



# Red dendrocronológica de pino triste (*Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald) en la Sierra Madre Occidental para reconstrucción de lluvia estacional

## Dendrochronological potential of sad pine (*Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald) in the Sierra Madre Occidental for seasonal rainfall reconstructions

José Villanueva-Díaz<sup>1</sup>, Martha González-Elizondo<sup>2</sup>, Julián Cerano-Paredes<sup>1</sup>, Juan Estrada Ávalos<sup>1</sup>, Aldo R. Martínez Sifuentes<sup>1</sup> y Sergio Rosales Mata<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (Inifap Cenid Raspa). Gómez Palacio, Durango, México.

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango (CIIDIR-Durango). Durango, Durango, México.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, Durango, México.

### RESUMEN

Se desarrolló una red de siete cronologías de *Pinus lumholtzii* en la Sierra Madre Occidental para el desarrollo de reconstrucciones históricas de precipitación estacional. Los valores de los parámetros dendrocronológicos en general fueron similares a los de series de crecimiento desarrolladas con otras coníferas en esta región: sensibilidad media (0.25 - 0.38), inter-correlación entre series (0.52 - 0.66), relación señal/ruido (1.16 - 18.51) y autocorrelación de primer orden (0.01 - 0.30). El primer componente (PC1) que incluyó las cronologías involucradas se utilizó para realizar una reconstrucción de precipitación acumulada noviembre-junio en el período común de las series (1890-2001), donde el crecimiento anual explicó más de 80% de la precipitación ocurrida en dicho período; asimismo, se utilizó la cronología residual del sitio Sauz para reconstruir la precipitación acumulada de los últimos 346 años (1668-2013), la cual detectó períodos extremadamente secos (1665-1688, 1695-1718, 1767-1778, 1890-1896, 1948-1963). La respuesta de las cronologías de esta especie a fenómenos atmosféricos de circulación general, como El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), también fue similar a la obtenida con cronologías de especies con probado potencial dendroclimático. La ventaja de extender la red dendrocronológica de *P. lumholtzii* se fundamenta en que su potencial dendroclimático es equiparable con el de especies tradicionalmente usadas con este fin; su amplia distribución y el poco disturbio antropogénico que han sufrido sus poblaciones favorece la posibilidad de encontrar individuos longevos. Por su excelente sensibilidad climática, la red dendroclimática de *P. lumholtzii* es fundamental para estudios dendroclimáticos, particularmente en regiones donde se carece de registros climáticos instrumentales.

PALABRAS CLAVE: anillos de crecimiento, dendroclimatología, precipitación, ENSO, PDSI.

### ABSTRACT

A network of seven *Pinus lumholtzii* chronologies was developed for the Sierra Madre Occidental for seasonal rainfall reconstruction. Some dendrochronological parameters such as average mean sensitivity (0.25 - 0.38), series inter-correlation (0.52 - 0.66), signal-to-noise ratio (1.16 - 18.51) and first-order autocorrelation (0.01 - 0.30) had similar values as compared to other chronologies from associated conifer species. The first principal component values (PC1) explained over 80% of the seasonal November-June rainfall data and a precipitation reconstruction was developed for the common period (1890-2001). Similarly, the longest chronology (El Sauz) was used to reconstruct seasonal rainfall for the last 346 years (1668-2013), detecting extreme droughts in the periods 1665-1688, 1695-1718, 1890-1896, and 1948-1963. The association between the ring-width indices of the *P. lumholtzii* regional chronology and El Niño Southern Oscillation indices was similar to the ones obtained with other conifer species from the region. The advantage of expanding the network of *P. lumholtzii* chronologies is that its dendroclimatic potential is comparable to those of species better known for this purpose; its wide ecological distribution, and the existence of stands with low anthropogenic disturbances, favors the presence of old specimens. For its suitable climatic response the *P. lumholtzii* dendrochronological network is fundamental to reconstruct climate in sites with poor climatic data.

KEYWORDS: ring growth, dendroclimatology, precipitation, ENSO, PDSI.

## INTRODUCCIÓN

La Sierra Madre Occidental (SMO), con una longitud de cerca de 1200 km, comprendida desde el norte del estado de Sonora hasta el norte de Jalisco, constituye un corredor biológico para especies boreales y tropicales y es una de las regiones con mayor biodiversidad en México (Rzedowski, 1978). Su constitución ígneo-silícica (Ferrari, Valencia-Moreno y Bryan, 2005), amplio intervalo altitudinal y diversidad fisiográfica permiten la existencia de una serie de climas y tipos de vegetación, lo que se manifiesta con la presencia de 24 especies de *Pinus*, que representa 46% de las especies de este género a nivel nacional, 54 especies de *Quercus* (34%) y 7 de *Arbutus* (100%) (González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González y López-Enríquez, 2012).

Los bosques mixtos y de coníferas, que dominan gran parte de la vegetación templada en este sistema montañoso tienen gran relevancia económica, no solo por la producción de madera, sino también por la provisión de servicios hidrológicos que alimentan grandes distritos de riego en las vertientes que drenan tanto hacia la Planicie Costera del Pacífico, como hacia la Altiplanicie del Desierto Chihuahuense (Descroix, 2004; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2014).

A pesar de la gran diversidad de coníferas presentes en la SMO, y de la importancia de los estudios hidroclimáticos en esta región, son muy pocas las especies que se han empleado con fines dendrocronológicos, particularmente para análisis históricos de variabilidad hidroclimática (Stahle *et al.*, 2016). De hecho, muchos de estos estudios se han realizado con series de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva y Burns, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2005; Cerano-Paredes, Villanueva-Díaz, Fulé, Arreola-Ávila y Constante-García, 2009; Cerano-Paredes, Villanueva-Díaz, Valdez-Cepeda, Arreola-Ávila y Constante-García, 2011; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015) y solamente en los últimos años se está recurriendo al uso de otras especies de coníferas, particularmente *Pinus cooperi*, *P. durangensis* y *P. arizonica* (Cerano-Paredes, Villanueva-Díaz, Valdez-Cepeda, Constante-García, González-Barríos y Estrada-Ávalos, 2012; Villanueva *et al.*, 2014; Díaz-Ramírez, Villanueva-Díaz, Cerano-

Paredes, 2016). Sin embargo, la remoción de arbolado adulto en poblaciones de especies de importancia comercial dificulta encontrar individuos longevos, lo que limita generar series de tiempo con una extensión superior a 200 años.

Una de las especies del género *Pinus* de la Sierra Madre Occidental que ha sido escasamente estudiada desde el punto de vista dendrocronológico es el pino triste (*Pinus lamboltzii* B.L. Rob. & Fernald.) (Villanueva-Díaz, Cerano-Paredes, Stahle, Luckman, Therrell y Cleaveland, 2006; Irby, Fulé, Yocom y Villanueva, 2013; González-Elizondo, González-Elizondo, Villanueva-Díaz y Cerano-Paredes, 2017). Esta especie es cuasiendémica de la SMO, con una distribución amplia desde Sonora hasta Jalisco y en serranías aisladas de Guanajuato (García-Arévalo y González-Elizondo, 2003). Debido a su conformación fenotípica no es una especie de interés comercial; esto, aunado a que generalmente habita sitios pobres, favorece la presencia de rodales aislados con poco disturbio y con individuos longevos que superan los 300 años (Villanueva-Díaz *et al.*, 2010), los cuales pueden ser utilizados con fines dendrocronológicos, pero difícilmente con fines comerciales. Por otra parte, al habitar sitios con afloramiento rocoso o suelos muy someros, con baja capacidad de almacenamiento de agua, su crecimiento se ve limitado por la baja disponibilidad hídrica y nutrimental, lo que provoca lento crecimiento. De ahí se deriva el potencial de la sensibilidad de esta especie a factores climáticos (González-Elizondo *et al.*, 2017).

El conocimiento del potencial de una especie para estudios dendroclimáticos brinda la oportunidad de desarrollar reconstrucciones climáticas para las regiones donde esta se desarrolla y la disponibilidad de una red de cronologías de la misma, permite analizar la variabilidad climática regional.

## OBJETIVOS

Este trabajo tiene como objetivo analizar el potencial dendrocronológico de *P. lamboltzii* y, a través de la integración de una red de cronologías, generar reconstrucciones de precipitación y determinar la influencia en su comportamiento de patrones atmosféricos de circulación general.



## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El pino triste (*P. lamboltzii*) es una especie de amplia distribución en la SMO, común en los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Jalisco, donde es característico de sitios con afloramientos de roca blanquecina muy intemperizada y con un pH ácido (González-Elizondo *et al.*, 2012). Según Farjón (2013), se presenta en altitudes entre 1500 m y 2900 m y ocupa una superficie total de 2016 km<sup>2</sup>; crece generalmente mezclado con diversas especies de encinos, en bosque de coníferas y de pino-encino (González-Elizondo, González-Elizondo y Márquez-Linares, 2007); prefiere los climas templados subhúmedos con lluvias de verano (Cw<sub>2</sub>) o semifrío subhúmedos con lluvias de verano (C(E)w<sub>2</sub>) (García, 2004), donde la precipitación anual fluctúa entre 500 mm a 600 mm, la cual ocurre en alto porcentaje (más de 75%) en el verano; la temperatura media anual fluctúa de 12 °C a 18 °C.

Los sitios de colecta se ubicaron en diversos parajes en los que *Pinus lamboltzii* es el dominante fisonómico de la vegetación, ubicados en la porción centro y sur de la SMO; seis de ellos en el estado de Durango y uno en el norte del estado de Jalisco (Tabla 1 y Fig. 1).

### Obtención de muestras

El muestreo dendrocronológico del arbolado fue selectivo y estuvo dirigido hacia individuos con características de longevidad (fuste torcido, ramas principales escasas, corteza semilisa y con escaso grosor) y ubicados en micrositos con suelo superficial o directamente sobre la roca madre, con el objetivo de maximizar la señal climática en el crecimiento. En cada sitio, se obtuvieron de dos a tres núcleos de crecimiento (virutas), de al menos 30 árboles. Las muestras se tomaron con un taladro tipo Pressler de 5 mm y 12 mm de diámetro interno; a la altura del pecho (1.3 m del suelo); en dirección perpendicular a la pendiente del terreno con el fin de evitar madera de reacción. Las muestras se procesaron acorde a métodos dendrocronológicos convencionales (Stokes y Smiley, 1968) en el Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en Gómez Palacio, Durango.

Los anillos de crecimiento anual se delimitaron utilizando un estereomicroscopio; una vez prefchados, se les midió ancho total con un sistema de medición Velmex a una resolución de 0.001 mm. La calidad del fechado se analizó con el programa COFECHA, el cual correlaciona subperíodos de 50 años con traslapes de 25 años (Holmes, 1983). Únicamente se consideró el anillo total, ya que en esta especie el limitado crecimiento de la banda de madera tardía dificulta la generación de series de madera temprana y de madera tardía, respectivamente, y solo es factible desarrollar series de crecimiento de anillo total. Las series individuales, perfectamente fechadas, se estandarizaron con el programa ARSTAN para eliminar tendencias de origen biológico y homogenizar la varianza; este procedimiento se realizó mediante una doble estandarización; primero, al aplicar curvas exponenciales negativas y rectas de regresión a las series de medición acorde a su crecimiento; una segunda estandarización se realizó al ajustar a las series una curva flexible (“*spline*”) de 67 años a 138 años con una rigidez mínima de la curva de 32 años (Cook, 1987). Los índices se obtuvieron por división y representan el cociente entre los valores de medición y los obtenidos de la curva ajustada.

Con el fin de determinar la respuesta común y la sensibilidad a variables climáticas, se determinó el intervalo de algunos parámetros de las cronologías, como: intercorrelación entre series (medida de la intensidad de la señal, generalmente climática, común a todas los árboles en un sitio), desviación estándar (medida de dispersión de los datos con respecto a la media), sensibilidad media (cambio relativo en el grosor de los anillos de una año al siguiente), autocorrelación de primer orden (influencia del crecimiento de un año determinado en el grosor del anillo del siguiente año) y relación señal/ruido (proporción de la señal buscada con respecto a disturbios y a otros factores no relacionados con el clima, que se consideran ruido) (Fritts, 1976); asimismo, se consideró la señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés), parámetro que proporciona una estimación de la representatividad de una cronología con número limitado de muestras en comparación a la misma, si esta tuviera un número infinito de muestras (Wigley, Briffa y Jones, 1984).

TABLA 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de *P. lumboltzii* en los estados de Durango y Jalisco.

| Nombre del sitio               | Coordenadas    |                | Altitud (m) |
|--------------------------------|----------------|----------------|-------------|
|                                | Latitud        | Longitud       |             |
| La Flor A (LFA) <sup>1</sup>   | 23°37' 41" N   | 104°44' 00" W  | 2700        |
| La Flor B (LFB) <sup>1</sup>   | 23°42' 16" N   | 104°44' 20" W  | 2430        |
| Mezquital A(MEA) <sup>1</sup>  | 23°16' 53" N   | 104°20' 46" W  | 2630        |
| Mezquital B (MEB) <sup>1</sup> | 23°22' 42" N   | 104°20' 30" W  | 2400        |
| Molinillos (MOL)               | 23°37' 58.5" N | 105°04' 5.3" W | 2469        |
| Sauz (SAU)                     | 23°08' 47.1" N | 104°20' 6.5" W | 2765        |
| Bolaños (BOL)                  | 21°52' 52" N   | 103°52' 01" W  | 2360        |

<sup>1</sup> González Elizondo (2003).

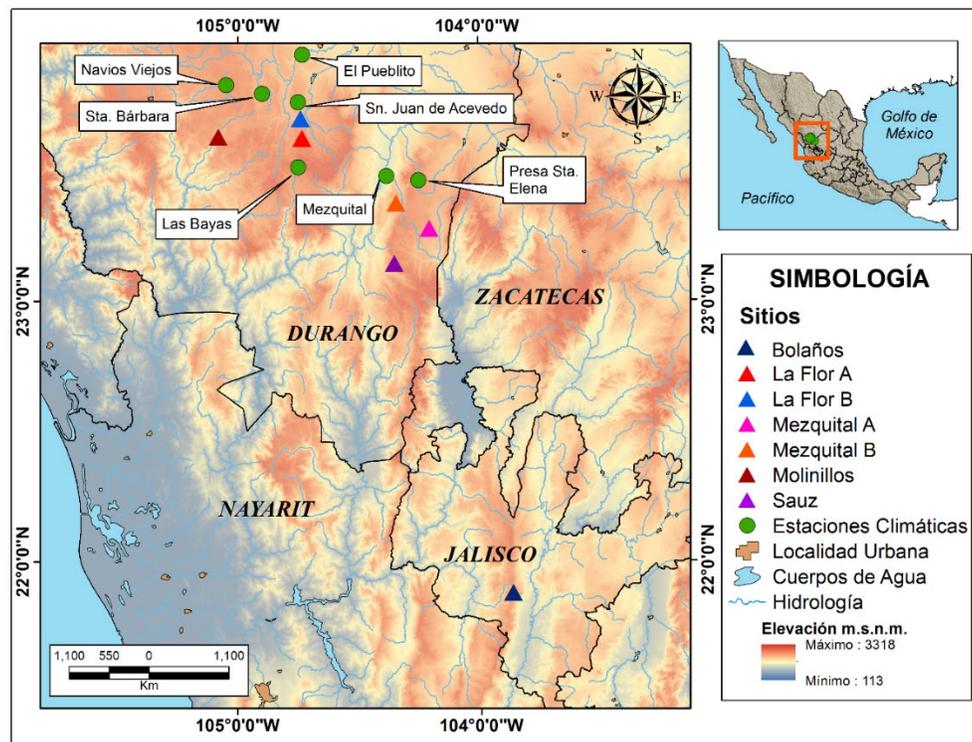


FIGURA 1. Ubicación geográfica de los sitios de colecta de núcleos de crecimiento de *P. lumboltzii* y de las estaciones meteorológicas consideradas en la Sierra Madre Occidental.

### Reconstrucción de variables climáticas

Se definió la asociación entre las cronologías mediante un análisis de componentes principales (PCA), para lo cual la extensión original de las mismas se ajustó a la de la serie con menor extensión. El componente principal con mayor varianza común se utilizó para determinar la asociación de las cronologías

cargadas en dicho componente y variables climáticas de una estación promedio a nivel regional, compuesta por varias estaciones aledañas a los sitios de estudio. De igual manera, la cronología más extensa del componente principal que explicó la mayor varianza, se utilizó para extender la reconstrucción de precipitación en el tiempo.



Con fines de reconstrucción, el período total de los datos de precipitación disponibles se dividió en dos subperíodos para calibración y verificación. Si ambos subperíodos fueron significativos, se utilizó el período total de registros disponibles para generar la ecuación de reconstrucción de lluvia estacional acumulada.

La verificación del modelo de reconstrucción, que se fundamenta en diversas pruebas estadísticas como la correlación de Pearson, reducción del error, valor de “t” y primera diferencia significativa, entre otras, se realizó mediante la subrutina “Verify” de la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (Fritts, 1976).

Los índices del componente principal con mayor varianza común se emplearon para analizar la influencia de tres fenómenos de circulación general: El Niño Oscilación del Sur (ENSO, siglas en inglés) a través del Índice de Oscilación del Sur (SOI), Índice Multivariado de El Niño (MEI) e Índice de Lluvia Tropical (TRI); asimismo, se determinó la asociación con otros dos fenómenos circulatorios: Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, siglas en inglés) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, siglas en inglés). También se realizó una comparación con el Índice de Severidad de Sequía de Palmer reconstruido para México (PDSI, siglas en inglés), que estima el grado de intensidad de una sequía durante los meses de junio a agosto, básicamente la estación de verano (Stahle *et al.*, 2016), donde ocurre la mayor precipitación en esta región.

## RESULTADOS

### Series dendrocronológicas

Los parámetros dendrocronológicos de las series de crecimiento desarrolladas mostraron valores relativamente altos: la intercorrelación entre series fluctuó de 0.52 a 0.67; sensibilidad media de 0.25 a 0.38; autocorrelación de primer orden de 0.01 a 0.30 y relación señal/ruido de 1.16 a 18.51, valores que caen en el límite medio a superior de su rango (Tabla 2).

La base de datos de series dendrocronológicas de anillo total de *P. lumboltzii* se integró con siete sitios, seis de ellos ubicados en la porción sur del estado de Durango y uno del norte de Jalisco. La variación interanual y multianual de las series indica una respuesta climática común (Fig. 2). Esta variación se explica por la correlación altamente significativa ( $p < 0.000$ ) encontrada entre las series, considerando como referencia de comparación, la cronología del sitio Molinillos, y por el tamaño de muestra que fue superior a 100 observaciones en todas las series. De esta manera, las correlaciones encontradas fueron de 0.54 ( $n = 224$ ) para la cronología del sitio Sauz; 0.66 ( $n = 213$ ) para La Flor A; 0.57 ( $n = 172$ ) para La Flor B; 0.75 ( $n = 193$ ) para Mezquital A; 0.64 ( $n = 113$ ) para Mezquital B y de 0.33 ( $n = 214$ ) para Bolaños. La baja correlación de la cronología del sitio Bolaños, en Jalisco, puede obedecer a la distancia que la separa del resto de las cronologías (149 km en línea recta con el sitio Sauz, el más sureño de los sitios de Durango y 229 km con Molinillos, sitio de referencia para la correlación). Además, el sitio Bolaños es el más

TABLA 2. Parámetros dendrocronológicos de anillo total la red de series de crecimiento anual de *Pinus lumboltzii* desarrollada para sitios en los estados de Durango y Jalisco.

| Sitio       | Inter-correlación entre series | Sensibilidad Media | Autocorrelación 1er orden | Relación señal/ruido | EPS <sup>1</sup> | Extensión cronología |
|-------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| La Flor A   | 0.66                           | 0.32               | 0.01                      | 18.51                | 1833-2001 (5)    | 1787-2002            |
| La Flor B   | 0.54                           | 0.25               | 0.30                      | 12.24                | 1883-2001 (7)    | 1830-2001            |
| Mezquital A | 0.58                           | 0.29               | 0.12                      | 8.04                 | 1836-2002 (5)    | 1811-2002            |
| Mezquital B | 0.67                           | 0.38               | 0.16                      | 11.7                 | 1907-2002 (4)    | 1890-2002            |
| Molinillos  | 0.62                           | 0.31               | 0.18                      | 14.23                | 1813-2014 (6)    | 1790-2014            |
| Sauz        | 0.56                           | 0.35               | 0.26                      | 9.33                 | 1794-2013 (7)    | 1668-2013            |
| Bolaños     | 0.52                           | 0.34               | 0.15                      | 1.16                 | 1857-2003 (8)    | 1783-2003            |

<sup>1</sup>EPS > 0.85, considerada adecuada con fines de reconstrucción climática. El valor entre paréntesis señala el número de muestras mínimas requeridas para reconstruir el período indicado.

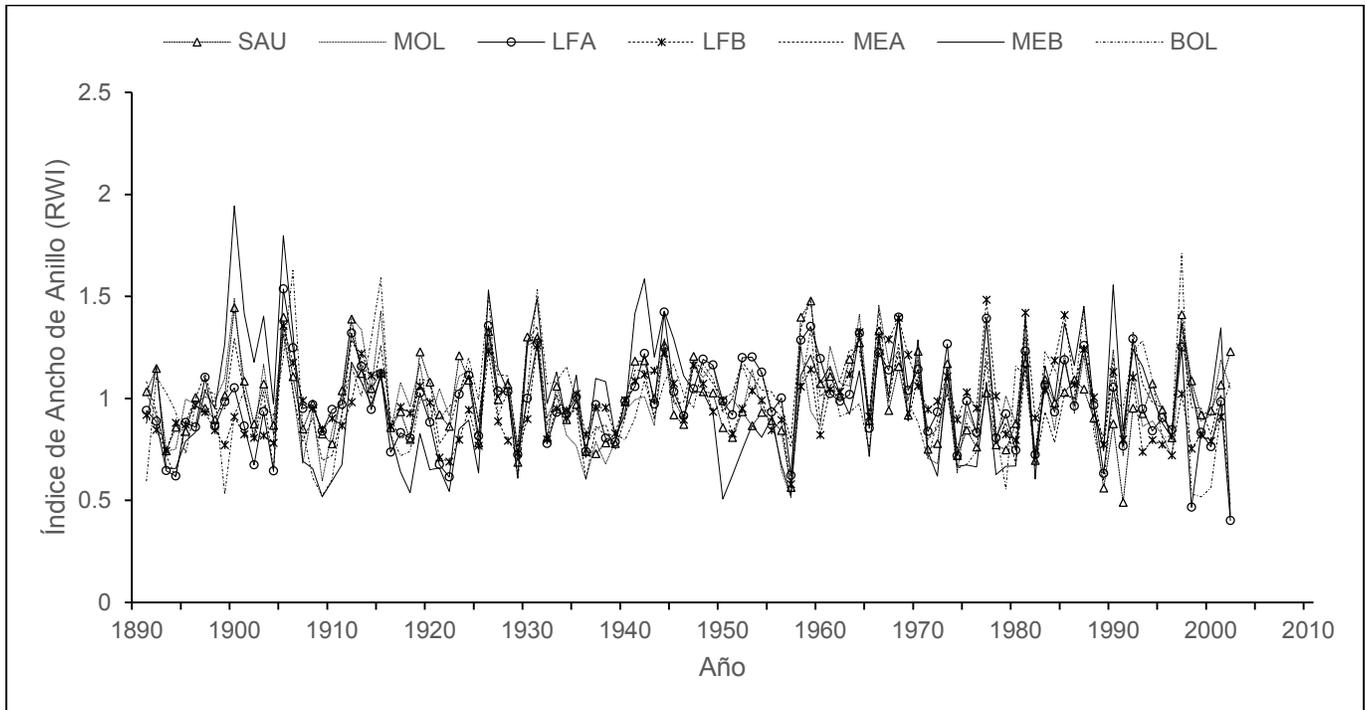


FIGURA 2. Comportamiento comparativo de siete cronologías de ancho total de anillo de *P. lamboltzii*, de la Sierra Madre Occidental, para el período común (1890-2001).

alejado del Trópico de Cáncer, posee menor elevación, lo que permite suponer mayores diferencias climáticas, moduladas por aspectos fisiográficos e influencia del litoral del Pacífico.

#### Desarrollo del modelo de reconstrucción

El análisis de Componentes Principales determinó que en el PC1 se concentró 70% de la varianza común e integra a las siete cronologías desarrolladas (Fig. 3); donde las cronologías SAU y MEB, MOL, MEA, LFA y LFB mostraron la mayor aportación en la varianza a la señal climática común y en menor proporción el sitio BOL; de ahí que dicho componente se haya utilizado para desarrollar una cronología regional y una función de respuesta entre esta y los datos climáticos, particularmente precipitación estacional para la zona de distribución de las poblaciones estudiadas de *P. lamboltzii*, la cual se obtuvo al integrar datos de las estaciones climáticas cercanas a los sitios de colecta (Fig. 1).

Los índices anuales del PC1 mostraron alta correlación con la serie de precipitación regional acumulada de noviembre del año previo a junio del año de crecimiento ( $r = 0.897$ ,  $p < 0.000$ ,  $n = 38$ , 1964-2001), prácticamente desde finales de otoño hasta finales de primavera (Fig. 4).

El período total de los datos de precipitación disponibles (1964-2001) se dividió en dos subperíodos (1964-1982 y 1983-2001) con fines de calibración y verificación. Dado que ambos subperíodos fueron altamente significativos ( $p < 0.000$ , correlaciones de 0.936 y 0.868, que explican 87.6% y 75.3% de la varianza, respectivamente) se utilizó el período total de registros disponibles (1964-2001,  $n = 38$ ) para generar la ecuación de reconstrucción de lluvia acumulada noviembre-junio; relación que explica 80.5% de la variación en la precipitación que ocurre en dicho período (Tabla 3). La ecuación utilizada para la reconstrucción fue la siguiente:

$$Y_t = -239.01 + 176.4X_t$$

Donde:

- Y<sub>t</sub>: Precipitación estimada del período noviembre-junio (mm)
- X<sub>t</sub>: Valor anual (score) del índice de las cronologías que explican la mayor varianza en el PC1.

La verificación del modelo de reconstrucción fue significativa para todos los parámetros, por lo que se consideró adecuado para la reconstrucción de precipitación (Tabla 4).

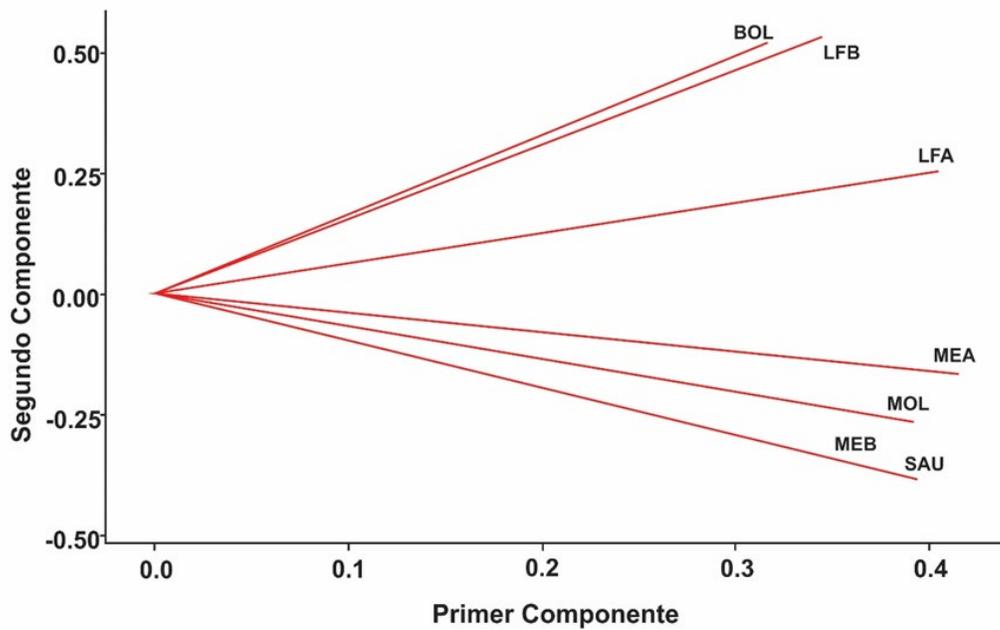


FIGURA 3. PC1 de la red de cronologías de *P. lumboltzii* de sitios en Durango y Jalisco en la Sierra Madre Occidental.

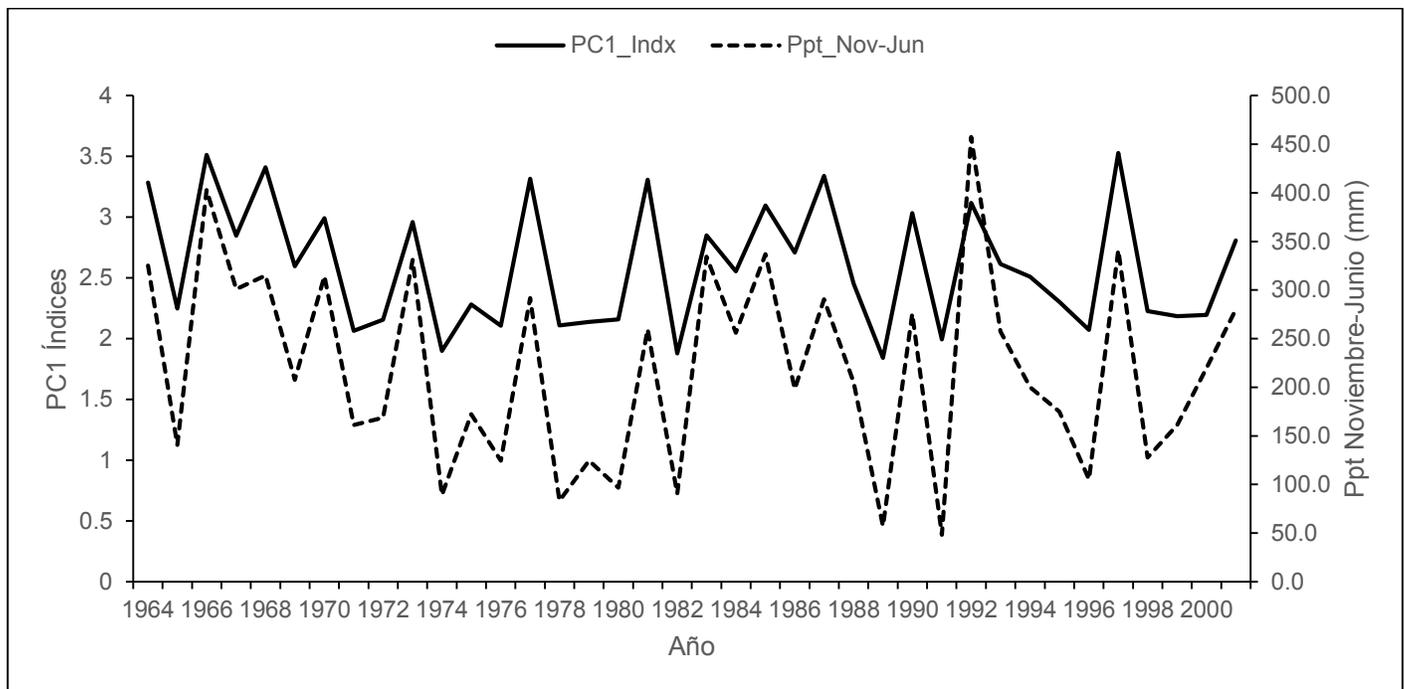


FIGURA 4. Relación entre la cronología regional (PC1) y la precipitación regional acumulada (noviembre-junio), estimada a partir de los datos de estaciones climáticas del área de estudio.

TABLA 3. Modelos de calibración para reconstrucción de la precipitación estacional, noviembre-junio, de la red dendrocronológica de *P. lumboltzii* en la Sierra Madre Occidental.

| Período   | $R^2_{Ajust}$ | Coeficientes (mm) |           | Error Estándar (mm) |           | t-Estadístico<br>Ho: $\beta = 0$ |        | Probab. Regresión |
|-----------|---------------|-------------------|-----------|---------------------|-----------|----------------------------------|--------|-------------------|
|           |               | $\beta_0$         | $\beta_1$ | $\beta_0$           | $\beta_1$ |                                  |        |                   |
| 1964-1982 | 0.87          | -220.9            | 166.4     | 40.1                | 15.1      | -5.50**                          | 11.0** | 3.8E-09           |
| 1983-2001 | 0.74          | -268.5            | 190.8     | 70.0                | 26.5      | 0.001**                          | 7.2**  | 1.5E-06           |
| 1964-2001 | 0.80          | -239.1            | 176.4     | 38.3                | 14.5      | -6.20**                          | 12.2** | 2.4E-14           |

TABLA 4. Estadísticos del proceso calibración-verificación para el modelo de reconstrucción de la precipitación acumulada, noviembre-junio, en el sur de Durango y norte de Jalisco.

| Período   | Correlación<br>Pearson | Reducción del<br>Error <sup>a</sup> | Valor de "t" <sup>b</sup> | Prueba de<br>signos <sup>c</sup> | Primera Diferencia Negativa <sup>d</sup> |
|-----------|------------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|
| 1964-1982 | 0.936*                 | 0.867                               | 5.727*                    | 1*                               | 1*                                       |
| 1983-2001 | 0.868*                 | 0.743                               | 4.194*                    | 3*                               | 1*                                       |

\*valor significativo (p < 0.05)

<sup>a</sup>No existe una prueba formal de significancia para este estadístico, pero un resultado positivo indica que la reconstrucción contribuye con información paleoclimática; es decir, que las varianzas detectadas en los datos instrumentales de la precipitación son reproducidas por las series dendrocronológicas.

<sup>b</sup>La prueba apareada de "t" entre las medias de los datos observados y reconstruidos. La prueba de significancia en este caso señala la similitud entre los datos instrumentales y reconstruidos.

<sup>c</sup>Prueba de signos indica la concordancia en signo para las desviaciones entre los datos observados y reconstruidos con relación a la media instrumental del período de comparación (Fritts, 1976). Subperíodo 1964-1982 (18 coincidencias, una diferencia); 1983-2001 (16 coincidencias, 3 diferencias).

<sup>d</sup>Prueba la robustez del grado de relación entre las series de datos instrumentales y reconstruidos, al remover la varianza de baja frecuencia durante la primera transformación de la diferencia (Fritts *et al.*, 1990).

### Reconstrucción de precipitación

Dado que las pruebas estadísticas fueron significativas en su totalidad para la verificación, la reconstrucción de la precipitación se realizó en la longitud total del período común de las cronologías (Fig. 5).

Aunque la cronología regional tiene alta sensibilidad a la precipitación invierno-primavera, también tiene la limitante de su extensión, que cubre solo el período 1890-2001 (112 años), por lo que para el período más reciente (2002-2013) y, para antes de 1890, no se tiene información de la variación climática interanual y multianual con la red de *P. lumboltzii* disponible hasta la fecha. Por lo anterior, y con el fin de contar con información dendroclimática para dichos períodos, se utilizó la cronología del sitio Sauz, que, con 346 años, es la más larga en esta red dendrocronológica y se extiende desde 1668 a 2013; para el desarrollo de esta cronología se involucraron 65 series de crecimiento, con parámetros dendrocronológicos excelentes con fines de reconstrucción (Tabla 1).

La serie residual de anillo total de esta cronología mostró una correlación altamente significativa ( $r = 0.81$ ,  $p < 0.000$ ,  $n = 38$ , 1964-2001) con los registros de precipitación promedio regional del período noviembre-junio utilizada para la reconstrucción previa. La relación también fue significativa para los subperíodos 1964-1982 ( $r = 0.83$ ,  $p < 0.000$ ,  $n = 19$ ) y 1983-2001 ( $r = 0.79$ ,  $p < 0.000$ ,  $n = 19$ ). Dada la alta significancia con los subperíodos y a la respuesta estadística de las pruebas de calibración-verificación, se utilizó el período total de registros climáticos para generar el siguiente modelo de reconstrucción lineal de precipitación:

$$Y_t = -176.0 + 404.6X_t$$

Donde:

$Y_t$ : Precipitación estimada del período estacional noviembre-junio (mm).

$X_t$ : Índice de anillo total de la cronología residual del sitio Sauz.

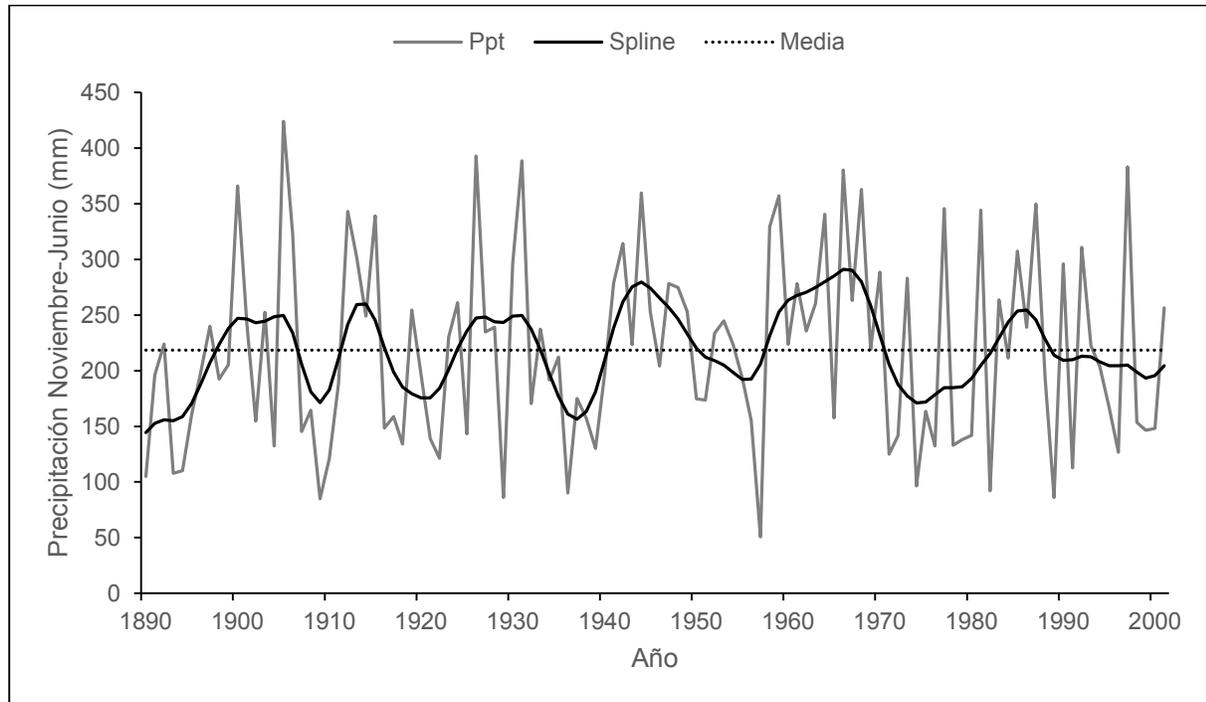


FIGURA 5. Reconstrucción de la precipitación regional (sur de Durango y norte de Jalisco) del período noviembre-junio.

La precipitación reconstruida mostró una alta asociación al compararla con la precipitación desarrollada con el PC1, que integró el total de series dendrocronológicas de *P. lumboltzii* que componen la red. Esta correlación fue de 0.84 ( $p < 0.000$ ,  $n = 112$ , 1890-2001), con precipitación media de 225.8 mm y 218.4 mm y desviación estándar de 82.3 mm y 84.4 mm, para las reconstrucciones de precipitación del sitio Sauz y cronologías integradas (PC1), respectivamente. Por lo anterior, se consideró adecuado utilizar la reconstrucción con la cronología del sitio Sauz para analizar la variabilidad de la precipitación en el período total de su extensión (Fig. 6).

#### Relación entre el comportamiento de la variabilidad climática regional y la influencia de fenómenos de circulación general

El componente principal que explicó la mayor varianza entre las cronologías de *P. lumboltzii*, que en este caso fue el PC1 e incluyó a las siete cronologías individuales; así como datos de precipitación reconstruidos con el mismo componente, que al comparar los valores con los diversos índices de El Niño (SOI reconstruido, SOI, MEI, TRI) y con los índices de AMO, PDO

y de PDSI, mostraron una influencia significativa, particularmente los relacionados con El Niño (Tabla 5).

#### DISCUSIÓN

Al igual que otras coníferas estudiadas en el norte de México (Villanueva-Díaz *et al.*, 2010), los parámetros dendrocronológicos determinados para *P. lumboltzii* indican que la especie posee alto potencial para el desarrollo de reconstrucciones dendroclimáticas, con la ventaja de una autocorrelación entre series relativamente inferior en comparación a otras especies de pinos y de *Pseudotsuga menziesii*, donde este parámetro es mayor y puede ser superior a 0.5 (Villanueva-Díaz *et al.*, 2011; Díaz-Ramírez *et al.*, 2016). La sensibilidad media relativamente alta (0.25-0.38) que presenta esta especie, aunado a la baja autocorrelación de primer orden (0.01-0.32), constituyen parámetros que favorecen una respuesta climática elevada con los registros de variables climáticas, particularmente donde el factor limitante es la precipitación (Fritts, 1976; Speer, 2010).

En reconstrucciones climáticas de esta región documentadas previamente, las correlaciones observadas entre la precipitación estacional (invierno-primavera) y los índices de

madera temprana o de anillo total para desarrollar los modelos de reconstrucción se encuentran en el intervalo de 0.70 a 0.75, donde los índices dendrocronológicos explican entre 50% y 57% de la variabilidad en la precipitación estacional (Cleaveland *et al.*, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2005; Irby *et al.*, 2013). En este estudio, la correlación obtenida en un período de 38 años (1964-2001) fue de 0.8 y este valor se incrementó hasta 0.87 para el subperíodo de 1964 a 1982 ( $n = 19$ ), lo que refleja la excelente respuesta de la especie a la precipitación. Además, estas correlaciones, de por sí altas, probablemente serían mayores si los registros climáticos utilizados fueran más adecuados (procedentes de estaciones cercanas a los sitios de colecta, sin datos faltantes, de un período más extenso); no obstante, con los datos climáticos disponibles, las series de crecimiento del pino triste llegan a explicar cerca de 76% de la variación en la precipitación que ocurre en el período noviembre-junio para esta región.

Este potencial es de gran relevancia técnica y científica, ya que dada la amplia distribución de esta especie es factible reconstruir información climática de sitios donde la carencia de datos climáticos instrumentales es notoria; información que es requerida con fines hidrológicos y para el manejo sustentable del bosque, ya que la especie puede captar eventos hidroclimáticos extremos, tanto secos como húmedos, lo cual la hace de gran

relevancia para conocer el impacto de estos eventos en la producción de biomasa, disponibilidad hídrica y en la salud del ecosistema.

Las dos reconstrucciones de precipitación obtenidas (considerando las cronologías incluidas en el PC1, como con la serie individual más extensa) indican la presencia de sequías intensas y prolongadas, las cuales han sido observadas con anterioridad en reconstrucciones de lluvia realizadas para la parte alta de la cuenca del río Nazas (Cerano-Paredes *et al.*, 2012), así como en reconstrucciones regionales para otras áreas de los estados de Chihuahua y Durango (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva-Díaz *et al.*, 2011); donde se señalan sequías severas como las ocurridas a mediados y finales del siglo XVII (1665-1688, 1695-1718), mediados del siglo XVIII (1767-1778), finales del siglo XIX (1890-1896) y mediados del siglo XX (1948-1963); algunas de las cuales provocaron serios problemas sociales y económicos en la región, como las que se presentaron en los períodos: 1720-1723, 1739-1741, 1748-1752, 1755, 1758, 1760-1766, 1770-1773, 1785-1786, 1804-1806, 1812-1814 y décadas de 1890, 1950 y 1990, que provocaron hambrunas y descontento social por la carestía de granos básicos (Endfield y Fernández, 2006).

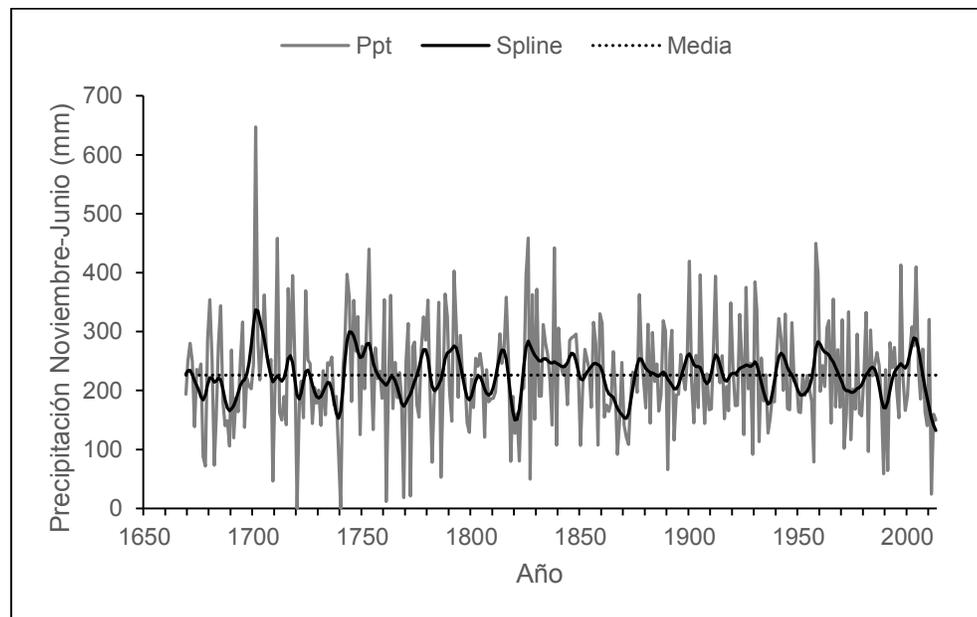


FIGURA 6. Reconstrucción de la precipitación estacional noviembre-junio para el sur del estado de Durango, con base en la cronología de *P. lamboltzii* del sitio Sauz.



TABLA 5. Asociación entre los índices de fenómenos circulatorios y el componente principal con mayor varianza de las cronologías de anillo total de *P. lumboltzii* (PC1) y la precipitación reconstruida noviembre-junio (PptRec).

| Índice                        | Meses   | Período (años)  | Correlación (r) |        | Probabilidad |        |
|-------------------------------|---------|-----------------|-----------------|--------|--------------|--------|
|                               |         |                 | PC1             | PptRec | PC1          | PptRec |
| SOI Reconstruido <sup>1</sup> | Nov-Feb | 1890-1977 (88)  | -0.586          | -0.606 | 0.000        | 0.000  |
| SOI <sup>2</sup>              | Ene-Jul | 1890-2001 (112) | -0.437          | -0.520 | 0.000        | 0.000  |
| MEI <sup>3</sup>              | Ene-Abr | 1890-2001 (112) | 0.501           | 0.538  | 0.000        | 0.000  |
| TRI <sup>4</sup>              | Ene-Abr | 1894-1994 (101) | 0.524           | 0.543  | 0.000        | 0.000  |
| PDO <sup>5</sup>              | Ene-Ago | 1900-2001 (102) | 0.228           | 0.260  | 0.020        | 0.008  |
| AMO <sup>6</sup>              | Mar-Jun | 1890-2001 (112) | 0.201           | 0.241  | 0.030        | 0.010  |
| PDSI <sup>7</sup>             | Jun-Ago | 1901-2001 (101) | 0.46            | 0.490  | 0.000        | 0.000  |

<sup>1</sup>SOI Reconstruido Noviembre-Febrero (Stahle *et al.*, 1998); <sup>2</sup>SOI instrumental (Allan, Lindsay y Parker, 1996); MEI<sup>3</sup> índice multivariado de ENSO (Wolter y Tilmin, 1993) <sup>4</sup>TRI Enero-Abril (Wright, 1979); <sup>5</sup>PDO Enero-Diciembre (Mantua *et al.*, 1997); <sup>6</sup>AMO Julio-Diciembre (Van Oldenborgh *et al.*, 2009); <sup>7</sup>PDSI instrumental (Stahle *et al.*, 2016).

Las dos sequías detectadas en las últimas dos décadas (1989-1991 y 2011-2014) se encuentran bien documentadas en registros climáticos y en la reconstrucción de lluvia estacional; sus valores presentan magnitudes muy cercanas a los registros climáticos disponibles. Estas sequías provocaron serios daños a la agricultura y ganadería y su impacto socioeconómico y acciones de mitigación son descritas por Giner *et al.* (2010) para el norte de México.

La respuesta de la serie regional de *P. lumboltzii* a fenómenos atmosféricos de circulación general fue superior al comparar la precipitación reconstruida, que con los índices promedio de las diversas cronologías contenidas en el PC1. Esta diferencia se atribuye a que estos fenómenos parecen tener un mayor efecto en ciertas estaciones del año; por ejemplo, en el caso de la fase cálida de ENSO, este tiene mayor influencia en la cantidad de precipitación que se presenta en la estación invierno-primavera para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015), situación que se vio reflejada en correlaciones significativas con la lluvia acumulada enero-abril del TRI, como se ha corroborado en otras reconstrucciones para Chihuahua y Durango (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva-Díaz *et al.*, 2014). Por otra parte, los índices de anillo total tienen la influencia de variables climáticas que ocurren a lo largo del año y aunque su

valor se explique en mayor proporción por las condiciones climáticas de cierto período, su crecimiento aun depende en parte de las condiciones climáticas prevalecientes en el resto del año; como lo indica la respuesta significativa entre los índices de anillo total de cuatro colectas de *P. lumboltzii* de los sitios La Flor y Mezquital y la precipitación acumulada de agosto (González *et al.*, 2017).

Patrones circulatorios como PDO y AMO, aunque mostraron una influencia significativa, esta no fue tan intensa como la observada con la mayoría de los índices de ENSO. La relación también fue significativa tanto con los índices de las cronologías involucradas en el PC1 como con la precipitación reconstruida del período noviembre-junio y los índices instrumentales del PDSI junio-agosto (Stahle *et al.*, 2016); situación que indica que el valor de los índices tiene relación con el balance hídrico de la estación de verano expresada con los valores del PDSI.

Aunque la respuesta de las cronologías de *P. lumboltzii* con los índices de fenómenos circulatorios fue significativa, esta fue igual o inferior a la obtenida con otras especies como *Pseudotsuga menziesii* (Díaz, Therrell, Stahle y Cleaveland, 2002; Cerano-Paredes *et al.*, 2011; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015) y *Pinus durangensis*

(Díaz-Ramírez *et al.*, 2016), cuyas correlaciones con los diversos índices del Niño superó el 0.5.

La ventaja de utilizar cronologías de pino triste para monitorear la presencia histórica de eventos hidroclimáticos extremos se fundamenta en: su amplia distribución ecológica, su respuesta significativa a la variabilidad interanual de la precipitación y su alta homogeneidad a la respuesta climática común en gran parte de su área de distribución.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de una red dendrocronológica de *P. lumboltzii* en su área de distribución de la Sierra Madre Occidental constituye una alternativa de información dendroclimática, particularmente valiosa en sitios donde especies de importancia dendrocronológica como *Pseudotsuga menziesii* u otras especies de coníferas con potencial dendroclimático no están presentes, o donde el aprovechamiento forestal u otros cambios de uso del suelo han eliminado individuos longevos de especies con importancia económica. *P. lumboltzii* por habitar sitios pobres, por su conformación morfológica y lento crecimiento, no tiene importancia comercial; de ahí que individuos que sobrepasan los 300 años de edad están presentes en algunos sitios de bosque mixto ubicados en rodales de poca extensión a lo largo de este sistema montañoso.

Los parámetros estadísticos de las series de anillo total de *P. lumboltzii* fueron similares a los de otras especies presentes en el norte de México; no obstante, la autocorrelación de primer orden es menor; lo que favorece una mayor respuesta a variaciones interanuales y multianuales de la precipitación; situación que resulta en una mejor respuesta a la asociación entre la precipitación acumulada invierno-primavera y los índices de crecimiento anual, lo que permite realizar reconstrucciones retrospectivas con mayor confiabilidad.

La asociación entre la serie dendrocronológica regional, la precipitación reconstruida con la red dendrocronológica de *P. lumboltzii* y los fenómenos atmosféricos circulatorios, caso específico ENSO, fue significativa para los diversos índices (SOI, MEI, TRI), alcanzando valores superiores a 0.6, al compararla con índices reconstruidos del SOI para el norte de México. Otros fenómenos circulatorios como el PDO y AMO también fueron significativos, lo que indica que, aunque hay dominancia de

ENSO en determinar las condiciones climáticas de la región, los fenómenos indicados también interactúan durante las estaciones primavera-verano, determinando la variación de la lluvia en esta región.

El balance hidrológico de la estación de verano, en función a los índices del PDSI, indicaron que existe una relación significativa entre la precipitación reconstruida y la intensidad de sequía, situación que permite definir históricamente la frecuencia e intensidad de eventos hidroclimáticos extremos que afectaron la región de las sequías en esta región y la extensión en la que se presentaron, lo cual se corrobora con previas reconstrucciones dendroclimáticas desarrolladas para la región y para el norte de México.

Las series desarrolladas con esta especie se limitan al sur de su área de distribución, por lo que es importante expandir la red dendrocronológica con esta especie, particularmente hacia sitios en las vertientes occidental y oriental de la Sierra Madre Occidental, donde se tiene un alto impacto del Monzón de Norteamérica, que según registros climáticos explica más de 70% de la precipitación que ocurre a lo largo de este sistema montañoso.

## RECONOCIMIENTOS

La presente propuesta fue apoyada con fondos de los proyectos fiscales del Inifap “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”.

## REFERENCIAS

- Allan, R., Lindsay, J., & Parker, D. (1996). *El Niño Southern Oscillation and climate variability*. CSIRO: Melbourne.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Arreola-Ávila, J. G., Sánchez-Cohen, I., & Valdez-Cepeda, R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44. doi:10.21829/myb.2009.1521189
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., & Constante-García, V. (2011). El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* (publicación especial), 27, 207-215. doi:10.5154/r.rchscfa.2010.09.076



- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Constante-García, V., González-Barrios, J. L., & Estrada-Ávalos, J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(10), 7-23.
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva D. J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59, 369-388. doi: 10.1023/A:1024835630188
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37-59.
- Descroix, L. (2004). *La Sierra Madre Occidental, fuente de agua del norte de México*. En Descroix, L., González Barrios, J. L., & Estrada Ávalos, J. (Eds.), *La Sierra Madre Occidental: una fuente de agua amenazada* (pp. 8-17). Gómez Palacio, México: INIFAP-IRD.
- Díaz, S., Therrell, M. D., Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua Winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research*, 22(3), 237-244. doi: 10.3354/cr022237
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y Bosques*, 22(1), 111-123. doi: 10.21829/myb.2016.221480
- Endfield, G. H., & Fernández, T. I. (2006). Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climate Change*, 75, 391-419. doi: 10.1007/s10584-006-34927.
- Farjon, A. (2013). *Pinus lumboltzii*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T42377A2976271. doi: 10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42377A2976271.en.
- Farjón, A., Pérez de la Rosa, J. A., & Styles, B. T. (1997). *A field guide to the pines of Mexico and Central America*. Kew, Estados Unidos: Kew Publishing.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005). Magnetismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución del margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII(3), 343-378.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Nueva York, Estados Unidos: Academic Press.
- Fritts, H. C., Guiot, J., & Gordon, G. A. (1990). Verification. En E. R. Cook, & L. A. Kariukstis (Eds.), *Verification methods of dendrochronology: applications on the environmental sciences* (pp. 178-185) Dordrecht, Países Bajos: Kluwer.
- García-Arévalo, A., & González-Elizondo, M. S. (2003). *Pináceas de Durango* (2da ed.). Ciudad de México, México: Comisión Nacional Forestal e Instituto de Ecología, A.C.
- García, E. (2004). *Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen* (5ta ed.). Ciudad de México, México: Instituto de Geografía. UNAM.
- Giner, R. A., Fierro, L. C., & Negrete, L. F. (2011). *Análisis de la problemática de la sequía 2011: 2012 y sus efectos en la ganadería y agricultura de temporal*. Saltillo, Coahuila: CONAZA.
- González Elizondo, M. (2003). *Indicadores de cambio climático en algunas especies de Pináceas de la Sierra Madre Occidental, México* (disertación doctoral). Linares, México: Facultad de Ciencias Forestales, UANL.
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Navar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O., & Jiménez, J. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681 – 2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213, 39-53. doi: 10.1016/j.foreco.2005.03.012.
- González-Elizondo, M. S., & Márquez Linares, M. A. (2007). *Vegetación y Ecorregiones de Durango*. Ciudad de México, México: Plaza y Valdez.
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Botanica Mexicana*, 100, 351-403. doi: 10.21829/abm100.2012.40
- González-Elizondo, M., González-Elizondo, M. S., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2017). Evaluación del potencial dendrocronológico de *Pinus lumboltzii* B.L. Rob. Fernald. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 28-54.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & Villanueva J. (2013). Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 19(1), 93-105. doi: 10.21829/myb.2013.191349
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069-1079. doi: 10.1175/1520-0477(1997)07811069:AP1COW>2.0.CO:2.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Ciudad de México, México: Limusa.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat]. (2016). *Anuario estadístico de la producción forestal 2015*. Recuperado de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181383/A\\_NUARIO\\_FORESTAL\\_2015](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181383/A_NUARIO_FORESTAL_2015)
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Nike, N., Nakumara, J., Lie, C., Cook, E., & Stahle, D. W. (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*. Tucson, AZ: The University of Arizona Press.
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., & Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079%3C2137:EDROTS%3E2.0.CO;2
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin, D., & Howard, J. M. (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. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.06.018
- Stokes, M. A., & T. L. Smiley. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. Chicago, Illinois: The University of Chicago Press.
- Van Oldenborgh, G. J., Te Raa, L. A., Dijkstra, H. A., & Philip, S. Y. (2009). Frequency- or amplitude-dependent effects of the Atlantic

- meridional overturning on the tropical Pacific Ocean. *Ocean Science*, 5, 293-301. doi:10.5194/os-5-293.2009.
- Villanueva, D. J., Luckman, B. H., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., Cerano-Paredes, J., & Jasso-Ibarra, R. (2005). Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrocronología*, 22(3), 215-223.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Therrell, M. D., & Cleaveland, M. K. (2006). *The climatic response of tree-ring chronologies in the Sierra Madre Occidental, Mexico* (pp. 91-92). Symposium on Climate Change: Organizing the Science in the American Cordillera. Recuperado de [www.sacc.org.uy/saccdocs/CONCORDAbstMendoza2006.pdf](http://www.sacc.org.uy/saccdocs/CONCORDAbstMendoza2006.pdf).
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D. W., Constante-García, V., Vázquez-Selem, L., Estrada-Ávalos, J., & Benavides-Solorio, J. de D. (2010). Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 7-30.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Constante-García, V., Stahle, D. W., Estrada-Ávalos, J., & Tostado-Plascencia, M. M. (2011). Variabilidad hidroclimática histórica del norte de México inferida con anillos de crecimiento de Douglas-fir. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (publicación especial), 2, 221-234.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Rosales-Mata, S., Arroccena-López, J. C., Stahle, D. W., Ruiz-Castro, J. A., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2014). Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca alta del Río Mezquital, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (publicación especial), 10, 1897-1912.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés-Montalvo, C., Vázquez-Selem, L., Yocom, L. L., & Ruiz-Castro, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noreste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 87, 141-153.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of climate and Applied Meteorology*, 23, 201-213. doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO:2.
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (1993). Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. *Proceedings of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman Oklahoma. NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Climate Survey CIMMS - School of Meteorology of the University of Oklahoma*.
- Wright, P. B. (1979). Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature*, 277, 371-374. doi: 10.1038/277371a0
- Manuscrito recibido el: 6 de marzo de 2017
- Aceptado el: 16 de noviembre de 2017
- Publicado el: 12 de junio de 2018
- Este documento se debe citar como:
- Villanueva-Díaz, J., González-Elizondo, M., Cerano-Paredes, J., Estrada Á., J., Martínez S., A. R., & Rosales M., S. (2018). Red dendrocronológica de pino triste (*Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald) en la Sierra Madre Occidental para reconstrucción de lluvia estacional. *Madera y Bosques*, 24(2), e2421530. doi: 10.21829/myb.2018.2421530
- Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.