproximado de 15 a 40 años, mientras que los episodios de sequía extrema desde 1970 han pasado de un periodo de retorno de 20 a 10 años. El crecimiento del ahuehuete mostró mínima influencia de la precipitación de años previos; sin embargo, para el año de crecimiento, la precipitación enero-febrero fue determinante para su desarrollo. La correlación entre las variables climáticas y crecimiento varió

ABSTRACT

The historic information of growth rings in long-living trees and their relationship with climate is useful for understanding climatic variability and impact of man on the water cycle. The objective of the present study was to develop total ring dendrochronological series of Montezuma baldcypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) in central Mexico to study their relationship with climate. The study sites were: San Felipe, State of Mexico (SF), San Miguel, state of Querétaro (SM), Tasquillo, state of Hidalgo (TA) and Jantetelco, state of Morelos (JA); located in different climatic conditions. The minimum and maximum amplitude of the chronologies were 109 for SF and 260 years for TA. Except for TA, all of the chronologies were highly significant. The highest variation among indices of ring width (RWI) was for SF ($\sigma=2.66$) and the lowest for JA ($\sigma=0.97$). There was a significant correlation between RWI and basal area increment (BAI). BAI has remained stable in most of the sites, but in SF the BAI decreased by 85 % after 1970, although it had the youngest trees. No association was found among the dendrochronological indices of the sites studied, but in episodes of low frequency there was coincidence. In most of the sites, since 1910 the wet periods have been less frequent, going from a return period of approximately 15 to 40 years, whereas since 1970 the periods of extreme drought have gone from a return period of approximately 20 to 10 years. The growth of the Montezuma baldcypress presented minimum influence from the precipitation of previous years; however, for the growth year, the January-February precipitation was determinant for its development. The correlation among the climatic and growth variables varied among the sites; in SM precipitation was significant, but in SF temperature was more correlated with growth. For purposes of reconstruction and climatic projection, the growth rings of the Montezuma baldcypress of some sites are adequate for reconstructing the history of temperature, and for others rainfall.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: agosto, 2013. Aprobado: junio, 2014.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 48: 537-551. 2014.

entre los sitios; en SM la precipitación fue significativa, pero en SF la temperatura estuvo más correlacionada con el crecimiento. Para fines de reconstrucción y proyección climática, los anillos de crecimiento de ahuehuate de algunos sitios son adecuados para reconstruir el historial de temperatura, y para otros la precipitación.

Palabras clave: Ahuehuate, sabino, cronologías de anillos, variabilidad climática.

INTRODUCCIÓN

La dendrocronología estudia los anillos de crecimiento de los árboles y su fechado, y en conjunto con la climatología dieron lugar a la dendroclimatología, que estudia las relaciones entre el crecimiento arbóreo y el clima del pasado (Fritts, 1976; Cerano *et al.*, 2009). Ambas disciplinas son importantes por su potencial para estudiar el cambio climático global y su efecto en los ciclos del agua y del carbono en especies forestales (Gómez-Guerrero *et al.*, 2013).

El ahuehuate (*Taxodium mucronatum* Ten.) es una especie arbórea de México que por su longevidad (hasta 1650 años) y sensibilidad climática es adecuada para estudios dendroclimáticos (Villanueva *et al.*, 2007). Es la especie arbórea más representada en México y se encuentra en 23 de los 32 estados y en ocho de 12 provincias fisiográficas (Contreras-Medina y Luna-Vega, 2007), por lo cual es una especie estratégica para comprender efectos de variabilidad climática y los cambios en reservorios de agua superficial (Durazo y Farvolden, 1989). Geográficamente, *T. mucronatum* es importante ya que sus cronologías combinadas con las de *T. distichum* del sureste de los EE.UU. permiten la reconstrucción de la precipitación y eventos de El Niño en amplias regiones geográficas (Stahle, 2012).

Los anillos de los árboles son útiles porque a diferencia de los registros climáticos cubren periodos de tiempo más amplios por lo cual se pueden usar para generar reconstrucciones climáticas en escala de siglos o milenios en el caso del ahuehuate (Constante *et al.*, 2010). Las comunidades de ahuehuates del centro de México están desapareciendo por el crecimiento urbano y la sobreexplotación de los mantos acuíferos (Durazo y Farvolden, 1989; Martínez, 1999; Nieto de Pascual, 2009), lo que causa una pérdida de información registrada en sus anillos de

Key words: Baldcypress, juniper, ring chronologies, climatic variation.

INTRODUCTION

Dendrochronology studies growth rings of trees and their date, and along with climatology, led to dendroclimatology, which studies the relationships between tree growth and climate of the past (Fritts, 1976; Cerano *et al.*, 2009). Both disciplines are important for their potential to study global climate change and its effect on the water and carbon cycles in forest species (Gómez-Guerrero *et al.*, 2013).

The Montezuma baldcypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) (referred as baldcypress in the next sections) is a native tree species of Mexico which because of its longevity (up to 1650 years) and climatic sensitivity is adequate for dendroclimatic studies (Villanueva *et al.*, 2007). It is the most represented tree species in México and is found in 23 of the 32 states and in 8 of 12 physiographic provinces (Contreras-Medina and Luna-Vega, 2007), thus it is a strategic species for understanding the effects of climatic variability and the changes in reservoirs of surface water (Durazo and Farvolden, 1989). Geographically, *T. mucronatum* is important, because its chronologies combined with those of *T. distichum* of the southeastern U.S. allow the reconstruction of precipitation and events of El Niño in broad geographic regions (Stahle, 2012).

Tree rings are useful because contrary to climatic records, they cover broader time periods, thus they can be used to generate climatic reconstructions on the scale of centuries or millennia in the case of baldcypress (Constante *et al.*, 2010). The baldcypress communities of central Mexico are disappearing due to urban growth and the over-exploitation of the groundwater (Durazo and Farvolden, 1989; Martínez, 1999; Nieto de Pascual, 2009). This causes a loss of information registered in their annual growth rings, which can be useful for understanding climatic variability. Although the baldcypresses are associated with water reservoirs, they are sensitive to variations in precipitation and water quality. For example, when the water salinity increases, the baldcypress communities can be displaced by species of the genus *Salix* (Durazo and Farvolden, 1989).

crecimiento anual, la cual puede ser útil para comprender la variabilidad climática. A pesar de que los ahuehuetes están asociados a reservorios de agua, son sensibles a la variación de la precipitación y la calidad del agua. Por ejemplo, cuando la salinidad del agua aumenta, las comunidades de ahuehuete pueden ser desplazadas por especies del género *Salix* (Durazo y Farvolden, 1989).

Las hipótesis de este estudio son: 1) dada la sensibilidad de la especie a la precipitación, las comunidades de ahuehuete del centro de México muestran cronologías con un patrón similar y; 2) la temperatura y precipitación media anual explican los cambios en crecimiento radial de ahuehuete. Para probar las hipótesis se realizó un análisis de los anillos de crecimiento anuales de ahuehuete y se correlacionaron con variables climáticas locales (precipitación y temperatura) en cuatro poblaciones del centro de México: San Felipe, Estado de México (SF); San Miguel, estado de Querétaro (SM); Tasquillo, estado de Hidalgo (TA) y, Jantetelco, estado de Morelos (JA).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de estudio

El estudio se desarrolló en cuatro poblaciones de ahuehuete del centro de México (Figura 1). Los sitios SF y SM tienen un clima templado subhúmedo, temperaturas promedio de 15 °C y precipitación de 600 a 750 mm, TA es árido con temperatura promedio de 18 °C y precipitación menor a 350 mm, y JA es cálido subhúmedo con precipitación de 1000 mm.

Muestreo de campo

Los árboles seleccionados tenían apariencia sana, longeva, y ubicados en lugares con el menor disturbio posible (incendios, ataque de plagas, enfermedades y daños físicos), y se procuró muestrear individuos con sección de fuste circular para lograr mediciones más aproximadas de incremento en área basal (IAB). En cada árbol se tomaron dos a tres virutas (núcleos de crecimiento) en forma perpendicular con un taladro de Pressler (marca Haglöff, modelo BS009) de 12 mm de diámetro interno. Las virutas se tomaron a 1.30 m sobre el nivel del suelo (diámetro normal), se secaron 5 d a temperatura ambiente y se lijaron con diversos grados de lija en una secuencia de 80 a 600, con el fin de resaltar los anillos de crecimiento.

The hypotheses of this study are: 1) given the sensitivity of the species to precipitation, the baldcypress communities of central México present chronologies with a similar pattern, and 2) mean annual temperature and precipitation explain the changes in radial growth of baldcypress. To test the hypotheses, an analysis of the annual growth rings of baldcypress was carried out, which was correlated with local climatic variables (precipitation and temperature) in four populations of central Mexico: San Felipe, State of México (SF); San Miguel, state of Querétaro (SM); Tasquillo, state of Hidalgo (TA), and Jantetelco, state of Morelos (JA).

MATERIALS AND METHODS

Study sites

The study was developed in four baldcypress populations of central México (Figure 1). The sites SF and SM have a sub-humid temperate climate, with average temperatures of 15 °C and rainfall of 600 to 750 mm, TA is arid with average temperature of 18 °C and rainfall of less than 350 mm, and JA is warm sub-humid with rainfall of 1000 mm.

Field sampling

The selected trees had a healthy appearance, longevity, and located in places with least possible disturbance (fires, attack of pests, disease and physical damage), and great care was taken to sample individuals with circular trunk section in order to obtain more approximate measurements of basal area increment (BAI). In each tree two to three wood core (growth nuclei) samples were taken perpendicularly with a Pressler wood core sampler (HAGLÖF, model BS009) of 12 mm internal diameter. The samples were taken 1.30 m above ground level (normal diameter), dried 5 d at room temperature and sanded with several grades of sandpaper in a sequence of 80 to 600, in order to show the tree rings.

Dating and measurement

The growth rings of each sample were counted and dated with a high resolution trinocular stereoscope. Then the total ring width was measured with a VELMEX system with 0.001 mm precision, with measurement program MeasureJ2X for Windows (Stokes and Smiley, 1968; Fritts, 1976; Robinson and Evans, 1980).

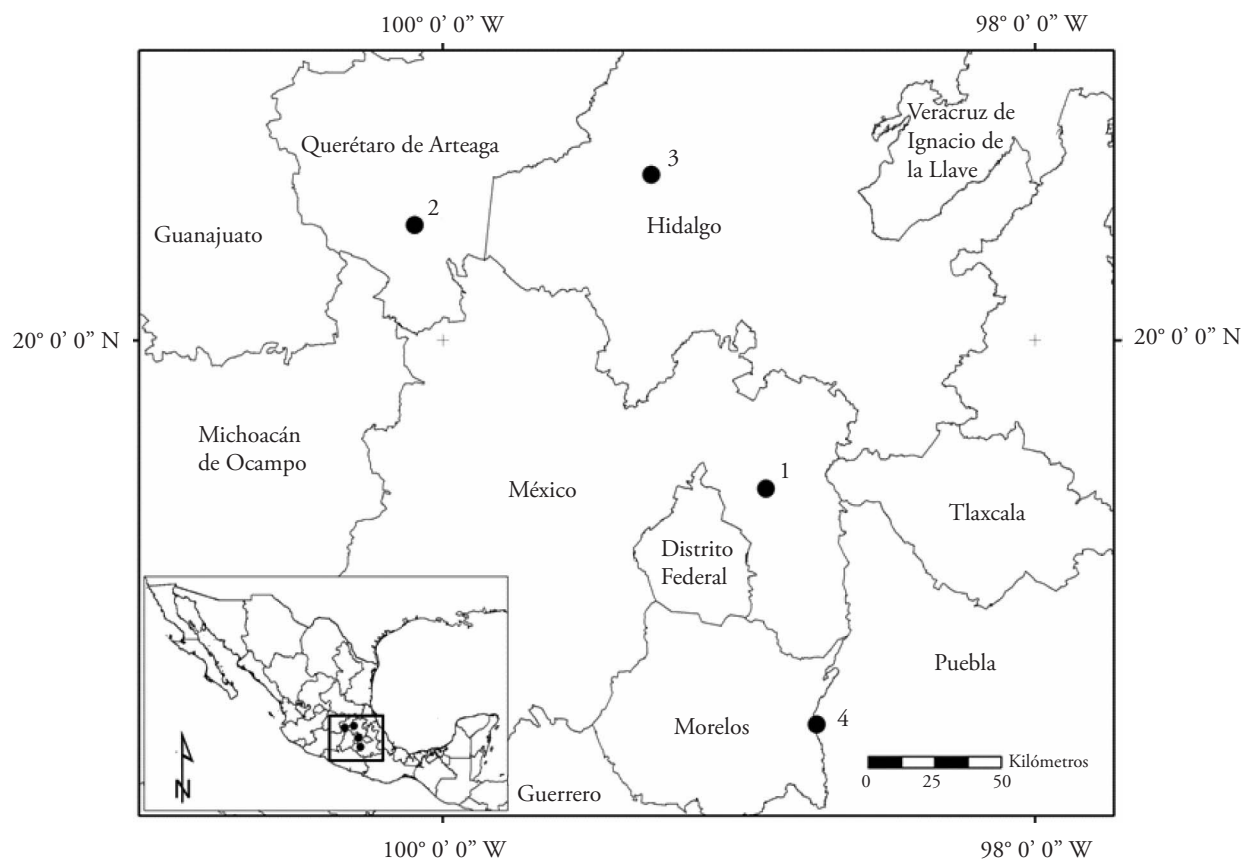


Figura 1. Localización de poblaciones muestreadas de ahuehuete en el centro de México: 1, San Felipe, Estado de México; 2, San Miguel, estado de Querétaro; 3, Tasquillo, estado de Hidalgo; 4, Jantetelco, estado de Morelos.

Figure 1. Location of sampled populations of baldcypress in central México: 1, San Felipe, Estado de México; 2, San Miguel, state of Querétaro; 3, Tasquillo, state of Hidalgo; 4, Jantetelco, state of Morelos.

Fechado y medición

Los anillos de crecimiento de cada viruta se contaron y fecharon con un estereoscopio trinocular de alta resolución. Después se midió el ancho de anillo total con un sistema VELMEX de precisión 0.001 mm, con el programa de medición MeasureJ2X para Windows (Stokes y Smiley, 1968; Fritts, 1976; Robinson y Evans, 1980).

En cada sitio se muestrearon en promedio nueve árboles pero no se usaron todas las muestras ya que éstas deben pasar por un proceso de validación en su calidad dendrocronológica. La presencia de anillos falsos y perdidos, crecimientos excéntricos derivados de contrafuertes provocan que algunos árboles no reflejen la condición ambiental del sitio. La calidad del fechado y exactitud de medición de cada anillo se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1994). La correlación se consideró significativa con valores mayores a 0.32 (Holmes, 1983). Las muestras

In each site an average of nine trees were sampled, but not all of the samples were used, because they must pass through a validation process in their dendrochronological quality. Due to the presence of false and lost rings, as well as eccentric growth derived from buttresses, some trees do not reflect the environmental condition of the site. The quality of dating and precision of measurement of each ring was verified with the program COFECHA (Holmes, 1994). The correlation was considered significant with values higher than 0.32 (Holmes, 1983). The representative samples of each site varied from four to eight wood core samples as indicated in Table 1.

Ring width index (RWI) and smoothed curve (Spline)

The growth series generated by COFECHA were standardized with the program ARSTAN which makes it possible to generate a series of normalized indices with mean of 1.0 and homogeneous

representativas de cada sitio variaron de cuatro a ocho virutas como se indica en el Cuadro 1.

Índice de ancho de anillo (IAA) y curva suavizada (Spline)

Las series de crecimiento generadas por COFECHA se estandarizaron con el programa ARSTAN que permite generar una serie de índices normalizados con media de 1.0 y varianza homogénea. Con este procedimiento se eliminan tendencias biológicas (competencia, supresión y liberación) y geométricas (aumento en el área del fuste con la edad) no relacionadas con el clima (Cook, 1987). La curva suavizada de IAA (spline) se hizo considerando una escala de 100 años con parámetro de ajuste de 10 años, mediante la subrutina FMT, que es parte de la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL) (Cook y Peters, 1981).

Incremento en área basal (IAB)

El IAB se calculó sólo con muestras significativas para la construcción del índice de ancho de anillo, y de secciones de fuste con forma circular obtenidas a la altura del pecho, y se usó la ecuación (1):

$$IAB = \pi(R^2 - R_{n-1}^2) \quad (1)$$

donde IAB = aumento en área basal ($\text{cm}^2 \text{ año}^{-1}$), π =constante matemática pi (3.1416), R= radio del árbol (cm), n= año de formación del anillo.

El IAB se correlacionó con el IAA para establecer el grado de asociación en cada sitio.

variance. With this procedure biological (competition, suppression and liberation) and geometric (increase in trunk area with age) tendencies unrelated to climate were eliminated (Cook, 1987). The smoothed curve of RWI (spline) was made considering a scale of 100 years with adjustment parameter of 10 years, through the subroutine FMT, which is part of the Library of Dendrochronological Programs of the University of Arizona (DPL) (Cook and Peters, 1981).

Increment in basal area (BAI)

The BAI was calculated only with significant wood core samples for the construction of the ring width index, and from circular trunk sections obtained at breast height. The following equation was used:

$$IAB = \pi(R^2 - R_{n-1}^2) \quad (1)$$

where BAI = basal area increment ($\text{cm}^2 \text{ year}^{-1}$), π = mathematical constant pi (3.1416), R=tree radius (cm), n=year of ring formation.

The BAI was correlated with RWI to establish the degree of association in each site.

Climatic variables

The monthly information compiled was of maximum, mean and minimum temperature, along with precipitation accumulated in the climatic stations closest to the sampling points that had historic information of at least 30 years. The climatic bases used were ERIC III (Rapid Climatic Information Extractor) (IMTA, 2006) and of the National Meteorological

Cuadro 1. Promedio de altura, diámetro y edad estimada de poblaciones de ahuehuete en el centro de México.
Table 1. Average of height, diameter and estimated age of baldcypress populations in central México.

Sitio	Altura (m) ± error estándar	Diámetro (m) ± error estándar	Edad estimada (años) [†] ± error estándar	Número de virutas
San Felipe, Estado de México	30.29 ± 1.06	1.32 ± 0.13	130.2 ± 2.1	6
San Miguel, Querétaro	15.43 ± 0.90	1.10 ± 0.12	237.6 ± 9.4	8
Tasquillo, Hidalgo	24.50 ± 0.57	2.19 ± 0.18	248.5 ± 41.5	4
Jantetelco, Morelos	19.75 ± 0.75	1.90 ± 0.24	292.0 ± 27.2	8

[†]Edad estimada $S=(N_i+N_f+N_a)$; N_i = número de anillos en la viruta; N_f =número de anillos faltantes (extrapolación); N_a = número de años para alcanzar la altura de muestreo de 1.3 m sobre el suelo (Años para DAP=10) ♦ [†]Estimated age $S=(N_i+N_f+N_a)$; N_i =number of rings in the sample; N_f =number of missing rings (extrapolation); N_a =number of years to reach sampling height of 1.3 m above ground (Years for CHD= 10).

Variables climáticas

La información mensual recopilada fue la temperatura máxima, media y mínima, así como la precipitación acumulada en las estaciones climáticas más cercanas a los puntos de muestreo que tuvieran información histórica de al menos 30 años. Las bases climáticas usadas fueron ERIC III (Extractor Rápido de Información Climática) (IMTA, 2006) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (SMN, 2013). Los datos climáticos de cada estación se promediaron para construir una base de datos regional por sitio y asociarla al crecimiento de los árboles.

Correlación y respuesta climática de ahuehuete

El análisis de correlación entre IAA y clima incluyó los meses del año previo y del año actual de crecimiento (24 meses), para determinar si el crecimiento actual estuvo influenciado por variables climáticas de años previos y no sólo por la variable climática del año en curso. El intervalo de tiempo estuvo en función de la disponibilidad y calidad de los datos. Para el sitio SF se usaron cinco estaciones del periodo de 1952 a 2010, en SM dos estaciones de 1944 a 2010, en TA tres estaciones de 1922 a 2011, y para JA tres estaciones de 1926 a 2011.

El IAA se relacionó con el promedio mensual calculado de temperatura máxima, media, mínima y precipitación regional para cada sitio, para lo cual se usó el programa DENDROCLIM 2002 (Biondi y Waikul, 2004). Comparado con otros procedimientos, este programa permite calcular intervalos de confianza por un método de remuestreo (*bootstrap*) que asegura pruebas precisas para la significancia de las variables ($\alpha=0.05$). Además de correlacionar los valores medios anuales de las variables climáticas con el IAA, DENDROCLIM 2002, detecta los meses del año más significativos y que explican el crecimiento del árbol a partir de variables climáticas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cronologías y cofechado

La intercorrelación entre series fue significativa para todos los sitios excepto para TA. El sitio con mejor intercorrelación y sensibilidad media fue SM, seguido por SF y JA. La autocorrelación fue de un año para todos los sitios, excepto TA, donde fue de dos años (Cuadro 2). Lo anterior indica que en los sitios SF, SM y JA, el crecimiento del año actual está correlacionado con el del año previo y este efecto se prolongó por dos años para TA.

Service (SMN) (SMN, 2013). The climatic data of each station were averaged to construct a regional data base per site and associate it to tree ring growth.

Correlation and climatic response of baldcypress

The analysis of correlation between RWI and climate included the previous months of the year and of the current growth year (24 months), to determine if current growth was influenced by climatic variables of the previous years and not just by the climatic variable of the current year. The time interval was a function of the availability and quality of the data. For the site SF five stations were used, of the period 1952 to 2010, in SM two stations from 1944 to 2010, in TA three stations from 1922 to 2011, and for JA three stations from 1926 to 2011.

The RWI was related with the monthly average calculated from maximum, mean and minimum temperature and regional precipitation for each site, for which the program DENDROCLIM 2002 was used (Biondi and Waikul, 2004). Compared with other procedures, this program makes it possible to calculate confidence intervals by a re-sampling (bootstrap) method which insures precise tests for the significance of the variables ($\alpha=0.05$). In addition to correlating the annual mean values of the climatic variables with the RWI, DENDROCLIM 2002 detects the most significant months of the year that explain tree growth from climatic variables.

RESULTS AND DISCUSSION

Chronologies and co-dating

The inter-correlation among series was significant for all of the sites except for TA. The site with best inter-correlation and mean sensitivity was SM, followed by SF and JA. The autocorrelation was of one year for all of the sites, except TA, where it was of two years (Table 2). The above indicates that in sites SF, SM and JA, current year growth is correlated with that of the previous year, and this effect was prolonged for two years for TA.

The ages found in the study confirm the longevity for the species reported by Cortés *et al.* (2010), Villanueva *et al.* (2011) and Stahle *et al.* (2012). The most common age of the baldcypress in the Mexican gallery forests fluctuates between 100 and 600 years (Villanueva *et al.*, 2010).

The standard version of the chronology showed significant correlation with the climatic variables,

Cuadro 2. Estadísticos del programa COFECHA para ahuehuete en el centro de México.
Table 2. Statistics of the program COFECHA for baldcypress in central México.

Sitio	Periodo	Extensión [†] (años)	Intercorrelación entre series	Sensibilidad media	Desviación Est.	Autocorrelación [‡]
San Felipe, Estado de México	1904-2012	109	0.396 [†]	0.401	2.695	0.783(1)
San Miguel, Querétaro	1870-2012	143	0.509 [†]	0.433	1.171	0.648(1)
Tasquillo, Hidalgo	1753-2012	260	0.226	0.384	1.725	0.730(2)
Jantetelco, Morelos	1780-2012	233	0.364 [†]	0.344	0.975	0.642(1)

[†]Cronología altamente significativa ($\alpha=0.01$) ♦ [‡]Highly significant chronology ($\alpha=0.01$).

^{*}Representa el número de orden de un proceso autoregresivo AR ♦ [‡]Represents the order number of an autoregressive process AR.

Las edades encontradas en el estudio confirman la longevidad para la especie reportada por Cortés *et al.* (2010), Villanueva *et al.* (2011) y Stahle *et al.* (2012). La edad más común del ahuehuete en los bosques de galería mexicanos fluctúa entre 100 y 600 años (Villanueva *et al.*, 2010).

La versión estándar de la cronología mostró correlación significativa con las variables climáticas, y por esta razón se empleó en todos los sitios como un indicador del ritmo de crecimiento del árbol y cambios en episodios favorables y no favorables de clima (Figura 2).

La cronología SF mostró un IAA con una media de 0.92 (± 0.3). Se identificaron cuatro periodos por debajo de la media (indicativos de periodos secos), donde los años críticos fueron 1952 con un índice de 0.32, 1961 con 0.27, 1987 con 0.15 y 2006 con 0.23. Sólo se distingue un periodo claro por arriba de la media, el cual abarca aproximadamente de 1965 a 1975. En el sitio SM destacan cuatro periodos por debajo de la media, a inicios de 1880, finales de 1890, y los periodos de 1930-1940 y 1970-1990. Los años críticos fueron 1881 (0.30), 1898 (0.25), 1930 (0.40), 1983 (0.25) y 1998 (0.18). Los máximos IAA están representados en los años 1870 (2.15), 1908 (2.0), 1949 (2.0) y 2007 (1.70).

El sitio con menor significancia fue TA; la media del IAA fue 0.94 (± 0.35). Destacan los periodos de 1895-1905, 1945-1950 y 1980-1985 por estar por debajo de la media, y con años críticos como 1905 (0.39), 1946 (0.43) y 1982 (0.22). Los periodos por arriba de la media fueron 1885-1890 y 1910-1920. En JA se encontraron valores promedio de IAA de 0.93 (± 0.28). Los periodos por arriba de la media fueron 1930-1940, 1960-1964 y 1978-1983, con máximos en 1933 (1.7), 1965 (1.38) y 1981 (1.5).

and for this reason, it was used in all of the sites as an indicator of the growth rhythm of the tree and changes in favorable and unfavorable climate episodes (Figure 2).

The SF chronology showed a RWI with a mean of 0.92 (± 0.3). Four periods below the mean were identified (indicative of dry periods), where the critical years were 1952 with an index of 0.32, 1961 with 0.27, 1987 with 0.15 and 2006 with 0.23. Only one clear period above the mean is distinguished, which covers approximately 1965 to 1975. In site SM four periods stand out below the mean, at the beginning of 1880, end of 1890, and the periods of 1930-1940 and 1970-1990. The critical years were 1881 (0.30), 1898 (0.25), 1930 (0.40), 1983 (0.25) and 1998 (0.18). The maximum RWI are represented in the years 1870 (2.15), 1908 (2.0), 1949 (2.0) and 2007 (1.70).

TA was the site with lowest significance; the mean of the RWI was 0.94 (± 0.35). The periods of 1895-1905, 1945-1950 and 1980-1985 are outstanding for being below the mean, and with critical years such as 1905 (0.39), 1946 (0.43) and 1982 (0.22). The periods above the mean were 1885-1890 and 1910-1920. In JA average values of RWI were found of 0.93 (± 0.28). The periods above the mean were 1930-1940, 1960-1964 and 1978-1983, with maximums in 1933 (1.7), 1965 (1.38) and 1981 (1.5).

No significant correlations were found among the standard chronologies of the four sites, but there is correspondence in at least three of four sites in wet years: 1880, 1909, 1965 and 1992; and dry years: 1896, 1926, 1948, 1969, 1983 and 1998, as is observed in Figure 3. The above suggests that some extreme regional climatic episodes were captured by the baldcypress rings. For example, the

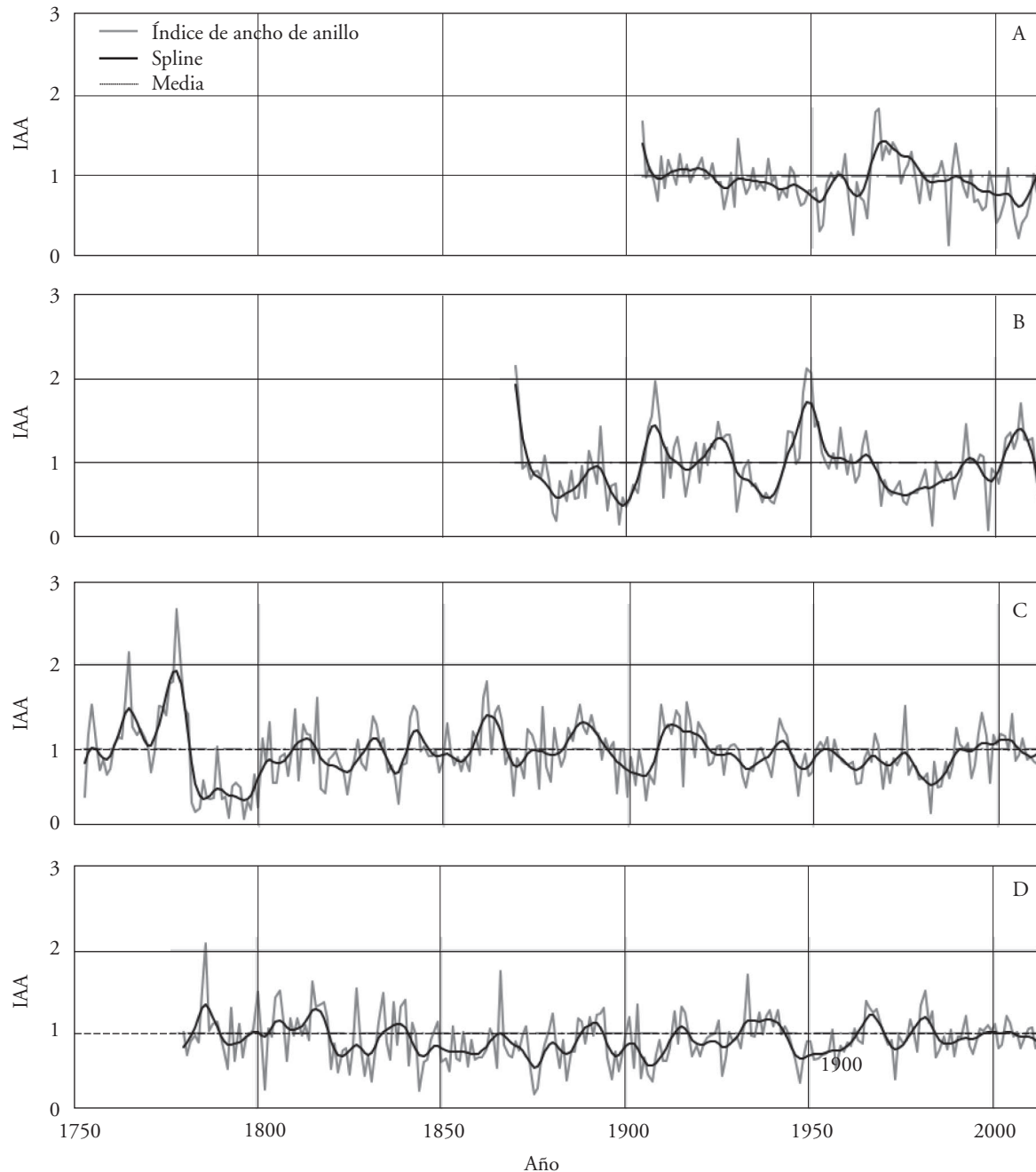


Figura 2. Índice de ancho de anillo y spline (A. San Felipe- Estado de México; B. San Miguel-Querétaro; C. Tasquillo-Hidalgo; D. Jantetelco-Morelos).

Figure 2. Ring width index and spline (A. San Felipe- Estado de México; B. San Miguel-Querétaro; C. Tasquillo-Hidalgo; D. Jantetelco-Morelos).

No se encontraron correlaciones significativas entre las cronologías estándar de los cuatro sitios, pero existe correspondencia en al menos tres de cuatro sitios en años húmedos: 1880, 1909, 1965 y 1992; y años secos, 1896, 1926, 1948, 1969, 1983 y 1998,

droughts of the decade of the 1950's and the period of 1994 to 2005 are identified, which affected the north and central regions of México (Cerano *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2011). In most of the sites, and since 1910, the periods of excess moisture have been

como se observa en la Figura 3. Lo anterior sugiere que algunos episodios climáticos extremos regionales fueron captados por los anillos de ahuehuete. Por ejemplo, se identifican las sequías de la década de 1950 y del periodo de 1994 a 2005, que afectaron al norte y centro de México (Cerano *et al.*, 2009; Stahle *et al.*, 2011). En la mayoría de los sitios, y desde 1910, los periodos de exceso de humedad han sido menos frecuentes, con un cambio en el periodo de retorno aproximado de 15 a 40 años, mientras que los periodos de sequía extrema desde 1970 han pasado de un periodo de retorno de 20 a 10 años (Figura 3). Estos datos no son suficientes para demostrar cambios en el clima, pero sí son indicadores de cambios recientes de la variabilidad climática que muestran la probabilidad de eventos de sequía más frecuentes en el centro del país. Con base en estos resultados y en otros estudios en la región se puede concluir que el ahuehuete es una especie adecuada para estudios de variabilidad climática (Suzán-Azpíri *et al.*, 2007).

Incremento en área basal (IAB)

El mayor crecimiento de los sitios se encontró en SF, mientras que el más bajo fue en SM (134.0 y 58.0 $\text{cm}^2 \text{año}^{-1}$, respectivamente). El IAB promedio en TA y JA fue de 117.0 y 128.0 $\text{cm}^2 \text{año}^{-1}$, respectivamente. La correlación entre el IAA y IAB fue significativa en todos los sitios y r varió de 0.48 a 0.72 (Figura 4).

Las tendencias indican que el IAB se ha mantenido estable en TA, SM y JA. Sin embargo, en SF la

less frequent, with a change in the return period of approximately 15 to 40 years, whereas the periods of extreme drought since 1970 have gone from a return period of 20 to 10 years (Figure 3). These data are not sufficient to demonstrate climate changes, but they are indicators of recent changes in climatic variability that show the probability of more frequent drought events in central Mexico. Based on these results and on other studies in the region, it can be concluded that the baldcypress is an adequate species for studies of climatic variability (Suzán-Azpíri *et al.*, 2007).

Basal area increment (BAI)

The highest growth of the sites was found in SF, whereas the lowest was in SM (134.0 and 58.0 $\text{cm}^2 \text{year}^{-1}$, respectively). The average BAI in TA and JA was 117.0 and 128.0 $\text{cm}^2 \text{year}^{-1}$, respectively. The correlation between the RW1 and BAI was significant in all of the sites, and r varied from 0.48 to 0.72 (Figure 4).

The tendencies indicate that the BAI has been stable in TA, SM and JA. However, in SF the reduction of growth is more evident compared with the other sites, although it is the site with the youngest trees. This result could be explained by the level of alteration of the original conditions for tree growth, because in this site there is greater disturbance. The BAI generally is maintained constant during most of the life of the tree and the trees in SF are approximately 130 years old, a value very far from their average

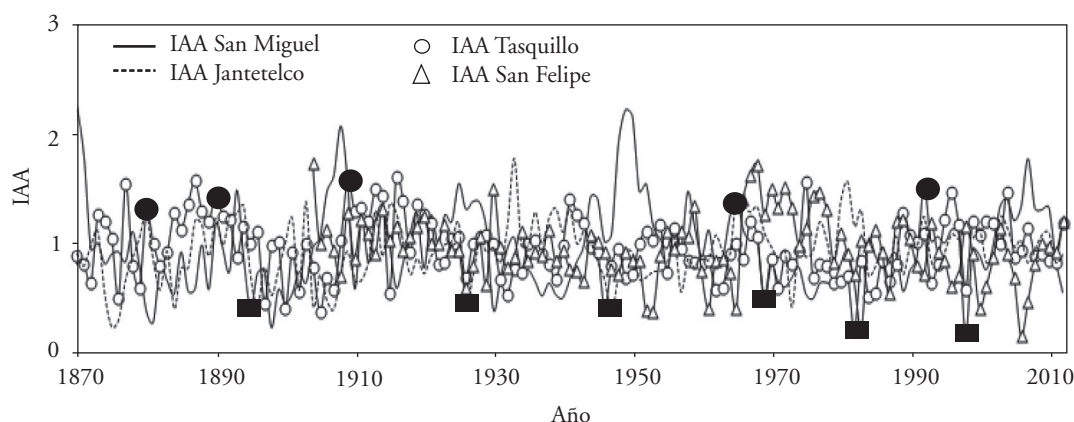


Figura 3. Años comunes entre los IAA de cada sitio. Los círculos negros representan años por arriba de la media (húmedos) y los cuadros negros años por debajo de la media (secos).

Figure 3. Common years among the RWI of each site. Black circles represent years above the mean (wet) and black squares for below the mean (dry).

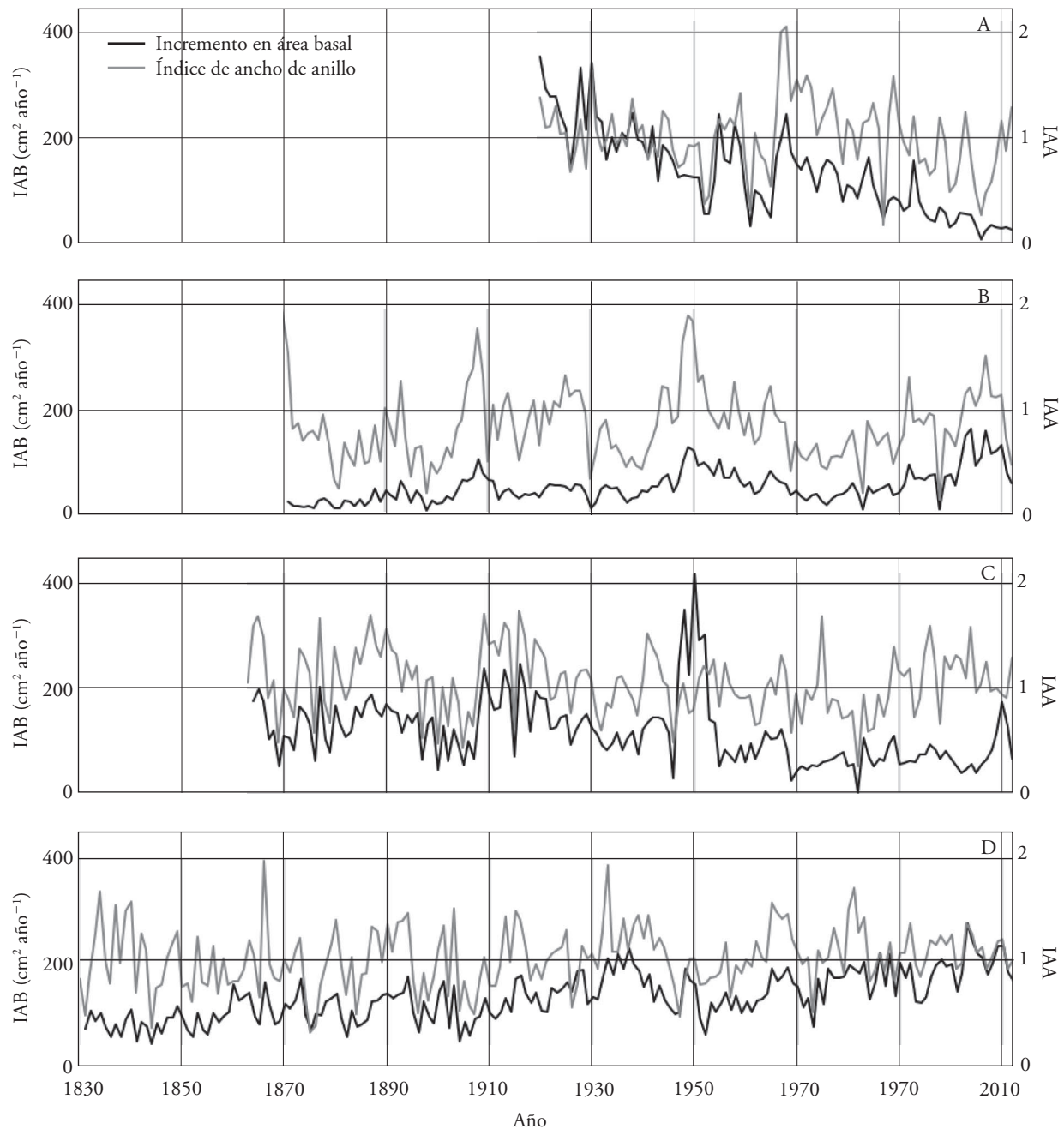


Figura 4. Correlación entre incremento en área basal (IAB) e índice de ancho de anillo (IAA) (A. San Felipe, Estado de México; B. San Miguel, Querétaro; C. Tasquillo, Hidalgo; D. Jantetelco, Morelos).

Figure 4. Correlation between basal area increment (BAI) and ring width index (RWI) (A. San Felipe, Estado de México; B. San Miguel, Querétaro; C. Tasquillo, Hidalgo; D. Jantetelco, Morelos).

reducción de crecimiento es más evidente comparado con los otros sitios, aunque es el sitio con arbolado más joven. Este resultado se podría explicar por el nivel de alteración de las condiciones originales para el crecimiento de los árboles, porque en este sitio hay un disturbio mayor. El IAB generalmente se mantie-

longevity (600 years) in central Mexico. Studies carried out with baldcypress in the state of Querétaro show the same stable tendencies in BAI and the high sensitivity of this species to the dry years, in which the BAI decreases noticeably (Suzán-Azpiri *et al.*, 2007; Enríquez-Peña and Suzán-Azpiri, 2011).

ne constante en la mayor parte de la vida del árbol y los árboles de SF son de 130 años aproximadamente, un valor muy lejano a su longevidad promedio (600 años) en el centro de México. Estudios realizados con ahuehuete en el estado de Querétaro muestran las mismas tendencias estables en IAB y la alta sensibilidad de esta especie a los años secos, en los que el IAB disminuye notablemente (Suzán-Azpiri *et al.*, 2007; Enríquez-Peña y Suzán-Azpiri, 2011).

Relación de los IAA y variables climáticas

En SF y JA, la temperatura media, máxima y mínima mensual mostraron correlación negativa con IAA; en especial, las temperaturas medias y mínimas fueron las más significativas para ambos sitios (Figura 5). La precipitación de octubre presentó correlación positiva en SF y el periodo enero-marzo en JA.

En SM se encontró una correlación positiva entre temperatura máxima y crecimiento para febrero, agosto y septiembre del año del crecimiento ($r=0.30$) y con el periodo de julio a septiembre del año previo ($r = 0.21$) (no se muestran datos del año previo). La temperatura media no se correlacionó significativamente con ningún mes del año del crecimiento, pero sí con febrero, marzo y julio del año previo. Para la temperatura mínima hubo una correlación significativa negativa en octubre ($r=-0.30$) y una asociación positiva con marzo del año previo. Para la precipitación se observó una correlación en los 20 años más recientes, entre IAA y precipitación total ($r=0.74$), como lo reportan Villanueva *et al.* (2007).

El sitio TA no mostró ninguna correlación significativa con temperatura máxima para el año de crecimiento, pero si con enero, febrero del año previo. La temperatura media de abril del año previo se correlacionó positivamente con el crecimiento. La temperatura mínima se correlacionó positivamente con junio ($r=0.27$) y noviembre ($r=0.20$). La precipitación del año actual no mostró correlación con el crecimiento, pero si la del año previo con febrero ($r=0.22$) y abril ($r=0.24$).

La mayoría de las cronologías muestran que el IAA está directamente correlacionado con la precipitación e inversamente con la temperatura durante la estación de crecimiento, lo cual concuerda con lo informado por Stahle *et al.* (2012). En esta última relación, las temperaturas altas limitan la actividad cambial en la mayoría de los árboles usados para

Relationship of the BAI and climatic variables

In SF and JA, the monthly mean, maximum and minimum temperature showed negative correlation with RWI; in particular, the mean and minimum temperatures were the most significant for both sites (Figure 5). The precipitation of October presented positive correlation in SF and the period January-March in JA.

In SM a positive correlation was found between maximum temperature and growth for February, August and September of the growth year ($r=0.30$) and with the period of July to September of the previous year ($r=0.21$) (data of the previous year not shown). The mean temperature was not significantly correlated with any month of the growth year, but it was with February, March and July of the previous year. For minimum temperature there was a significant negative correlation in October ($r=-0.30$) and a positive association with March of the previous year. For precipitation a correlation was observed in the 20 most recent years, between RWI and total precipitation ($r=0.74$), as reported by Villanueva *et al.* (2007).

The site TA did not show any significant correlation with maximum temperature for the growth year, but it did with January and February of the previous year. The mean temperature of April of the previous year was positively correlated with growth. The minimum temperature was positively correlated with June ($r=0.27$) and November ($r=0.20$). The precipitation of the current year did not show correlation with growth, but it did with the previous year with February ($r=0.22$) and April ($r=0.24$).

Most of the chronologies show that the RWI is directly correlated with precipitation and inversely with temperature during the growing season, which concurs with what was reported by Stahle *et al.* (2012). In this last relationship, high temperatures limit the cambial activity in most of the trees used for dendrochronological purposes. A probable explanation of the results obtained is that temperature influences the meristematic activity and net photosynthesis of the plant. As they depart from their optimum, the high temperatures limit photosynthesis and respiration, thus affecting growth. In this way, a high temperature during the growth season reduces ring size, particularly when there is

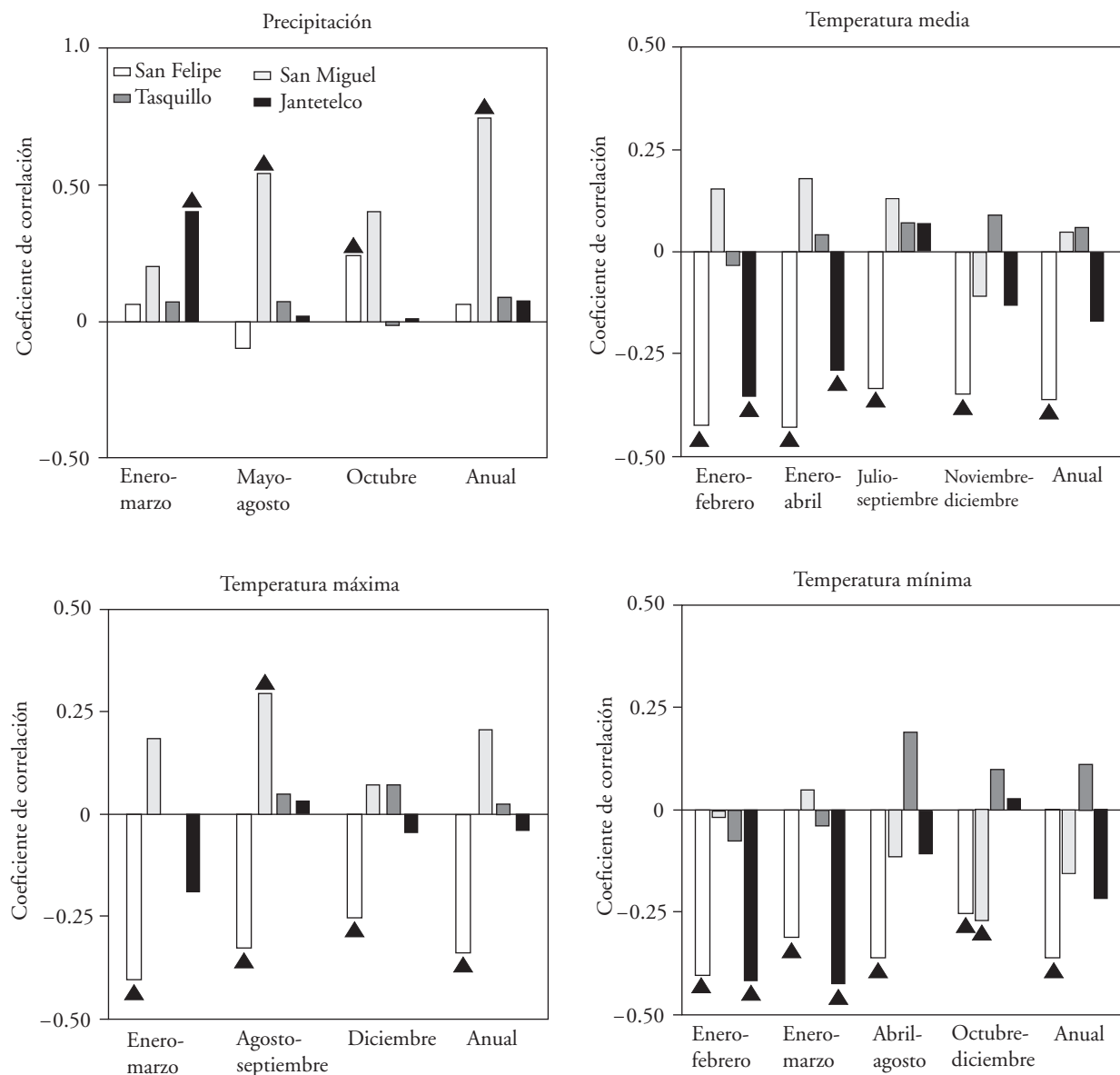


Figura 5. Respuesta a periodos comunes entre índice de ancho de anillo (IAA) y variables climáticas del año de crecimiento. Los triángulos negros indican correlación significativa ($\alpha=0.05$).

Figure 5. Response to common periods between ring width index (RWI) and climatic variables of the growth year. Black triangles indicate significant correlation ($\alpha=0.05$).

propósitos dendrocronológicos. Una probable explicación de los resultados obtenidos es que la temperatura influye en la actividad meristemática y fotosíntesis neta de la planta. Conforme se alejan de su óptimo, las temperaturas altas limitan la fotosíntesis y la respiración afectando el crecimiento. De esta manera, una temperatura alta durante la estación de crecimiento reduce el tamaño de anillo, particularmente

limitation of water. Furthermore, high temperatures in winter can translate into a higher increase during growth season, by creating more favorable conditions for the formation of tracheids (Fritts, 1976).

The higher correlation with measurements of the current year indicates that baldcypress growth is influenced very little by the precipitation of previous years. However, of the current year, the two months

cuando existe limitación de agua. Además, temperaturas altas en invierno se pueden traducir en un incremento mayor durante la estación de crecimiento, al crear condiciones más favorables para la formación de traqueidas (Fritts, 1976).

La mayor correlación con mediciones del año actual indica que el crecimiento del ahuehuete es poco influenciado por la precipitación de años previos. Sin embargo, del año actual, los dos meses con mayor relación en el crecimiento son enero y febrero. En resultado concuerda con la sugerencia de Cortés *et al.* (2010) de que la precipitación de enero-abril explica el crecimiento de ahuehuete. La relación del crecimiento de ahuehuete con variables climáticas depende de cada sitio; así, mientras el sitio SM fue muy sensible a precipitación, en SF las temperaturas medias, mínimas y máximas del año actual están más correlacionadas con el crecimiento. Este resultado es importante porque indica que para estudiar la variabilidad de clima local y su relación con crecimiento arbóreo, se debe poner atención especial en los meses de enero y febrero.

Considerando todos los sitios, la correlación en periodos comunes mostró que para la precipitación no existe ningún periodo común, y la mayor asociación se encontró con la precipitación total anual y el IAA de SM ($r=0.74$). Para temperatura máxima hubo correlación negativa con el sitio de SF, sugiriendo una disminución en el crecimiento conforme aumenta la temperatura máxima. Hubo un periodo común de correlación negativa con la temperatura máxima (agosto-septiembre) en SF y SM. Para la temperatura media se encontró un periodo común de enero a abril entre SF y TA, con una asociación mayor entre los dos primeros meses ($r=-0.43$ y -0.29 , respectivamente). Finalmente, para la temperatura mínima hubo dos periodos comunes entre diferentes sitios; una primera asociación entre el periodo enero-abril de SF y TA, y una segunda entre SF y SM octubre y diciembre, y en ambos casos la correlación fue negativa (Figura 5).

Aunque el ahuehuete es una especie con alto potencial dendrocronológico (Villanueva *et al.*, 2007), los resultados indicaron que no todos los sitios son igualmente útiles para estos fines. De cuatro sitios estudiados, SM y SF tuvieron correlaciones mejores entre el IAA y las variables climáticas. Es posible que la correlación dependa de la distribución de la lluvia previa y durante el verano, ya que en los ahuehetes

with highest correlation in growth are January and February. This result agrees with the suggestion of Cortés *et al.* (2010) that the precipitation of January-April explains the growth of the baldcypress. The relationship of baldcypress growth with climatic variables depends on each site; whereas the site SM was very sensitive to precipitation, in SF the mean, minimum and maximum temperatures of the current year are more correlated with growth. This result is important because it indicates that to study the variability of the local climate and its relationship with tree growth, special attention should be given to the months of January and February.

Considering all of the sites, the correlation in common periods showed that for precipitation there is no common period, and the highest association was found with total annual precipitation and the RWI of SM ($r=0.74$). For maximum temperature there was negative correlation with the site of SF, suggesting a decrease in growth as the maximum temperature increases. There was a common period of negative correlation with maximum temperature (August-September) in SF and SM. For mean temperature a common period was found of January to April between SF and TA, with a higher association between the first two months ($r=-0.43$ and -0.29 , respectively). Finally, for minimum temperature there were two common periods among different sites; a first association between the period January-April of SF and TA, and a second between SF and SM October and December, and in both cases the correlation was negative (Figure 5).

Although the baldcypress is a species with high dendrochronological potential (Villanueva *et al.*, 2007), results indicate that not all of the sites are equally useful for this purpose. Of four sites studied, SM and SF had better correlations between the RWI and climatic variables. It is possible that the correlation depends on the distribution on previous rainfall and during the summer, given that in baldcypress, early wood formation occurs from April to June, when precipitation and temperature increase; while late wood formation occurs from July to August (Villanueva *et al.*, 2013).

CONCLUSIONS

Growth rings of long-living trees such as the species studied supply valuable information for

la formación de madera temprana ocurre de abril a junio, cuando la precipitación y temperatura aumentan; mientras que la formación de madera tardía se presenta de julio a agosto (Villanueva *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

Los anillos de crecimiento de árboles longevos como la especie estudiada aportan información valiosa para comprender la variación del clima en el centro de México. La sensibilidad climática muestra que los ahuehuetes permiten estimar indirectamente la intensidad de los impactos naturales y la perturbación antropogénica. En el sitio San Felipe, el crecimiento en área basal se ha reducido 85 % en las cuatro décadas recientes, a pesar de tener el arbolado más joven, y esto indica el grado de alteración del área de estudio. En la mayoría de sitios y desde 1910, los periodos de exceso de humedad han sido menos frecuentes, pasando de un periodo de retorno aproximado de 15 a 40 años, mientras que los episodios de sequía extrema desde 1970 han pasado de un periodo de retorno de 20 a 10 años.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para los estudios de Maestría en Ciencias del primer autor. Al programa UC-Mexus (proyecto CN-13-546) y al Colegio de Postgraduados por el apoyo a la Investigación (a través de línea Prioritaria de Investigación ocho, Impacto y Mitigación del Cambio Climático).

LITERATURA CITADA

- Biondi, F., and K. Waikul. 2004. Dendroclim2002: A C++ Program for statical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers Geosci.* 30: 303-311.
- Nieto de Pascual P., M. C. C. 2009. Coníferas. In: Ceballos, G., R. List, G. Garduño, R. López C., M. J. Muñozcano Q., E. Collado, y J. San Román (comps). *La Diversidad Biológica del Estado de México. Estudio de Estado. Colección Mayor Biblioteca Mexiquense del Bicentenario.* Toluca de Lerdo, Estado de México. pp: 178-184.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., J. G. Arreola A., I. Sánchez C., R. D. Valdez C., y G. Herrera H. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 15(2): 27-44.
- Constante G., V., J. Villanueva D., J. Cerano P., y A. Estrada J. 2010. Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto Técnico Núm. 19. ISBN: 978-607-425-475-4. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. México. 40 p.
- Contreras-Medina, R., and I. Luna-Vega. 2007. Species richness, endemism and conservation of Mexican gymnosperms. *Biodivers. Conserv.* 16:1803-1821.
- Cook, E. R., and K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bull.* 41: 45- 53.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bull.* 47: 37-59.
- Cortés B., E., J. Villanueva D., J. Estrada A., C. Nieto de Pascual P., V. Guerra C., y O. Vázquez C. 2010. Utilización de *Taxodium mucronatum* Ten. para determinar la variación estacional de la precipitación en Guanajuato. *Rev. Ciencias For. Mex.* 1: 113-120.
- Durazo, J., and R. N. Farvolden. 1989. The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. *J. Hydrol.* 112: 171-190.
- Enríquez-Peña, G., y H. Suzán-Azpiri. 2011. Estructura poblacional de *Taxodium mucronatum* en condiciones contrastantes de perturbación en el estado de Querétaro, México. *Rev. Mex. Biodiv.* 82: 153-167.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree Rings and Climate.* Academic Press. New York, NY, USA. 567 p.
- Gómez-Guerrero, A., L. C. R. Silva, M. Barrera-Reyes, B. Kishchuk, A. Velázquez-Martínez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante, and W. R. Horwath. 2013. Growth decline and divergent tree ring isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) contradict predictions of CO_2 stimulation in high altitudinal forests. *Global Change Biol.* 19: 1748-1758.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.* 43: 69 -78.
- Holmes, R. L. 1994. DPL-Dendrochronology Program Library. University of Arizona, Tucson, AZ.
- IMTA. 2006. Estaciones climáticas extraído de ERIC III (Extractor Rápido De Información Climática). 1 Cd. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos, México.

—End of the English version—

-----*-----

- Martínez-Bautista, A. E. 1999. El ahuehuete. CONABIO. Biodiversitas 25: 12-14.
- Robinson, W. J., and R. Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bull.* 40: 59-64.
- SMN. 2013. Base de datos climatológica. Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua-SMN. <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/Diarios> (Consulta: marzo 2013).
- Stahle, D. W., J. Villanueva D., D. J. Burnette, J. Cerano P., R. Heim Jr., F. K. Fye, R. Acuña S., M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, and D. K. Stahle. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophys. Res. Lett.* 38: 1-4.
- Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva, J. Cerano, F. K. Fye, R. D. Griffin, M. K. Cleaveland, and D. K. Stahle. 2012. Tree-ring analysis of ancient baldcypress trees and subfossil wood. *Quaternary Sci. Rev.* 34: 1-15
- Stokes, M. A., and T. L. Smiley. 1968. *An Introduction to Tree-ring Dating*. University of Chicago Press. Chicago, IL. USA. 73 p.
- Suzán-Azpíri, H., G. Enríquez-Peña, and G. Malda-Barrera. 2007. Population structure of the mexican baldcypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) in Querétaro, México. *For. Ecol. Manage.* 242: 243-249.
- Villanueva D., J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano P., M. D. Therrell, R. Morán M., y M. K. Cleaveland. 2007. Potencial dendrocronológico de *Taxodium mucronatum* Ten. y acciones para su conservación en México. *Ciencia For.* 32: 9-37.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D.W. Stahle, V. Constante G., L. Vázquez S., J. Estrada A., y J. D. Benavides S. 2010. Árboles longevos de México. *Ensayo. Rev. Cien. For. Mex.* 1: 7-30.
- Villanueva D., J., V. Constante G., J. Cerano P., M. M. Tostado P., J. Estrada A., y D.W. Stahle. 2011. Árboles longevos de sabino (*Taxodium Mucronatum* Ten.) en el río San Pedro Mezquital. Folleto Técnico Núm. 23. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. México. 23 p.
- Villanueva D., J., V. Constante G., J. Cerano P., A. R. Martínez S., D. W. Stahle, y J. Estrada A. 2013. Fenología y crecimiento radial del sabino (*Taxodium Mucronatum* Ten.) en el río San Pedro Mezquital, Durango. Folleto Técnico Núm. 27. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. México. 33 p.