



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.128>

Artículo

Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México

Hydroclimatic Behavior of Conifers at *Cerro El Potosí*, Nuevo León, Mexico

José Villanueva Díaz^{1*}, Lorenzo Vázquez Selem², Juan Estrada Ávalos¹, Aldo R. Martínez Sifuentes¹, Julián Cerano Paredes¹, Pamela A. Canizales Velázquez³, Osvaldo Franco Ramos² y Fátima del Rocío Reyes Camarillo¹

Abstract

Cerro El Potosí (El Potosí Hill) (CPO) has an elevation gradient from 2 200 to 3 719 m and is the habitat of a variety of conifers. The objectives of this study were to 1) integrate a dendrochronological network composed of *Pinus culminicola*, *Pinus hartwegii*, *Pseudotsuga menziesii*, and *Pinus greggii*; 2) develop a representative rainfall reconstruction, and 3) analyze the influence of atmospheric circulation phenomena on the interannual and multiannual rainfall variability at CPO. In order to fulfill these objectives, four climate-sensitive chronologies were developed, the longest one (1420-2010) being for *Pinus hartwegii*, and the shortest (1850-2010), for *Pinus greggii*. The association between chronologies indicates a common climatic signal, as corroborated by the Principal Component Analysis. A representative chronology for different elevations of CPO covering the 1700-2010 period was developed and used to reconstruct the January-September seasonal precipitation. The driest years in the reconstruction were 1785 and 1801, while the wettest years were 1791, 1832, and 1911. The *El Niño* Southern Oscillation (ENSO) was found to exert a significant influence on rainfall ($r= 0.53$, $p<0.01$), through the Tropical Rainfall Index (TRI). The influence of hurricanes detected on the late wood chronologies indicates the potential to analyze the historical impact of this atmospheric disturbance on the production of ecosystem services for the region.

Key words: Conifers, dendrochronology, *El Niño* Southern Oscillation, atmospheric circulation patterns, hydroclimate, climate variability.

Resumen

El Cerro Potosí (CPO) se caracteriza por un gradiente altitudinal de 2 200 a 3 719 m y por ser hábitat de diversas coníferas. Los objetivos de este estudio fueron: 1) generar una red dendrocronológica de *Pinus culminicola*, *Pinus hartwegii*, *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus greggii*; 2) desarrollar una reconstrucción de lluvia estacional; y 3) determinar la influencia de fenómenos atmosféricos de circulación general sobre la variabilidad interanual y multianual de la precipitación en CPO. Para lograr esos objetivos, con métodos dendrocronológicos se generaron cuatro cronologías climáticamente sensitivas; la más extensa (1420-2010) fue de *Pinus hartwegii*, y la más corta (1850-2010), de *Pinus greggii*. La asociación entre series dendrocronológicas mostró una respuesta climática común y mediante componentes principales. Se integró una serie representativa de los diversos estratos de elevación, que cubre el período 1700-2010. La reconstrucción de lluvia estacional enero-septiembre detectó que los años más secos fueron 1785 y 1801, y los más húmedos, 1791, 1832 y 1911, con una influencia significativa ($r= 0.53$, $p<0.01$) del Niño Oscilación del Sur (ENSO), a través del índice de lluvia tropical (TRI). La influencia de huracanes detectada en las series de madera tardía constituye una alternativa para analizar, históricamente, la influencia de estos fenómenos atmosféricos en el crecimiento de las especies y en la producción de servicios hidrológicos para la región.

Palabras clave: Coníferas, dendrocronología, El Niño Oscilación del Sur, fenómenos atmosféricos circulatorios, hidroclima, variabilidad climática.

Fecha de recepción/ Reception date: 15 de diciembre de 2017

Fecha de aceptación/Acceptance date: 3 de septiembre de 2018

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, INIFAP. México.

²Instituto de Geografía, UNAM. México; correo-e: villanueva.jose@inifap.gob.mx

³Facultad de Ciencias Forestales, UANL. México.

Introducción

El entendimiento de la variabilidad hidroclimática de islas del cielo es de vital importancia desde el punto de vista ecológico y social, particularmente cuando estos sitios son ricos en diversidad biológica, con presencia de especies endémicas, alta provisión de recursos hídricos y de otros servicios ecosistémicos, esenciales para el bienestar de la sociedad. Uno de esos sitios en el noreste de México es el Cerro Potosí (CPO), ubicado en la porción centro-sur del estado de Nuevo León; montaña que forma parte de la Sierra Madre Oriental y que se extiende en un gradiente altitudinal de 2 000 a 3 721 m, con una superficie mayor a 1 000 km², y que constituye el parteaguas de tres cuencas hidrológicas que drenan hacia el Golfo de México, y que proveen de recurso hídricos para el desarrollo social y económico de asentamientos humanos en los estados de Nuevo León y Tamaulipas (INEGI, 1986).

La diversidad de coníferas presentes en los distintos pisos altitudinales del CPO, se caracteriza por poseer especies tolerantes a la sequía en su estrato inferior y diversas coníferas, con mayores requerimientos hídricos, en elevaciones superiores, hacen de esta área un escenario natural, rico en biodiversidad para analizar la influencia del clima en el comportamiento del crecimiento de los taxa ahí presentes; así como y del efecto de disturbios originados por incendios y por cambios en el uso del suelo; tal es el caso del incendio de 1998 que redujo, significativamente, la población del taxón endémico, *Pinus culminicola* Andresen & Beaman, a menos de 30 ha (Jiménez *et al.*, 2003).

La existencia de especies arbóreas representativas de las diversas altitudes en esta montaña, constituye una excelente oportunidad para generar una red dendrocronológica y realizar reconstrucciones dendroclimáticas que permitan analizar, históricamente, la variabilidad hidroclimática y su influencia en la disponibilidad hídrica para los asentamientos humanos que dependen de ella.

La cercanía del CPO al Golfo de México, pudiese influir en el desarrollo de las especies y en la producción de recursos hidrológicos, a partir de la presencia de vientos alisios, frentes fríos y huracanes que encuentran como barrera física los altos picos de la Sierra Madre Oriental, donde descargan humedad y se diluyen.

La influencia de los fenómenos atmosféricos de circulación general, como la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés), El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), inciden en la existencia de eventos hidroclimáticos extremos en el noreste de México (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Méndez y Magaña, 2010; Stahle *et al.* 2016); lo anterior se evidencia por las sequías que en el pasado han provocado carestía de alimentos y hambrunas (García, 1997); situación que, actualmente, se agrava con el calentamiento global (Seager *et al.*, 2009).

Las preguntas de investigación de este estudio fueron: 1) analizar si existe una respuesta climática común entre las especies presentes en diversas altitudes en CPO, y 2) si la variabilidad climática interanual y multianual detectada en las cronologías, tiene influencia significativa de fenómenos atmosféricos de circulación general.

Para dar respuesta a esas preguntas, los objetivos de este estudio fueron: 1) generar una red dendrocronológica de las especies arbóreas representativas del gradiente altitudinal del CPO; 2) analizar su respuesta climática; y 3) desarrollar una reconstrucción de precipitación, que permita analizar su variabilidad en el tiempo y determinar el efecto que en ella ejercen diversos fenómenos atmosféricos de circulación general.

El análisis histórico y la frecuencia de eventos hidroclimáticos extremos es importante para determinar la frecuencia, duración e intensidad con que se presentan dichos eventos, con la meta de establecer acciones de prevención y de mitigación para la conservación tanto de los ecosistemas, como de los recursos hidrológicos que se generan en el CPO (INEGI, 1986).



Materiales y Métodos

Área de estudio

El Cerro Potosí es uno de los picos más elevados de la Sierra Madre Oriental. Geográficamente, se ubica en el municipio Galeana, parte centro-sur del estado de Nuevo León; en las coordenadas geográficas extremas 24°50'35" a 24°53'16" de latitud norte y 100°13'16" a 100°15'12" de longitud oeste de *Greenwich*. Debido a la existencia de un gradiente altitudinal, que se extiende desde 2 000 m en la base del cerro, hasta 3 721 m en su parte más alta, presenta diversos tipos de clima, en función de la altitud y exposición, predominan los climas semiáridos del tipo BS₁kw"(e), en la exposición oeste y condiciones más húmedas en las orientaciones este y norte. Acorde a García-Arévalo y González-Elizondo (1991), el clima de la cima del cerro corresponde al E(T)H(e), frío y extremoso (García, 2004), que cambia en elevaciones inferiores, donde se registran temperaturas medias en un intervalo de 7 a 14 °C, y precipitaciones anuales hasta de 400 mm (IMTA, 2013).

La hidrología del CPO es muy significativa, ya que constituye el origen del río San Fernando, que drena los escurrimientos de la región hidrológica San Fernando-Soto La Marina que desemboca en el Golfo de México.

La vegetación posee alta diversidad, en su parte baja se desarrolla *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., seguido en altitud por un bosque mixto de coníferas compuesto por diversas especies de pino (*Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltldl., *Pinus pseudostrobus* Lindl.), *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Abies vejarii* Martínez. *Pinus hartwegii* Lindl., en ocasiones asociado con *Pinus culminicola* se distribuyen por arriba de 3 000 msnm (Beaman y Andresen, 1966; Riskind y Patterson, 1975).

Especies arbóreas representativas de los pisos altitudinales del CPO fueron seleccionadas con fines dendrocronológicos y para definir la influencia que ejerce en su desarrollo las variaciones climáticas de alta y baja frecuencia. En la parte más elevada de la montaña, se ubicó una población de *Pinus culminicola*, establecida en sitio rocoso, de suelo somero y localizada en las coordenadas geográficas 24°51'37.5" latitud norte, 100°13'56.8" longitud oeste, a una elevación de 3 200 m. La especie asociada fue *Pinus hartwegii*; no obstante, otros parajes, se encontraron poblaciones casi puras de *P. culminicola*, pero con

alta mortandad de individuos, ocasionado por el incendio de 1998; por ello, se eligieron 50 árboles y recolectaron secciones transversales de ejemplares muertos y vivos.

Para *Pinus hartwegii*, se obtuvieron de dos a tres núcleos de crecimiento, de 50 árboles vivos en varios parajes aledaños a las poblaciones de *P. culminicola*, la ubicación geográfica de uno de los sitios muestreados es 24°52'21.9" latitud norte, 100°13'56.4" longitud oeste, a 3 715 msnm. Con respecto a *Pseudotsuga menziesii*, los núcleos de crecimiento correspondieron a especímenes del sitio localizado a 24°49'58.8" latitud norte, 100°04'01.2" longitud oeste, y 3 200 msnm. En el estrato de elevación inferior, se recolectaron núcleos de crecimiento de *P. greggii*, en un sitio, cuyas coordenadas son 25°30'35.5" latitud norte, 100°29'00.120" longitud oeste, a 1 980 msnm (Figura 1).

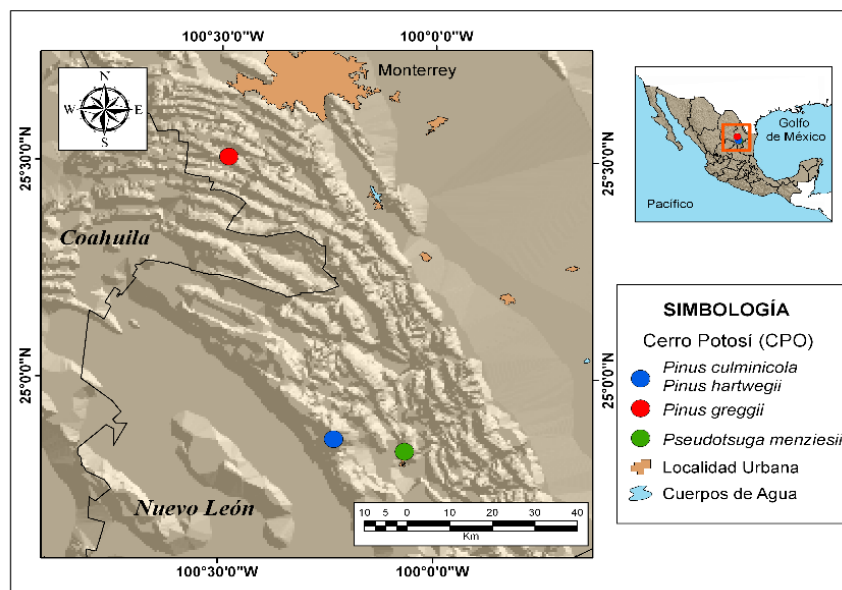


Figura 1. Ubicación geográfica de las especies muestreadas con fines dendrocronológicos en Cerro Potosí, Nuevo León.

Las muestras se montaron, pulieron y fecharon con el uso de técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968). Debido al crecimiento radial irregular de *P. culminicola*, se seleccionaron diversos radios en

cada sección transversal, para determinar aquéllos con menos crecimiento irregular. Las series de crecimiento de anillo total, madera temprana y tardía, se midieron con un sistema de medición *VELMEX* a una resolución de 0.001 mm, luego se verificaron con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Posteriormente, las series de medición se estandarizaron con el programa *ARSTAN* (Cook, 1987); primero, mediante una curva exponencial negativa o con una línea recta de pendiente negativa; y segundo con una curva flexible de frecuencia de respuesta 0.5 y longitud de onda $N/2$, N es la longitud de la serie de tiempo (Cook y Peters, 1981).

Los estadísticos generados en los programas COFECHA y ARSTAN, como la intercorrelación entre series, sensibilidad media, relación señal-ruido y Valor Expresado de la Población (EPS, por sus siglas en inglés) se compararon para las especies involucradas. Las series dendrocronológicas para cada especie, se contrastaron en el período común, mediante correlaciones simples y componentes principales, con el fin de generar una serie dendrocronológica representativa de las condiciones climáticas dominantes del gradiente de altitud. Con base en la función de respuesta entre registros climáticos promedio de estaciones cercanas a CPO, que se integraron en una serie climática característica de la región (Cuadro 1), y la serie dendrocronológica representativa de la montaña, se desarrolló una reconstrucción de precipitación estacional y se analizó su variabilidad interanual y multianual, así como su similitud con otras reconstrucciones de precipitación para la región.

Cuadro 1. Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas al Cerro Potosí, consideradas para analizar su influencia en el comportamiento de la serie dendrocronológica regional.

Estación	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (m)	Período (años)	Distancia al sitio de estudio (km)
El Potosí	100.32	24.85	1 725	1956-2000 (45)	9.3
Raíces, Galeana	100.20	24.57	1 800	1956-2001 (46)	45.5
Ciénega del Toro	100.33	25.08	700	1956-2004 (49)	60.5
El Rusio	100.45	24.72	1 750	1962-2001 (40)	27.5

La influencia de fenómenos atmosféricos circulatorios se determinó al comparar los índices de la serie dendrocronológica contra valores de los índices del Niño Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés) (Allan *et al.*, 1996), Índice de Lluvia Tropical (TRI, por sus siglas en inglés), un estimativo de la variabilidad del Niño Oscilación del Sur (Wright, 1979); Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) (Mantua *et al.*, 1997), Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) (Van Oldenborgh *et al.*, 2009) y el Índice de Sequía de Severidad de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés), reconstruido para el noreste de México (Stahle *et al.*, 2016).

La serie dendrocronológica de madera tardía, se comparó con la presencia de huracanes que han impactado el CPO o detectados en un radio de 50, 100 y 200 km, a la redonda. Se consideró un efecto positivo, cuando el índice de madera tardía fue mayor a 1.0; mientras que, si el índice fue promedio (1.0) o inferior a 1.0, no hubo impacto.

Resultados

Series dendrocronológicas

De 75 árboles muestreados de *Pinus culminicola*, con dos secciones por árbol (150 secciones transversales), se generó una cronología de anillo total de 254 años (1757-2010). Por lo que respecta a *Pinus hartwegii*, se emplearon 58 series para una cronología de 590 años (1420-2009); la más extensa, ya que esta especie es la más longeva en el CPO. En altitudes intermedias, alrededor de 3 200 m, las cronologías de madera temprana, tardía y de anillo total de *Pseudotsuga menziesii*, que se extienden de 1845 a 2010, se soportaron con 190 series datadas. La de *Pinus greggii*, representativa de la parte baja de la montaña, comprendió de 1850 a 2010, en la que también, se obtuvieron series de madera temprana, tardía y de anillo total.

Algunos parámetros dendrocronológicos como la intercorrelación entre series, que muestran valores comunes en el intervalo de 0.55 a 0.65, sensibilidad media (0.15 a 0.65), autocorrelación de primer orden (0.6 a 0.8), relación señal-ruido

(entre más alto el valor mejor), para las cronologías generadas, presentaron valores en los intervalos considerados normales (Speer, 2010), también se incluye el Valor Expresado de la Población (EPS), con fines de reconstrucción climática (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros dendrocronológicos y EPS de las cronologías generadas para el gradiente altitudinal del Cerro Potosí.

Especie	¹ Intercor.	² Sens. Media	³ Autocorr.	⁴ Relación S/R	⁵ EPS>0.85	Longitud Cronología (años)
<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman	0.525	0.1927	0.344	6.488	1887-2010 (11 radios)	1757-2010
<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	0.555	0.290	0.545	4.04	1713-2009 (16 radios)	1420-2009
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	0.70	0.51	0.239	46.4	1884-2009 (7 radios)	1845-2010
<i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.	0.715	0.567	0.333	6.271	1930-2010 (7 radios)	1850-2010

¹Intercorrelación entre series= Asociación entre dos series de datos;

²Sensibilidad Media = Cambio relativo en el ancho de anillos de un año con relación al siguiente; ³Autocorr = Autocorrelación de primer orden, medida de la influencia del año previo en el crecimiento del año actual; ⁴Relación Señal-Ruido (S/R) = Valor de la cantidad de información deseada con respecto a la no deseada; entre mayor sea el cociente es mayor la señal buscada; ⁵EPS = Variación climática contendida en un tamaño de muestra infinito con respecto a un infinito (Wigley *et al.*, 1984).

A pesar de las diferencias detectadas en los índices dendrocronológicos para las especies comparadas en las diversas altitudes del CPO, se detectó un comportamiento similar entre los taxones, particularmente, para las décadas 1860, 1890, 1900, 1920, 1950, 1970 y 2000, con índices inferiores a la unidad, relacionados con sequías; y valores superiores en las décadas 1840, 1870, 1900, 1940, 1960, asociados a períodos húmedos (Figura 2).

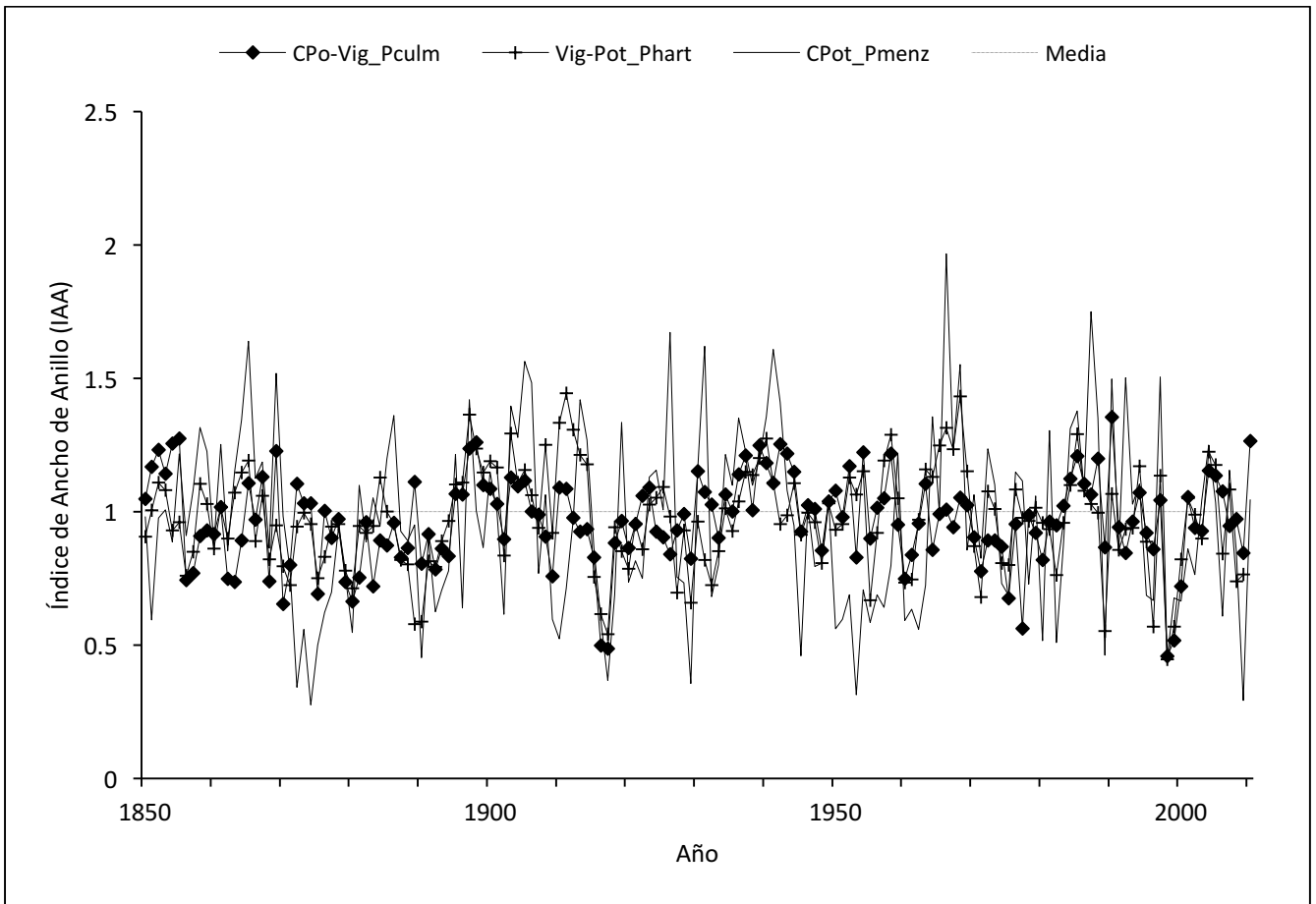


Figura 2. Comparación entre los índices de ancho del anillo de *Pinus culminicola* Andresen & Beaman, *Pinus hartwegii* Lindl., *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. presentes en el gradiente altitudinal de Cerro Potosí, Nuevo León.

Al comparar el comportamiento de los índices, en término de variación en crecimiento en las diversas altitudes de la montaña, la correlación para la serie de anillo total entre *Pinus culminicola* y *P. hartwegii* en el período común, 1850-2010, fue de 0.68 ($p < 0.01$). Esta asociación disminuyó a 0.38 ($p < 0.01$), cuando se contrastó con *Pseudotsuga menziesii*, presente a 2 500 msnm, y alcanzó 0.17 ($p < 0.03$) con *Pinus greggii*, que se localiza a 1 980 msnm.

Relación entre anillos de crecimiento y variables climáticas

La respuesta entre la serie de crecimiento representativa del CPO y la estación climática integrada con las estaciones señaladas (Cuadro 1) muestra que la cronología estándar de anillo total respondió significativamente a la precipitación acumulada enero-septiembre, período 1976-2004 con una correlación de 0.78 ($p < 0.01$), que representa 61 % de la varianza en precipitación acumulada estacional, invierno, primavera y verano.

Los registros de precipitación se calibraron para el período total de registros disponibles (1976-2004), así como en subperíodos de 14 años (1976-1989, 1990-2004). Con este análisis, se determinó que los índices de ancho de anillo explican 48 y 79 % de la varianza en precipitación, mientras que el período total explica 59 % de dicha variación; por lo que, para fines de reconstrucción, se utilizó el período total de datos disponibles. La comparación de los parámetros derivados de la regresión de los subperíodos de precipitación estimada, con relación a los datos de lluvia registrados para los mismos subperíodos validan la robustez del modelo. Los modelos de reconstrucción superaron las pruebas de validez estadística al compararlos con valores independientes de precipitación (Cuadro 3).



Cuadro 3. Estadísticas del proceso de verificación para la reconstrucción de la precipitación estacional (enero-septiembre).

Periodo	Correlación Pearson	¹Reducción del Error	²t-valor	³Producto de signos	⁴Primera diferencia significativa
1976-1989	0.72*	0.63*	2.9*	2*	4NS
1990-2004	0.89*	0.69*	3.7*	1*	3*

NS = No significativo, probabilidad mayor a 5 % de que los resultados hayan ocurrido aleatoriamente; *Significativo, $p < 0.05$; ¹Cualquier resultado positivo indica que la reconstrucción contribuye con información paleoclimática; ²Comparaciones apareadas entre los valores medios de los datos observados y reconstruidos; Estadístico que considera tanto el signo como la magnitud de la diferencia entre observaciones con relación a la media; ⁴Primera diferencia negativa en la prueba de signos.

El modelo de calibración derivado del análisis de regresión del período 1976-2004 fue:

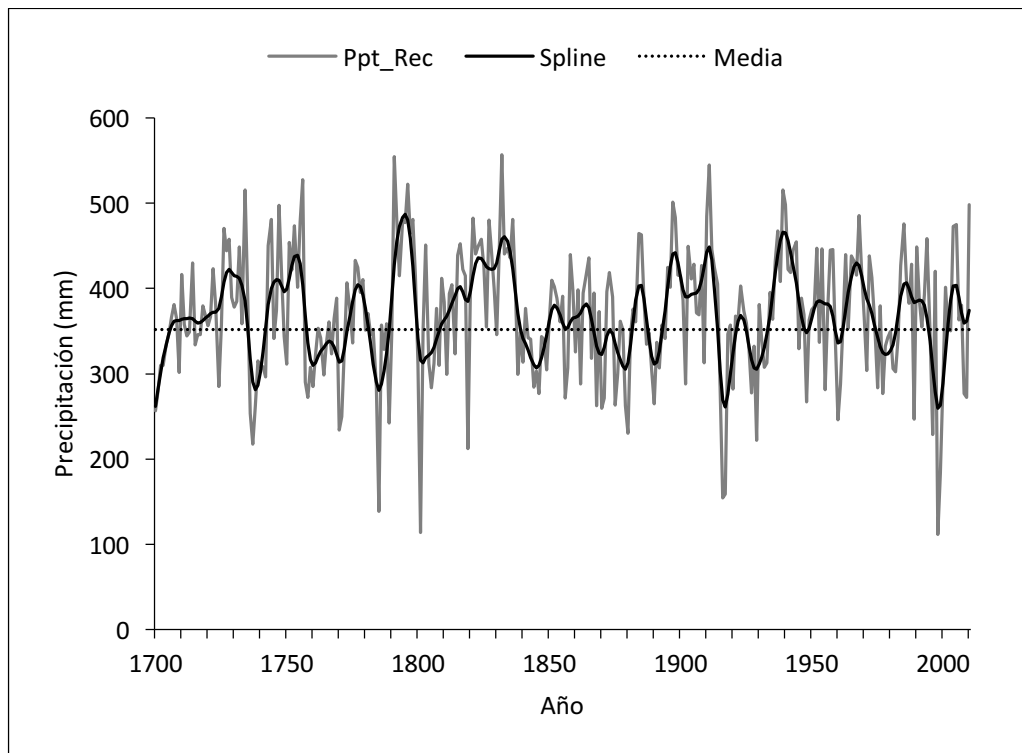
$$Y_t = 70.8 + 449.8X_t$$

Donde:

Y_t = Precipitación estimada del período enero-septiembre (mm)

X_t = Índice de Anillo total para un año en particular

La precipitación reconstruida mostró alta variación interanual y multianual en los 311 años reconstruidos (Figura 3).



La línea punteada representa el promedio de los registros de precipitación acumulada enero-septiembre; la línea en gris son los valores interanuales de la precipitación y la línea en oscuro es una curva flexible a nivel década para resaltar eventos de baja frecuencia (multianuales).

Figura 3. Precipitación reconstruida enero-septiembre para el CPO. El período reconstruido se ajustó a un $EPS > 0.85$.

Influencia de fenómenos atmosféricos de circulación general

Para una región extensa como el noreste de México, la respuesta común entre series de anillos de crecimiento distribuidos en diversos sitios de la Sierra Madre Oriental se debe a la influencia de fenómenos atmosféricos de circulación general, como pueden ser ENSO, AMO, PDO, los cuales a través de su influencia directa o mediante tele-conexiones afectan, a nivel regional, la variación climática interanual y multianual.

Al analizar el impacto del ENSO en el CPO, se determinó una relación estrecha, pero negativa con SOI reconstruido (noviembre-febrero), así como con el SOI instrumental del período mayo-diciembre. Esta relación, entre la cronología e índices de ENSO mejoró, cuando se utilizó el TRI de enero-abril ($r = 0.53$,

$p < 0.0001$, $n = 103$ años) (Figura 4); lo que sugiere que el crecimiento de los árboles en esa región, puede explicar 27 % de la variabilidad de las anomalías de precipitación producidas por ENSO durante las estaciones invierno-primavera.

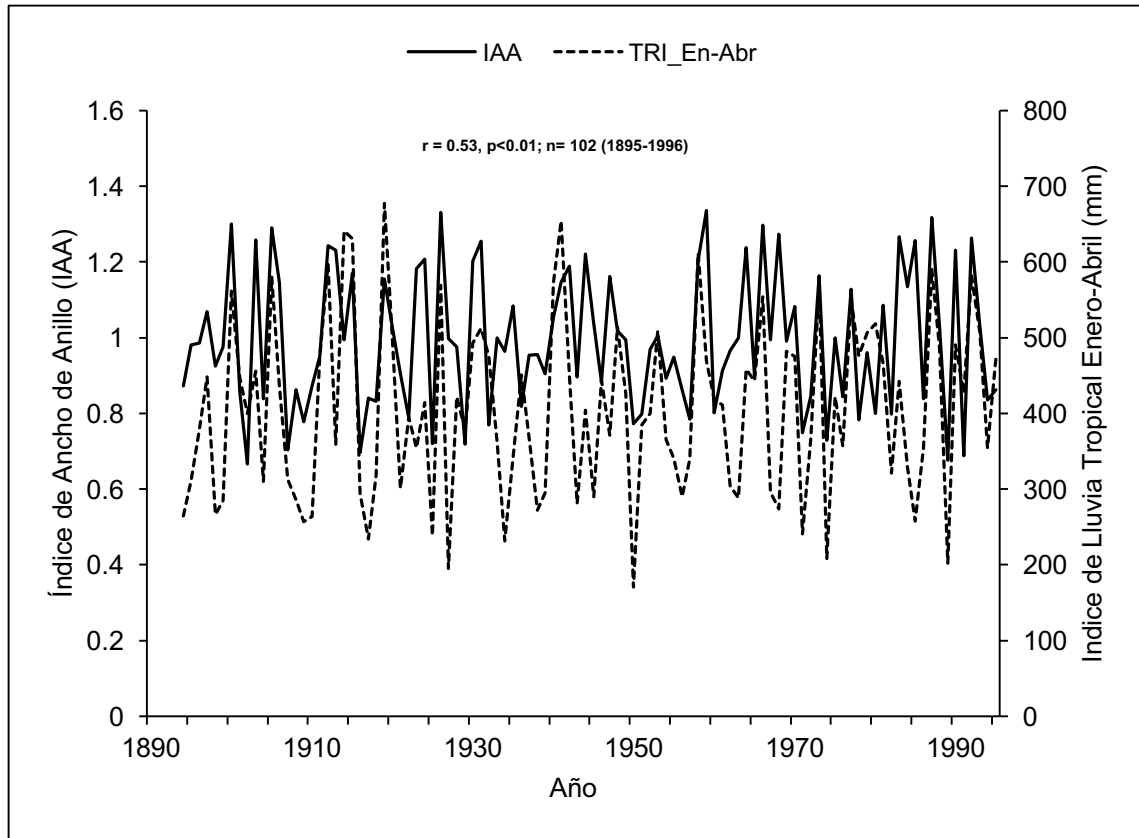


Figura 4. Relación entre los índices de la cronología regional de anillo total en el CPO y el índice de lluvia tropical (TRI).

La relación con el PDO también fue significativa, aunque para un lapso más extenso, que cubrió los meses de marzo a diciembre; una situación similar se determinó con los registros del PDSI de verano (junio-septiembre) que registró una correlación significativa ($r = 0.316$, $p < 0.0007$). No se obtuvo una relación significativa con AMO (Cuadro 4).

Cuadro 4. Asociación entre índices de fenómenos circulatorios y la serie de anillo total representativa de la parte alta del Cerro Potosí, N.L.

Índice	Meses	Período (años)	Correlación	Probabilidad
SOI Reconstruido ¹	Nov-Feb	1805-1977 (103)	-0.195	0.01
SOI ²	May-Dic	1876-2010 (135)	-0.198	0.02
TRI ³	Ene-Abr	1894-1996 (103)	0.530	0.0001
PDO ⁴	Mar-Dic	1900-2010 (111)	0.244	0.009
AMO ⁵	Jul-Dic	1856-2010 (155)	0.187	0.02
PDSI Instrum ⁶	Jun-Sep	1901-2010 (110)	0.316	0.0007

¹SOI reconstruido (Stahle *et al.*, 1998); ²SOI instrumental (Allan *et al.*, 1996);

³TRI (Wright, 1979); ⁴PDO (Mantua *et al.*, 1997); ⁵AMO (Van Oldenborgh *et al.*, 2009); ⁶PDSI (Stahle *et al.*, 2016).

Índices dendrocronológicos e influencia de huracanes

Durante la estación de verano, una de las fuentes más importantes de aportación de humedad en el Cerro Potosí son los huracanes. Influencia que parece ser más importante en la formación de la madera tardía de las especies presentes en el CPO. De 24 eventos ciclónicos registrados de 1887 a 2010, en un radio de 50 a 200 km, cuyo centro es el CPO; 40 % de ellos produjeron un índice de ancho de anillo anual mayor (>1.0); mientras que, en las series de madera tardía de *Pseudotsuga menziesii* y de *Pinus greggii*, se observó un incremento superior al promedio (>1.0), al menos en 50 % de la incidencia de estos eventos. Los ciclones que se presentaron en un radio de 200 km para los años de 1921, 1928, 1975 y 1999, no tuvieron incidencia en el índice de anillo, que fue inferior al promedio (<1.0) para todos los taxones, por lo que, probablemente, en esos años, estos fenómenos, aunque estuvieron presentes en la región, no afectaron el CPO.

Discusión

Respecto a los parámetros dendrocronológicos, las especies arbóreas que se desarrollan en los límites superiores de las altas montañas en México, como es el caso de *Pinus culminicola* y *Pinus hartwegii*, a pesar de su sensibilidad climática que se observa en la variación de su incremento radial anual, están sujetas a condiciones estresantes, como los suelos someros, de baja fertilidad, vientos constantes e intensos y temperaturas congelantes; situación que induce a una posición postrada del arbolado, lo que favorece crecimientos irregulares (Schweingruber, 1996). Lo anterior, hace que la intercorrelación entre series disminuya.

Los parámetros dendrocronológicos de las series datadas: sensibilidad media, autocorrelación de primer grado y relación señal-ruido fueron semejantes a los obtenidos para *Pinus hartwegii* en el centro y norte de México (Villanueva *et al.*, 2015); sin embargo, la intercorrelación entre series fue menor al de especies climáticamente más sensibles, como *Pinus cembroides* y *Pseudotsuga menziesii*, que se desarrollan en montañas aledañas de la Sierra Madre Oriental (Constante *et al.*, 2009).

El parámetro de sensibilidad media (0.193) fue inferior al observado en otros taxa presentes en sitios cercanos. Los valores más bajos de sensibilidad media en *Pinus culminicola*, se atribuyen a la irregularidad en los crecimientos, comportamiento que ha sido citado para taxones que habitan ecosistemas alpinos en diversas partes del mundo; por ejemplo, *Juniperus monticola* Martínez en volcanes del centro de México (Villanueva-Díaz *et al.*, 2016) y *Polylepis tarapacana* Phil., en América del Sur (Argollo *et al.*, 2004); y diversas especies arbustivas en Europa (Liang *et al.*, 2010).

En los 311 años de precipitación reconstruida, los años más secos ocurrieron en 1785 (139 mm), 1801 (114 mm) y 1998 (112 mm) con una precipitación inferior a 40 % del promedio registrado para enero-septiembre (352 mm). Estos años deficitarios se observaron en períodos con varios años consecutivos de sequía, lo que provocó crisis económica y problemas sociales en todo el país, como fue el caso del "Año del Hambre" (Florescano, 1980). El lapso entre 1789 y 1810 ha

sido bien documentado en Saltillo, Coahuila por carencia de granos básicos, hambrunas y mortandad de ganado (García, 1997).

Los años húmedos también ocurrieron en episodios con varios años consecutivos de precipitación superior al promedio, como fueron 1791, 1832 y 1911, con una precipitación que superó en 60 % la media reconstruida; en otros años: 1734, 1756, 1939 y 2010. El incremento fue cercano a 50 El registro de huracanes en CPO indicó una influencia positiva en el crecimiento de la madera total de *Pinus culminicola*, pero en particular, de la madera tardía en especies como *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus greggii*.

Conclusiones

Los parámetros dendrocronológicos de *Pinus culmicola*, *Pinus hartwegii*, *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus greggii* en las diversas altitudes del Cerro Potosí confirman la sensibilidad climática de las especies y la existencia de eventos climáticos que afectaron toda la montaña con efectos diferenciados en sus crecimientos, pero con tendencias similares, particularmente, en años con escasa precipitación.

Aunque en este estudio, la especie más longeva fue *Pinus hartwegii*, su sensibilidad climática es inferior a la de *Pinus culminicola*, la cual alcanza edades superiores a 300 años y muestra alto potencial para hacer reconstrucciones de precipitación.

La asociación significativa entre la serie representativa de la parte alta del CPO, con series dendrocronológicas de especies arbóreas distribuidas en montañas aledañas, así como con los crecimientos de las existentes a lo largo del gradiente altitudinal es indicativo de que los taxa responden a la variación en precipitación, que afecta al CPO y otras de la Sierra Madre Oriental.

Las grandes sequías que ocurrieron en el pasado, en ciclos aproximados de 50 años, pueden presentarse en el futuro y magnificar su efecto, debido a una mayor presión sobre los recursos hídricos; por ello es importante tener acciones de mitigación ante tales eventos.

Pinus culminicola y *Pinus hartwegii* por representar el límite superior arbóreo de los picos más elevados en la Sierra Madre Oriental, constituyen especies de gran relevancia para los estudios de cambio climático, ya que incrementos en temperatura afectarían la disponibilidad hídrica y, en consecuencia, impactar su estabilidad ecológica

El fenómeno circulatorio con más influencia en la variación hidroclimática del CPO fue ENSO, a través del TRI, en el que su mayor influencia se determinó para el período estacional enero-abril, ya que este fenómeno explica 28 % del incremento radial anual de las especies arbóreas ahí presentes.

En contraposición a ENSO que tiene mayor influencia en el período invierno-primavera, la presencia de huracanes a mediados del verano incide de manera favorable en el crecimiento anual de *P. culminicola* y *P. hartwegii*; en particular, su efecto es más notorio en series de madera tardía, por lo que pueden constituir un *proxy* para un entendimiento histórico del impacto de los huracanes en el CPO.

El desarrollo de redes dendrocronológicas en islas del cielo como el CPO que amalgamen la respuesta hidroclimática en todo un gradiente altitudinal, permite analizar la variabilidad del clima, la frecuencia y probabilidad de eventos hidroclimáticos extremos y el impacto de patrones atmosféricos de circulación general.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias recibido a través de los proyectos fiscales: "Reconstrucción de caudales e influencia de fenómenos de circulación general en cuencas del Pacífico Mexicano" y "Reconstrucción de caudales e influencia de fenómenos de circulación general en cuencas de la Sierra Madre Occidental".

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

José Villanueva Díaz: muestreo dendrocronológico, análisis y redacción del documento; Lorenzo Vázquez Selem: muestreo dendrocronológico de *P. hartwegii*; Juan Estrada Ávalos: análisis de bases datos climáticas e hidrológicas; Aldo R. Martínez Sifuentes: desarrollo de relaciones climáticas con series dendrocronológicas; Julián Cerano Paredes: muestreo dendrocronológico de *P. culminicola*; Pamela A. Canizales Velázquez: muestreo de *P. menziesii*; Osvaldo Franco Ramos: muestreo de *P. hartwegii*; Fatima del Rocío Reyes Camarillo: muestreo de *P. culminicola*, generación de series dendrocronológicas.

Referencias

- Allan, R. J., J. Lindesay and D. Parker. 1996. El Niño/Southern Oscillation & climatic variability. CSIRO Publishing. Melbourne, Australia. 408 p.
- Argollo, J., C. Soliz y R. Villaba. 2004. Potencial dendrocronológico de *Polylepis tarapacana* en los Andes Centrales de Bolivia. *Ecología en Bolivia* 39(1): 5-24.
- Beaman, H. and W. J. Andresen. 1966. The vegetation, floristics and phytogeography of the summit of Cerro Potosí, Mexico. *The American Midland Naturalist* 75(1): 1-33.
- Constante G., V., J. Villanueva D., J. Cerano P., E. H. Cornejo O. y S. Valencia M. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México* 34(106): 17-39.
- 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 bulletin* 47: 37-59.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47: 37-59.
- Elder, C. R., R. C. Balling Jr., R. S. Cervený and D. Krahenbuhl. 2014. Regional variability in drought as a function of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Caribbean Journal of Science* 48(1): 31-43.

Florescano, E. 1980. Una historia olvidada: la sequía en México. *Nexos* 32: 9-13.

García-Arévalo, A. y S. González-Elizondo. 1991. Flora y vegetación de la cima del Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana* 13: 53-74.

García H., A. 1997. Alternativas ante las sequías de 1789-1810 en la villa de Saltillo, Coahuila, México. *In: García A., V. (coord.). Historia y Desastres en América Latina. Vol. II. Red de Estudios Sociales en América Latina. Editorial. México, D.F., México. pp. 148-169.*

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la república mexicana. Series Libros Núm. 6. 5ª edición. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México. 90 p.

Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree Ring Research* 57(2): 205-221.

Holmes, R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2013. ERIC III Ver. 3.2. Extractor Rápido de Información Climatológica. IMTA. Jiutepec, Morelos. n/p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1986. Síntesis geográfica del estado de Nuevo León. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F., México. 171 p.

Jiménez, J., O. Aguirre, E. Estrada y E. Jurado. 2003. Restauración de *Pinus culminicola* en el área protegida Cerro Potosí, México. Resumen *in extenso*. *In: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). (comps.). XII Congreso Forestal Mundial. 21 al 28 de septiembre. Quebec, Canadá. 6 p.*

- Liang, E., X. Shao, D. Eckstein and X. Liu. 2010. Spatial variability of tree growth along a latitudinal transect in the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Canadian Journal of Forest Research* 40(2): 200-211.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace and R. C. Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 1069-1079.
- Méndez, M. and V. Magaña. 2010. Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *American Meteorological Society* 23: 1175-1188.
- Riskind, D. H. and T. F. Patterson. 1975. Distributional and ecological notes on *Pinus culminicola*. *Madroño* 23(3): 159-161.
- Schweingruber, F. H. 1996. Tree rings and environment. *Dendroecology*. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Viena, Haupt. 609 p.
- Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Naik, J. Nakumara, C. Li, E. Cook and D. W. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22 (1): 1-31.
- Speer, J. H. 2010. *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. Ciudad, AZ USA. 368 p.
- Stahle, D. W., R. D. D'Arrigo, P. J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. B. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Gay, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva-Diaz and L. C. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(10): 2137-2152.
- Stahle, D. W., E. R. Cook, D. J. Burnette, J. Villanueva, J. Cerano, J. N. Burns, D. Griffin, B. I. Cook, R. Acuña, M. C. A. Torbenson, P. Szejner and I. M. Howard. 2016. The Mexican drought atlas: tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Review* 149: 34-60.

- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An introduction to the Tree-Ring Dating. The University of Arizona Press. Tucson, AZ USA. 73 p.
- Van Oldenborgh, G. J., L. A. Te Raa, H. A. Dijkstra and S. Y. Philip. 2009. Frequency- or amplitude-dependent effects of the Atlantic meridional overturning on the tropical Pacific Ocean. *Ocean Science* 5: 293-301.
- Villanueva-Díaz, J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano-Paredes, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland and E. Cornejo-Oviedo. 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83(1-2): 117-131.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., A. Gómez G., L. U. Castruita E., D. W. Stahle y J. A. Ruiz C. 2014. Volúmenes reconstruidos en presas del Valle del Yaqui con anillos anuales de coníferas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10: 1977-1991.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., L. Vázquez S., D. W. Stahle, P. Z. Fulé, L. L. Yocom, O. Franco R. y J. A. Ruiz C. 2015. Red dendrocronológica de pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Boletín del Instituto de Geografía* 86: 5-14.
- Villanueva-Díaz, J., L. Vázquez-Selem, A. Gómez-Guerrero, J. Cerano-Paredes, N. A. Aguirre-González y O. Franco-Ramos. 2016. Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tlaloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39(2): 175-185.
- Wang, C. L., S. K. Lee and D. B. Endfield. 2008. Atylantic warm pool acting as a link between Atlantic Multidecadal Oscillation and Atlantic tropical cyclone activity. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(5):1-17. doi: 10.1029/2007GC001809.
- Wigley, T. M. L., K. R. Brifa and P. D. Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *American Meteorological Society* 23: 201-213.

Wright, P. B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature* 277: 371–374.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**—sin excepción— se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.