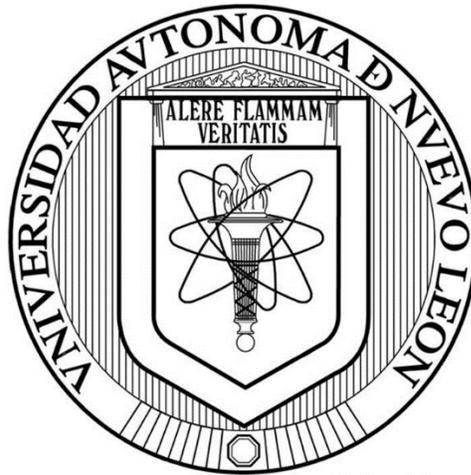


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**RESPUESTA HIDROCLIMÁTICA DE LOS PINOS PIÑONEROS EN  
MIQUIHUANA, TAMAULIPAS, MÉXICO**

**POR:**

**SAMUEL ARROYO MORALES**

**Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**Mayo, 2022**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**RESPUESTA HIDROCLIMÁTICA DE LOS PINOS PIÑONEROS EN  
MIQUIHUANA, TAMAULIPAS, MÉXICO**

**POR:**

**SAMUEL ARROYO MORALES**

**Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**Mayo, 2022**

**RESPUESTA HIDROCLIMÁTICA DE LOS PINOS PIÑONEROS EN  
MIQUIHUANA, TAMAULIPAS, MÉXICO**

Aprobación de Tesis



---

Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

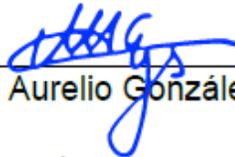
Director



---

Dr. Javier Jiménez Pérez

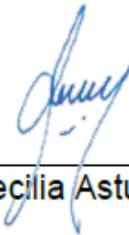
Codirector



---

Dr. Marco Aurelio González Tagle

Asesor



---

Dra. Claudia Cecilia Astudillo Sánchez

Codirectora externa

Mayo, 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León y en especial al cuerpo de profesores-investigadores que fueron parte importante en mi formación académica como maestro en ciencias forestales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de postgrado de Maestría en Ciencias Forestales.

Al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, por todos los consejos y sugerencias, por el apoyo en todo momento, pero principalmente por la motivación para poder cumplir con el objetivo planteado.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez, por su indispensable participación en la presente investigación.

Al Dr. Marco Aurelio Gonzáles Tagle, por su gran aportación en la presente investigación y apoyo en todo momento.

A la Dra. Claudia Cecilia Astudillo Sánchez, quien en todo momento del periodo de investigación estuvo presente brindando el apoyo necesario para el desarrollo de la presente.

A mis compañeros Esperanza, Emilio, Eduardo, Dennis, Adrián y Daniel por ser parte importante en el transcurso de la estancia en el postgrado.

Al Laboratorio Nacional de Dendrocronología del INIFAP CENID RASPA Gómez Palacio, Dgo. Así como a todos sus colaboradores.

## **DEDICATORIAS**

### **A Dios**

Por darme la fortaleza, conocimiento, salud y valor para poder cumplir las metas planteadas a lo largo de mi vida académica y por lo que está por venir.

### **A mis padres Samuel y Sonia**

Por brindarme siempre el apoyo, el ánimo, cultura y valores para seguir superándome en la vida cotidiana, así como académicamente y más que nada como persona.

### **A mis hermanas Cristina, Claudia, Ana y Atziri**

Quienes incondicionalmente, directa o indirectamente me brindan su apoyo para afrontar las adversidades que se me presentan y en su caso ayudarme a superarlas.

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>X</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>5</b>
Los bosques de pinos piñoneros en México .....	5
<i>Pinus cembroides</i> .....	5
<i>Pinus nelsonii</i> .....	6
Dendrocronología .....	7
Reconstrucciones dendroclimáticas con pinos piñoneros .....	8
Variabilidad hidroclimática en México y la influencia del Niño-Oscilación del Sur ...	9
Índices de sequía .....	10
Respuesta hidroclimática de los pinos piñoneros y otras coníferas en el noreste de México .....	11
Impacto de las sequías en México.....	11
<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>15</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
General:.....	16
Específicos: .....	16
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
Descripción del área de estudio.....	17
Clima, suelo y vegetación asociada.....	18
Trabajo en campo.....	19
Procesamiento de las muestras.....	20
Desarrollo de la cronología .....	22
Respuesta hidroclimática y reconstrucción de precipitación .....	23
Asociación con ENSO .....	25
Asociación con índices de sequía.....	26
Validación de la reconstrucción de la precipitación .....	27
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>27</b>
Cronología de anillos de árboles.....	27
Función de respuesta climática y reconstrucción de las precipitaciones.....	29
Variabilidad de los eventos hidroclimáticos reconstruidos.....	31
Influencia de ENSO y asociación con los índices de sequía .....	34
Impacto de las sequías y las lluvias.....	35
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>41</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Estaciones meteorológicas cercanas a los lugares de muestreo de pino piñonero en Miquihuana.....	24
<b>Tabla 2.</b> Parámetros dendrocronológicos de las series de núcleos de árboles de pino piñonero en Miquihuana, Tamaulipas, México. (1): Intercorrelación de series; (2): Desviación estándar; (3): Sensibilidad media; (4): Autocorrelación de primer orden; (5): Relación señal-ruido; (6): $R_{bar}$ (intensidad de la señal); (7): Señal poblacional expresada; (*): año a partir del cual el tamaño de la muestra es suficientemente robusta para las reconstrucciones climáticas.....	28
<b>Tabla 3.</b> Períodos de calibración y valores estadísticos del análisis de regresión entre la cronología estándar de la anchura del anillo y las precipitaciones de noviembre-julio. ( $R^2_{Adj}$ ): coeficiente de determinación ajustado a la baja por la pérdida de grados de libertad (Draper y Smith, 1981). ....	30
<b>Tabla 4.</b> Verificación estadística de la precipitación reconstruida de noviembre a julio. (*): nivel de confianza significativo ( $p < 0.05$ ). ....	31
<b>Tabla 5.</b> Eventos hidroclimáticos de relevancia socioeconómica en el noreste de México. Los valores por debajo y por encima de la media (309.84 mm; 1853-2018), indican condiciones secas y húmedas, respectivamente. ....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** *Pinus cembroides* ubicado en el municipio de Miquihuana, Tamaulipas. .... 6
- Figura 2.** *Pinus nelsonii* ubicado en el municipio de Miquihuana, Tamaulipas. .... 7
- Figura 3.** Ubicación del área de estudio en el subtrópico nororiental mexicano. Están representados los lugares de muestreo y las estaciones meteorológicas..... 17
- Figura 4.** Proceso de extracción de virutas..... 19
- Figura 5.** Rotulación de muestras para facilitar su procesamiento ..... 20
- Figura 6.** Procesamiento de las muestras llevado a cabo en el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP CENID RASPA Gómez Palacio, Dgo..... 21
- Figura 7.** Medición del ancho del anillo total de cada muestra ..... 22
- Figura 8.** Cronología combinada del ancho de los anillos de los pinos piñoneros desde 1846 hasta 2018. Se obtuvo un EPS > 0.85 después de 1853. (RWI) indica los índices interanuales de anchura de anillos (alta frecuencia). (Spline) destaca los eventos de baja frecuencia a escala decenal. (Media): es la media de la cronología, que es aproximadamente 1.0. (Muestra) muestra el número de núcleos incluidos en cada valor anual. .... 28
- Figura 9.** Función de respuesta a la precipitación de los pinos piñoneros. (a) Coeficiente de correlación entre los índices estándar de ancho de anillos anuales y 18 meses consecutivos de precipitación (julio-diciembre anterior al año de crecimiento y enero-diciembre durante el año de crecimiento), periodo 1964-2018; la línea discontinua indica un umbral de confianza del 95%. (b) Relación entre la versión estándar de la serie de ancho de anillo y la precipitación de noviembre-julio. (c) Gráfico de dispersión del modelo de regresión para la reconstrucción de la precipitación.... 29
- Figura 10.** Reconstrucción de la precipitación basada en anillos de árboles para los últimos 166 años en Miquihuana, Tamaulipas, México. Reconstrucción de la variabilidad de la precipitación (noviembre-julio, 1853-2018), la línea gris indica la precipitación estacional (alta frecuencia), la línea negra (spline) representa la variabilidad de la precipitación a nivel decenal (baja frecuencia) para resaltar los episodios secos (bucle en línea roja) y húmedos (bucle en línea azul). La línea de puntos representa la media de la reconstrucción (309.84 mm). .... 32
- Figura 11.** Frecuencias y periodos significativos de eventos hidroclimáticos extremos en la precipitación reconstruida. (a) Análisis del espectro de potencia: IC representa el intervalo de confianza; los valores sobre el intervalo de confianza del 99% corresponden a una frecuencia de 4.07 años, los que están sobre el 90% y el 95% corresponden a frecuencias de 2.52 y 2.22 años, respectivamente. (b) Análisis del espectro de potencia de ondeleta: los contornos negros indican las porciones del

espectro significativas al 95%; las áreas sombreadas blancas identifican el cono de influencia del análisis. .... 33

**Figura 12.** Patrón espacial e intensidad del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) reconstruido con anillos de árboles para la temporada diciembre-abril. Seis sequías significativas (a-f) y dos precipitaciones importantes (g-h) en la historia de México fueron mapeadas utilizando el Atlas de Precipitación Estacional de América del Norte (Stahle *et al.*, 2020). El área de estudio se indica con una estrella negra. .... 38

## RESUMEN

Este estudio presenta una nueva cronología de ancho de anillo de pinos piñoneros de Miquihuana, Tamaulipas, en el noreste de México, y utiliza datos climáticos y comparaciones con los índices de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y los índices de sequía para reconstruir una precipitación histórica que permita examinar la variabilidad hidroclimática de la región a largo plazo, la frecuencia de sequías y lluvias, y su impacto socioeconómico. Los pinos piñoneros, *Pinus cembroides* y *P. nelsonii* ofrecen un ejemplo único del potencial dendroclimático de las especies semiáridas para la reconstrucción de fluctuaciones cíclicas de baja frecuencia de sequías y lluvias en el noreste semiárido de México. El crecimiento radial de estas dos especies fue sensible a las precipitaciones desde noviembre del año anterior hasta julio del año en curso. Durante sequías extremas, los pinos piñoneros produjeron reducciones en el ancho de los anillos, mientras que en las lluvias abundantes se detectó un aumento. La precipitación reconstruida se extiende desde 1853 hasta 2018 (166 años) y muestra una alta variabilidad interanual y multianual de precipitación influenciada por ENSO, causando eventos hidroclimáticos extremos cada 2 a 4 años. La asociación altamente significativa con los índices de sequía refuerza el uso potencial de pinos piñoneros como un indicador para determinar las condiciones de sequía dominantes en la región. Evidencias de documentos históricos y reconstrucciones dendroclimáticas del norte y centro de México validaron los principales periodos de sequía y lluvia detectados en la reconstrucción. Los periodos más secos se presentaron de 1860 a 1863, de 1890 a 1900, de 1915 a 1933, de 1945 a 1965, de 1998 a 2000 y de 2005 a 2011, mientras que los más húmedos tuvieron lugar de 1877 a 1889, de 1934 a 1944, de 1975 a 1988 y de 2013 a 2015. Las sequías desencadenaron hambrunas, migración de la población rural y conflictos armados. Los resultados muestran un amplio espectro de variabilidad natural en las precipitaciones para el noreste de México, proporcionando así información que podría contribuir a una mejor planificación de los recursos hídricos regionales.

**Palabras clave:** Bosque de pino piñonero, Dendrocronología, ENSO, *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii*, Sequía, Variabilidad climática.

## ABSTRACT

This study introduces to a new ring-width chronology of pinyon pines from Miquihuana Tamaulipas in northeastern Mexico and uses climate series analyses and comparisons with ENSO and drought indices to reconstruct a historical precipitation that allows to examine the long-term hydroclimatic behavior of seasonal rainfall to determine the frequency of droughts and pluvial in this region, and its impact on society. The pinyon pines (*P. cembroides* and *Pinus nelsonii*) offer a unique example of the dendroclimatic potential of these species for the reconstruction of the cyclic fluctuations of droughts and pluvial in the semi-arid zone of the northeastern Mexican subtropic. The radial growth of these two species was sensitive to precipitation from November of the previous year to July of the current year. During extreme droughts pinyon pines resulted in ring-width reductions, whereas in pluvial, an increase was detected. The reconstructed precipitation extends from 1853 to 2018 (166 years), the observations from this reconstruction suggest a high interannual and multiannual variability of precipitation influenced by ENSO, causing extreme hydroclimatic events mostly every 2 to 4 years. The highly significant association with drought indices reinforces the usefulness of pinyon pines as a proxy of dominant drought conditions in the region. Evidence from historical documents and dendroclimatic reconstructions from northern and central Mexico validated the main periods of droughts and extreme rainfall detected in this precipitation reconstruction. The periods with the worst droughts were 1860-1863, 1890-1900, 1915-1933, 1945-1965, 1998-2000, and 2005-2011. Periods with abundant rainfall were 1877-1889, 1934-1944, 1975-1988, 2013-2015. Highlights the impact of droughts on the social and economic aspects of Mexico because they have caused famine, migration of rural population, and warfare. Our results show a wide scene of natural variability in precipitation of northeastern Mexico, providing insights that could contribute to early management of water in arid and semi-arid zones of country to prevent the shortage of water resources, the negative impact on the agricultural sector and the population vulnerability to drought.

**Keywords:** Climatic variability, Dendrochronology, Drought, ENSO, *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii*, Pinyon pine forest

## INTRODUCCIÓN

Las especies de *Pinus* se distribuyen principalmente en el hemisferio norte y descienden de una población que se originó en bosques húmedos y fríos (Price *et al.* 1998). Sin embargo, los pinos piñoneros se diferencian de las otras especies de pinos por habitar regiones con mayor grado de aridez y a menudo constituyen una zona de transición entre matorrales desérticos y bosque montañoso.

En México, los pinos tienen gran importancia ecológica, económica y social. A menudo son el componente dominante de la vegetación, influyen en los procesos funcionales del ecosistema tales como los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos, los regímenes de fuego, y son hábitat y fuente de alimento para la fauna silvestre. Tienen un alto valor económico, ya que son fuente de madera, leña, pulpa, resinas, semillas comestibles y otros productos. Además, ofrecen importantes servicios ambientales (agua, oxígeno, recreación, captura de carbono) e influyen en el clima regional (García y González, 2003; Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

El ambiente árido donde habitan la mayoría de las especies de pino piñonero tiende a tener condiciones cálidas, secas y subtropicales, donde la selección natural reemplazó el prototipo de árboles más altos de rápido crecimiento a tipos de crecimiento lento y tronco corto que usan el agua con moderación. Los pinos piñoneros tienen semillas grandes, las cuales son comestibles y carecen de alas. Por lo tanto, los bosques de pinos piñoneros han proporcionado una amplia variedad de servicios ecológicos y económicos para las poblaciones humanas y de vida silvestre locales durante siglos, y continúan haciéndolo hoy en día (Lanner, 1981; Perry, 1991; Richardson, 1998; Farjon y Filer 2013).

La posición geográfica y la historia geológica de México contribuyen a una amplia gama de características fisiográficas y tipos de clima, lo que a su vez ha contribuido a la diversificación de los pinos con 46 especies registradas, donde 12 de ellas pertenecen a la rama de pinos piñoneros en el subgénero *Strobus* (*Haploxylon*; comúnmente llamado pinos blandos) y sección *Parrya* (Gernandt *et al.*, 2005; Sánchez-González *et al.* 2008). Los bosques de pino piñonero en

México se encuentran en poblaciones dispersas y habitan en estribaciones de las elevaciones más predominantes del país: Baja California, Sierra Madre Oriental y Occidental, y Cinturón Volcánico Transmexicano (Sánchez-González, 2008).

En la región norte de la Sierra Madre Oriental, se han reconocido cuatro especies de pinos piñoneros (*Pinus culminicola* Andresen et Beaman, *Pinus pinceana* Gord., *Pinus cembroides* Zucc., *Pinus nelsonii* Shaw). En el extremo noreste de México, que comprende el estado de Tamaulipas, el municipio de Miquihuana cuenta con una importante cobertura de bosque de pino compuesta por *P. cembroides* y *P. nelsonii*, donde constituyen las especies arbóreas más importantes de la zona porque sus frutos secos comestibles aportan parte de la dieta local y economía de la población rural (Suzan-Azpíri et al., 2002). Estas dos especies de pino piñonero se establecen en zonas de transición entre la vegetación xerófila de climas semiáridos y el bosque de montaña; áreas caracterizadas por tener exposiciones altamente insoladas (sur-suroeste), suelos poco profundos con baja capacidad de retención de agua y fertilidad baja (Farjon et al., 1997; Rzedowski, 2006; Romero et al. 2014).

Los pinos piñoneros en México se caracterizan por una temporada de crecimiento corta, que está dictada por disponibilidad limitada de agua. Por lo tanto, estas especies muestran una alta variabilidad interanual del ancho del anillo y una alta sensibilidad media que favorece su potencial dendrocronológico. La investigación dendroclimática en pinos piñoneros mexicanos ha determinado una respuesta positiva del crecimiento radial anual a la precipitación estacional invierno-primavera o anual, que ha permitido el análisis de la variabilidad hidroclimática durante varios cientos de años en algunas áreas de la Sierra Madre Oriental y el Cinturón Volcánico Transmexicano (Constante et al., 2009; Villanueva et al., 2009; Santillán-Hernández et al., 2010; Carlón et al., 2018; Villanueva et al., 2018).

La mayoría de las cronologías de anillos de árboles en el norte de México están altamente correlacionadas con la humedad que se ha retenido en el suelo durante la estación fría (Stahle y Cleaveland 1993; Torbenson et al. 2019). Así, índices

de sequía como el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés), el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) y el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) se han utilizado para analizar la respuesta hidroclimática de varias especies de coníferas en el noreste de México. Esta información ha proporcionado conocimientos sobre la variabilidad de sequías y episodios húmedos que caracterizan al norte de México (Stahle *et al.*, 2016, Stahle *et al.*, 2020; Villanueva-Díaz *et al.*, 2020a). Debido a esto, la influencia de condiciones secas sobre el crecimiento radial anual de especies de pino piñonero en Miquihuana, Tamaulipas, podría analizarse a través de estos índices de sequía para definir la frecuencia de episodios secos y su impacto en la socioeconomía de la región.

La respuesta hidroclimática de los árboles sensibles a la humedad en la región subtropical de América del Norte, especialmente en el sector TexMex (es decir, el norte de México y las zonas fronterizas del suroeste de los Estados Unidos) se ha encontrado que está fuertemente relacionada con El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) aumentando las precipitaciones en la fase cálida (El Niño) y disminuyendo las precipitaciones en la fase fría (La Niña) (Torbenson *et al.*, 2019). Del lado mexicano, este hallazgo está respaldado por trabajos dendrocronológicos que han mostrado una influencia positiva en el crecimiento de los árboles debido a la precipitación estacional invierno-primavera asociada con ENSO (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Cerano *et al.*, 2011a; Villanueva *et al.*, 2018; Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020).

Los datos instrumentales han demostrado que el clima en México está fuertemente influenciado por ENSO (Magaña *et al.*, 1999; Magaña *et al.*, 2003; Méndez y Magaña, 2010). Sin embargo, un obstáculo para utilizar los registros climáticos en análisis de fenómenos atmosféricos a gran escala es su extensión, representatividad y calidad limitada. Las reconstrucciones de precipitación de los anillos de los árboles han demostrado que reproducen la señal, intensidad y patrones espaciales de importantes modos de circulación océano-atmosférica

como ENSO, que influye en la precipitación de las estaciones fría y cálida según lo registrado por los datos instrumentales. Además, las reconstrucciones dendroclimáticas tienen la ventaja de proporcionar estimaciones de la naturaleza estacional de las grandes sequías y lluvias antes de la instrumentación moderna del registro del clima (Stahle *et al.*, 2020).

Las sequías han jugado un papel importante en el desarrollo de las sociedades precoloniales y modernas de México; archivos documentados y registros modernos describen la presencia de hambrunas, epidemias, migración de poblaciones humanas y conflictos armados, donde la variabilidad climática jugó un papel importante en estos eventos (Florescano 1980; Liverman, 1990; O'Hara y Metcalfe 1997; Endfield y Fernández 2006; Dell, 2012). Los registros indican que gran parte del suministro de agua para los asentamientos humanos y la agricultura en México es proporcionado por la lluvia, y el riego superficial se basa en el agua almacenada en embalses, de modo que la cantidad de lluvia es un factor determinante en la estabilidad social y económica (Conde *et al.*, 1997; Englehart y Douglas, 2000).

Las condiciones áridas que caracterizan la mayor parte del norte de México, incluyendo Miquihuana, Tamaulipas, en la provincia de la Sierra Madre Oriental, se traducen en que el suministro de agua sea la principal limitación para el desarrollo socioeconómico de esta región. La falta de información disponible sobre las tendencias de precipitación a largo plazo constituye una limitación significativa para una adecuada planificación de este recurso.

Dado que los pinos piñoneros tienen un buen potencial dendrocronológico y su crecimiento es sensible a la variación en la precipitación, la intención de este estudio es llevar a cabo el análisis de la respuesta hidroclimática de los pinos piñoneros en Miquihuana, Tamaulipas, con el propósito de dar a conocer la variabilidad histórica de la precipitación en la zona de estudio, detectar la presencia de sequías y lluvias y su impacto en la sociedad.

## ANTECEDENTES

### Los bosques de pinos piñoneros en México

Los pinos piñoneros son de gran relevancia para las zonas áridas del país, ya que en ocasiones constituyen el único recurso forestal disponible (Rosas *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2019). Por otro lado, también son reconocidos por su amplia adaptabilidad y resistencia a condiciones adversas, lo que les confiere un estatus de especies con gran potencial para la restauración ecológica (Ríos *et al.*, 2008; Pérez *et al.*, 2019). No obstante, diversos bosques han presentado una disminución del área que cubren, desapareciendo o cambiando su composición (Gernandt y Pérez, 2014; Pérez *et al.*, 2019).

Actualmente, seis especies endémicas de pinos piñoneros están en la lista de especies en riesgo de la NOM-059-SEMARNAT-2010 designadas en la categoría en Peligro de Extinción o Sujeta a Protección Especial (SEMARNAT, 2010).

### *Pinus cembroides*

El pino piñonero *Pinus cembroides* es una especie nativa de México, tiene en promedio 7 m de altura, y un diámetro normal de 17 a 30 cm, pudiendo alcanzar hasta 15 m de altura y un diámetro normal mayor a 30 cm (Fig. 1). Las ramas son delgadas y están colocadas irregularmente en el tallo, comenzando casi siempre desde la base. La corteza del árbol es delgada, teniendo un grosor máximo de 1.3 cm. La copa del árbol es piramidal en individuos jóvenes, y redondeada en los árboles maduros. Las hojas perennes tienen forma de acícula de color verde oscuro, las cuales están en grupos de tres con una longitud de 2 a 5 cm. Los conos tienen forma globosa de una longitud aproximada de 2 a 5 cm, los cuales producen semillas sin ala y con cáscara gruesa de 1.3 a 1.9 cm de longitud (Pavek, 1994). Presenta amplia distribución en el país. Su área de distribución abarca desde el oeste de Estados Unidos de América hasta México, donde está presente en Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo (Perry, 1991), entre 18° y 32° de latitud norte, entre 1500 y 2550 msnm

(Francoise, 1977; Romero *et al.*, 1996). Se desarrolla en climas del tipo (BSk) seco templado, hasta climas del tipo (Cwb) templado subhúmedo, donde la temperatura anual promedio es de 18 °C con oscilaciones entre 7 y 40 °C, y la precipitación anual está entre 365 y 450 mm (Vázquez *et al.*, 1999). Prefiere los suelos de neutros a alcalinos con un pH de 4 a 8, creciendo típicamente en suelos someros, con profundidad menor a 50 cm, suelos pobres, calcáreos de origen *in situ*, con un alto contenido de yeso, delgados en lomeríos y aluviones en los valles, con estructura granular y textura arcillosa (Francoise, 1977; Flores, 1985).



**Figura 1.** *Pinus cembroides* ubicado en el municipio de Miquihuana, Tamaulipas.

### ***Pinus nelsonii***

Por su parte, *Pinus nelsonii* tiene una distribución restringida (Farjon y Styles 1997; Estrada *et al.*, 2014) con estatus de protección y amenazada de acuerdo con la NOM-059- SEMARNAT-2010 (DOF, 2010). Es un árbol perennifolio pequeño, de 5 a 10 m de alto y 10 a 30 cm de diámetro (Fig. 2) En árboles maduros la copa es baja, redondeada y con apariencia arbustiva; en árboles jóvenes todas las ramas crecen hacia arriba, dando una forma piramidal (CONAFOR). La corteza es lisa, gris mate en tallos de hasta 15 cm de diámetro, oscureciéndose y fisurada longitudinalmente en tallos más grandes. La copa es redondeada, densa, con ramas curvadas hacia arriba en la parte superior de 2-3

m. Follaje amarillo verdoso, en fascículos de 3-4, pero las hojas individuales en cada fascículo permanecen firmemente 'comprimidas' por sus márgenes aserrados ([Bailey y Hawksworth, 1988](#)). Su distribución se restringe en los estados del noreste de México como sigue: San Lorenzo, Aramberri, Galeana y Doctor Arroyo en Nuevo León, Sierra del Carmen en Coahuila, Las Tablas en San Luis Potosí y Miquihuana, Palmillas y Tula en Tamaulipas (Perry, 1991), entre 22° latitud norte y 99° longitud oeste, se distribuye entre 1600 y 2800 msnm, en donde la temperatura anual promedio es de 19 °C con oscilaciones entre -5 y 45 °C (CONAFOR), en zonas con precipitación anual entre 300 y 600 mm, y se ubica en pies de montaña de ambientes áridos a semiáridos (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997). Estrada *et al.* (2014), reportan que se distribuye en ecotonos entre matorrales, chaparrales de encino y bosques de *P. cembroides*.



**Figura 2.** *Pinus nelsonii* ubicado en el municipio de Miquihuana, Tamaulipas.

### **Dendrocronología**

La ciencia que estudia la secuencia cronológica del crecimiento anual de los árboles es la Dendrocronología, palabra que deriva de los vocablos griegos *dendro* (árbol), *cronos* (tiempo) y *logos* (conocimiento o estudio de). A través de

las técnicas dendrocronológicas se desarrollan cronologías de anillos de árboles que, al fecharse, medirse, promediarse y estandarizarse, son de utilidad práctica para la reconstrucción de variables climáticas (Fritts, 1976).

El análisis de los anillos de crecimiento de los árboles centenarios mediante estudios dendrocronológicos posee varias aplicaciones en la investigación científica, tanto básica como aplicada. Estudios se han enfocado a la reconstrucción del clima sobre todo en lugares en donde existe escasa información climática y en sitios en donde se requiere la reconstrucción del clima del pasado. Villalba *et al.* (1998), realizaron la reconstrucción de la precipitación y temperatura para entender las variaciones de clima del pasado en la región subtropical de América del Sur. Con información dendrocronológica se han identificado y analizado periodos históricos de sequías o periodos muy húmedos por medio de la reconstrucción de la precipitación (Díaz *et al.*, 2002) y de escurrimientos hidrológicos (Burn *et al.*, 2004; González y Valdés, 2003).

### **Reconstrucciones dendroclimáticas con pinos piñoneros**

Anteriormente se han realizado investigaciones dendroclimáticas con pinos piñoneros en diferentes estados del país demostrando el potencial que estos tienen para este tipo de estudios.

Villanueva *et al.* (2009a) en un estudio realizado sobre variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila, mencionan que *P. cembroides* se desarrolla en sitios secos, sujetos a baja disponibilidad de agua; de esta manera la especie es más sensible a cambios en precipitación, que se reflejan en una mayor variabilidad interanual en sus índices dendrocronológicos.

Suzán y Gonzáles (1984) y Suzán (1985), investigaron la respuesta climática de cronologías cortas de *P. nelsonii* Shaw en la región de Miquihuana Tamaulipas. Villanueva *et al.*, (2018) y Carlón *et al.*, (2018), mencionan que *Pinus cembroides* presenta un excelente potencial dendrocronológico. Por ejemplo, el estudio de Carlón *et al.*, (2018) se realizó sobre la base de parámetros estadísticos y su

respuesta a las variables climáticas, en particular precipitación estacional invierno-primavera; dicho estudio se desarrolló en la Sierra del Cubo, Guanajuato.

Constante *et al.* (2019), llevaron a cabo un estudio de dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila, en el cual determinaron que dicha especie mostró un excelente potencial para estudios dendrocronológicos gracias a su sensibilidad climática.

### **Variabilidad hidroclimática en México y la influencia del Niño-Oscilación del Sur**

Los episodios Cálido/El Niño y Frío/La Niña forman parte de un ciclo conocido como ENSO. El Niño y La Niña son los ejemplos más evidentes de la variabilidad climática global siendo parte fundamental de un vasto y complejo sistema de fluctuaciones climáticas, con un intervalo medio de duración de cuatro años y un rango de 2 a 7 años (Trenberth, 1997; Cerano *et al.*, 2011b).

El conocimiento de la variabilidad hidroclimática es una parte fundamental para el desarrollo de una planeación adecuada de los recursos hidrológicos en una región determinada. En México, la variabilidad que el clima presenta año con año está en gran medida determinado por la ocurrencia del fenómeno ENSO (Magaña *et al.*, 1999).

Estudios dendrocronológicos han demostrado que la variabilidad de la precipitación en el norte de México y suroeste de los Estados Unidos de América está ligada de manera significativa con el fenómeno de ENSO (Stahle y Cleaveland, 1993; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2007, 2009; Cerano *et al.*, 2009, 2011b).

En el norte de México, ENSO en su fase cálida (El Niño) se asocia a condiciones de alta precipitación en el invierno; mientras que ENSO en su fase fría (La Niña)

tiende a favorecer la presencia de inviernos más secos, propiciando fuertes sequías (Magaña *et al.*, 2003; Caso *et al.*, 2007; Cerano *et al.*, 2011b)

### **Índices de sequía**

El Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) es una variante del ampliamente difundido Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) que tiene un mayor potencial como índice de sequías al ser sensitivo al cambio climático, debido a que usa una medida más real de la disponibilidad de agua, el balance climático. Esta medida se evalúa con la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial mensuales (Campos-Aranda, 2018a). De los índices que actualmente se utilizan para vigilar la sequía, el SPI es uno de los más utilizados en más de 70 países. Este índice creado por McKee en 1993 destaca por la sencillez, facilidad de cálculo y su significado desde el punto de vista estadístico, además de la relación de los déficits de precipitación con los diferentes impactos en las aguas subterráneas, el almacenamiento de agua en reservorios, en la humedad del suelo, los bancos de nieve y los caudales fluviales que lo hacen altamente aceptado en los estudios de la sequía (OMM, 2012; CONAGUA, 2021)

El primer índice de sequías meteorológicas de uso extensivo tanto en USA, como en otros países fue el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés), expuesto a mediados de los años sesenta (Palmer, 1965), por lo cual tiene más de 50 años. Es un índice multivariado, ya que aplica un balance de humedad en el suelo (Hao y Singh, 2015), que emplea la precipitación y evapotranspiración potencial mensuales, pero está basado en varias reglas empíricas, como lo demostró (Alley, 1984), y es bastante sensitivo al periodo usado para su calibración de coeficientes, como lo mostró Karl, (1986); sin embargo, no permite el uso de múltiples escalas de tiempo o duraciones de sequía (Campos-Aranda, 2018b).

## **Respuesta hidroclimática de los pinos piñoneros y otras coníferas en el noreste de México**

En el año 2018 Villanueva y colaboradores generaron una red dendrocronológica utilizando las especies *Pinus culminicola*, *Pinus hartwegii*, *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus greggii*, las cuales se encuentran en El Cerro Potosí, Nuevo León; determinaron que los parámetros dendrocronológicos de dichas especies en las diversas altitudes del Cerro Potosí confirman su sensibilidad climática 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. El año siguiente G. Gutiérrez-García y M. Ricker realizaron un estudio con *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pinus teocote* presentes en la sierra de San Antonio Peña Nevada, Nuevo León. Expresaron que los parámetros estadísticos de las cronologías en las 4 especies indican potencial para realizar estudios dendrocronológicos subsecuentes. Los resultados del presente estudio mostraron que el crecimiento radial del tronco de las especies analizadas está fuertemente influenciado por el clima, también se correlacionaron de manera positiva con el crecimiento de otras coníferas en el norte del país, el clima del noreste de México y con fenómenos climatológicos a gran escala, como ENSO y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés).

## **Impacto de las sequías en México**

La sequía es un peligro natural insidioso resultante de unos niveles de precipitaciones por debajo de lo que se considera normal. Cuando este fenómeno se prolonga durante una estación o por un período de tiempo mayor, la precipitación es insuficiente para responder a las demandas de la sociedad y del medio ambiente. La sequía debe considerarse como un estado relativo y no absoluto. Asimismo, existen muchos métodos diferentes para vigilar la sequía. Por la extensión a la que afectan, las sequías son regionales, y cada región posee características climáticas específicas (OMM, 2012).

Las sequías son episodios en donde llueve en general por debajo del promedio durante más de dos años consecutivos y trae consecuencias económicas desastrosas, sobre todo en regiones áridas y semiáridas. La dendrocronología se ha utilizado para encontrar frecuencias de sequías severas importantes en algunos países. Estudios dendrocronológicos indican que las sequías más severas a través de la historia en el norte de México y sur de Estados Unidos se presentaron durante los años 1700s (Stahle y Cleaveland, 1994). En diferentes países se reportan estudios de sequías severas a finales del siglo XIX y principios del XX (Liang *et al.*, 2003; Návar, 2008), 1930s, 1950s (Návar, 2001; Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2000b; Návar, 2008). Para algunas regiones de México, se reportan sequías importantes en los años 1742, 1800s 1950s, 1974, 1980 y 1990s (González *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2002; Návar 2001, 2004, 2008).

Algunos estudios dendroclimáticos desarrollados para el centro (Therrell *et al.*, 2006) y norte de México (Cerano *et al.*, 2011a; Constante *et al.*, 2009) indicaron severidad de sequías en el mismo periodo, evidenciando un fenómeno climático generalizado. La sequía del periodo 1941-1963 ha sido considerada la más crítica del siglo XX en el país por su severidad e impacto negativo (social y económico), ya que provocó hambruna generalizada y emigración del campo a la ciudad, incluso hacia Estados Unidos de América (Florescano, 1980; García *et al.*, 2003). La sequía destacó por su extensión, pues se documentó en gran parte de la República Mexicana (Cleaveland *et al.*, 2003; Díaz *et al.*, 2002; Therrell *et al.*, 2006; Villanueva *et al.*, 2009a; Cerano *et al.*, 2011b), con lo cual se evidencia que los sucesos de variación extrema del clima, en particular de la precipitación, han estado ligados a diversos acontecimientos históricos que han dado validez desde entonces a las reconstrucciones dendroclimáticas desarrolladas en México.

En estudios eco–fisiológicos y de productividad se utiliza la dendrocronología para asociar el crecimiento a factores de precipitación y temperatura. Se reconoce que, entre los factores climáticos, la precipitación invernal es el principal factor ambiental que influye de manera directa en el crecimiento radial de la vegetación en la región norte de México, independientemente de las condiciones

locales (Unselde *et al.*, 2004; Basin, 2006; Díaz *et al.*, 2002; González *et al.*, 2005; Stahle y Cleaveland, 1994). Los factores que explican la presencia de sequías, de periodos apropiados para el crecimiento de los árboles, entre otros, se han asociado a eventos climáticos de escala sinóptica, los cuales fueron registrados en el pasado, y hoy pueden ayudar a explicar las variaciones en los parámetros descritos.

De acuerdo con Stahle *et al.* (2000), una de las fluctuaciones registradas es la mega sequía del siglo XVI que afectó gran parte de Norte América. En el registro histórico de este tiempo se documentan una serie de fracasos en los cultivos y aumentos radicales en los precios. Durante esta gran sequía ocurrieron dos de las epidemias más graves en la historia de México (1546 y 1576) (Gibson, 1964; Marr y Kiracofe, 2000; Acuña-Soto *et al.*, 2002). Otra sequía registrada que duró varios años junto con una severa helada en agosto en 1785 dio lugar a una terrible hambruna en 1786, a la cual se le denominó “El Año del Hambre” (Florescano, 1986; Swan, 1981). Esta hambruna aparentemente también condujo a un brote de epidemia que mató a cerca de 300 mil personas (Florescano, 1986). Esta extraordinaria hambruna y epidemia tuvieron un efecto paralizante en la economía y la sociedad de la Nueva España. La sequía de 1792-1810 ocasionó carencia de granos básicos y epidemias en la población (Florescano, 1980; García *et al.*, 2003).

## JUSTIFICACIÓN

En México, la información de las estaciones climatológicas disponible es reducida (de aproximadamente 70 años), lo cual limita conocer el comportamiento climático histórico (Cerano *et al.*, 2011a; Díaz *et al.*, 2002; Villanueva *et al.*, 2009a). Por tal motivo, el análisis histórico de la variabilidad climática es fundamental para conocer su impacto en aspectos económico-sociales, disponibilidad de agua, determinar las fluctuaciones climáticas de alta y baja frecuencia ocurridas en el pasado, causas de su variabilidad, así como analizar el presente e inferir posibles tendencias climáticas futuras. Algunas de las cronologías producidas en la última década para el norte y centro de México se han utilizado para realizar reconstrucciones históricas de precipitación (Villanueva *et al.*, 2007a).

Conforme a lo anterior, la presente investigación se llevó a cabo para determinar el potencial dendroclimático de *Pinus cembroides* y *P. nelsonii*, consecuentemente realizar una reconstrucción climática para compararla con los datos climáticos históricos disponibles y evaluar sus impactos socioeconómicos en la región de Miquihuana, Tamaulipas.

## **HIPÓTESIS**

Las cronologías de ancho de anillo de pinos piñoneros junto con los registros climáticos permiten integrar un modelo con fines de reconstrucción de la precipitación que posibilita examinar el comportamiento hidroclimático a largo plazo de las lluvias estacionales en Miquihuana, Tamaulipas, para determinar la frecuencia de sequías y lluvias extremas y su impacto en la sociedad.

## OBJETIVOS

### General:

Evaluar la respuesta hidroclimática de los pinos piñoneros en Miquihuana, Tamaulipas, a partir de sus anillos de crecimiento anuales.

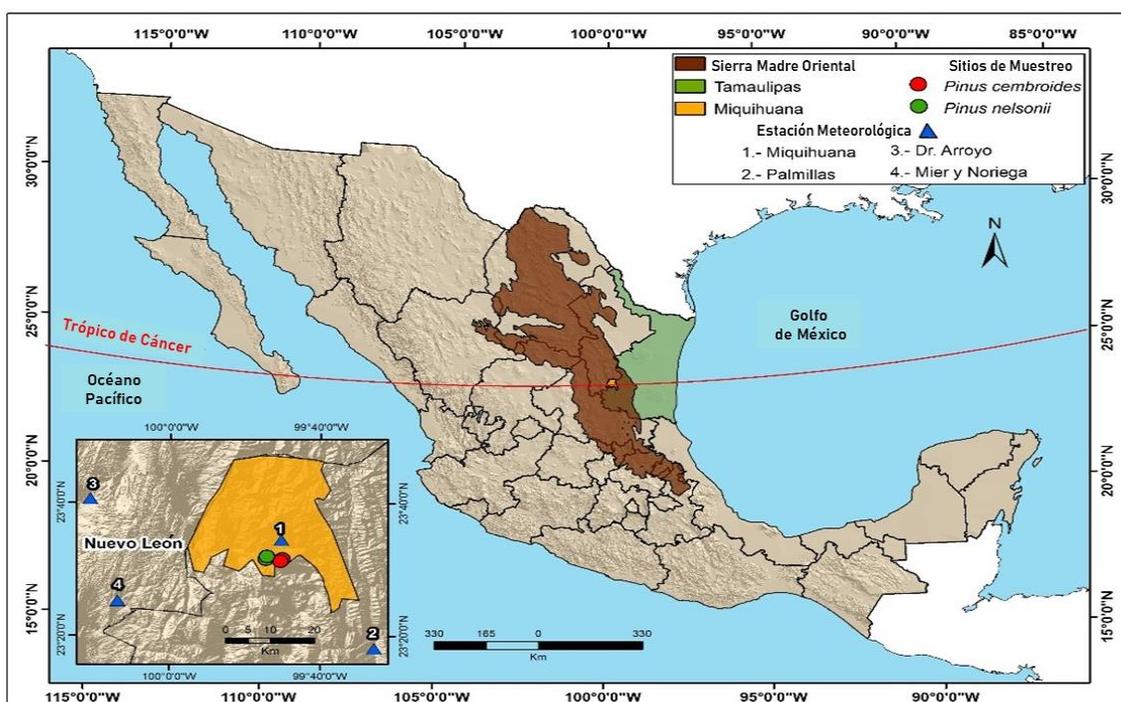
### Específicos:

1. Determinar el período estacional donde la precipitación acumulada ha tenido una influencia significativa en el crecimiento radial de *Pinus cembroides* y *P. nelsonii*.
2. Desarrollar una reconstrucción estacional de la precipitación para determinar su variabilidad interanual y multianual.
3. Analizar la influencia de la variabilidad hidroclimática regional.
4. Validar el impacto de los eventos hidroclimáticos reconstruidos sobre la base de archivos históricos, reconstrucciones dendroclimáticas e índices de sequía reconstruidos.

# MATERIALES Y MÉTODOS

## Descripción del área de estudio

El municipio de Miquihuana (23° 47'- 23° 24' N; 99° 58'- 99° 35' O; 1300-3600 msnm) se encuentra en el estado de Tamaulipas en la Sierra Madre Oriental de México; colinda al norte con el estado de Nuevo León; al este con el municipio de Jaumave; al sur con los municipios de Palmillas y Bustamante; y al oeste con el estado de Nuevo León (Fig. 3, INEGI 2020).



**Figura 3.** Ubicación del área de estudio en el subtrópico nororiental mexicano. Están representados los lugares de muestreo y las estaciones meteorológicas.

El estado de Tamaulipas constituye la distribución extremo noreste de los bosques naturales de pino piñonero en México, donde se encuentran en las estribaciones semiáridas de la Sierra Madre Oriental, en elevaciones entre 1700 y 2300 msnm. Esta comunidad habita las zonas de transición entre el matorral xerófilo (Rzedowski, 2006) y los bosques de coníferas ubicados en elevaciones más altas y condiciones más húmedas. Dos especies de pino piñonero (*Pinus*

*cembroides* y *P. nelsonii*) coexisten en esta comunidad. *P. cembroides* pertenece al subgénero *Strobus*; sección *Parrya*; subsección *Cembroides* y es abundante en la zona. *P. nelsonii* pertenece al subgénero *Strobus*; sección *Parrya*; subsección *Nelsoniae*. Esta especie tiene una distribución restringida y se considera en peligro de extinción (Gernandt *et al.*, 2005; Farjon, 2013; IUCN, 2013; DOF, 2010).

### **Clima, suelo y vegetación asociada**

El clima dominante en el área de estudio se clasifica como semiárido con temperaturas extremas (García 1986, García, 2004). Datos climáticos de la estación meteorológica de Miquihuana (23 ° 34 ' 26 " N - 99 ° 45 '11"; 1770 msnm; 1963-2019), indican una precipitación media anual de 401.06 mm presentándose principalmente en la temporada de verano (mayo-septiembre, 272.29 mm). Una modesta cantidad de lluvia se produce en la temporada de invierno (diciembre-febrero, 42.25 mm) donde los frentes fríos “nortes” tienen un papel importante. La temperatura media anual es de 17.9 °C con una temperatura máxima de 41.0 °C en mayo y mínima de -9.0 °C en febrero (CONAGUA, 2020a).

Las calizas derivadas de rocas sedimentarias de origen marino dominan los suelos. El contenido de materia orgánica es bajo y el suelo es poco profundo con un pH entre 6.8 y 8.0 (González, 2004). El uso potencial del suelo y la vegetación está representado por: agricultura 8.4%, zona urbana 0.2%, bosque 62.4%, matorral 27% y pastizal 2% (INEGI, 2009).

Las especies de plantas asociadas están dominadas por *Juniperus flaccida*, *J. monosperma*, *Quercus pringlei*, *Q. microphylla*, *Yucca filifera*, *Y. carnerosana*, *Dasyllirion miquihuanensis*, *Agave lechuguilla*, y *Hechtia glomerata* (González, 2004; Rzedowski, 2006). Los pinos piñoneros en Miquihuana, como en otras regiones de México, han suministrado alimentos, leña, madera de construcción y productos medicinales a la población humana local por siglos, y los piñones del pino también son de importancia comercial como fuente de alimento y constituyen un ingreso para las comunidades rurales (Fogg, 1966; Passini, 1982).

## Trabajo en campo

El procedimiento de muestreo se realizó en julio de 2019 en una comunidad forestal de *Pinus cembroides* y *P. nelsonii* ubicada en las serranías de Miquihuana. Se seleccionaron especímenes de pinos, particularmente aquellos que prosperan en suelos poco profundos con una alta dependencia de la lluvia para el crecimiento y con una perturbación mínima de origen antropogénico (Fritts, 2001). El muestreo consistió en recolectar dos o tres núcleos de crecimiento por árbol a diferentes alturas del tronco con taladro de Pressler® Haglöf, con un diámetro de 5.1 mm y una longitud de 51 cm. Dicho trabajo se llevó a cabo perpendicular a la pendiente para evitar problemas de liberación o compresión de la madera en el tronco (Fig. 4). Las muestras se rotularon para identificar el sitio, número de árbol, especie y referencia geográfica, así como el diámetro normal, la altura y la altitud en la que se encontraba (Fig. 5).



**Figura 4.** Proceso de extracción de virutas



**Figura 5.** Rotulación de muestras para facilitar su procesamiento

### **Procesamiento de las muestras**

Se obtuvieron 170 virutas de 56 árboles para *Pinus cembroides* y 144 virutas de 51 árboles para *P. nelsonii*.

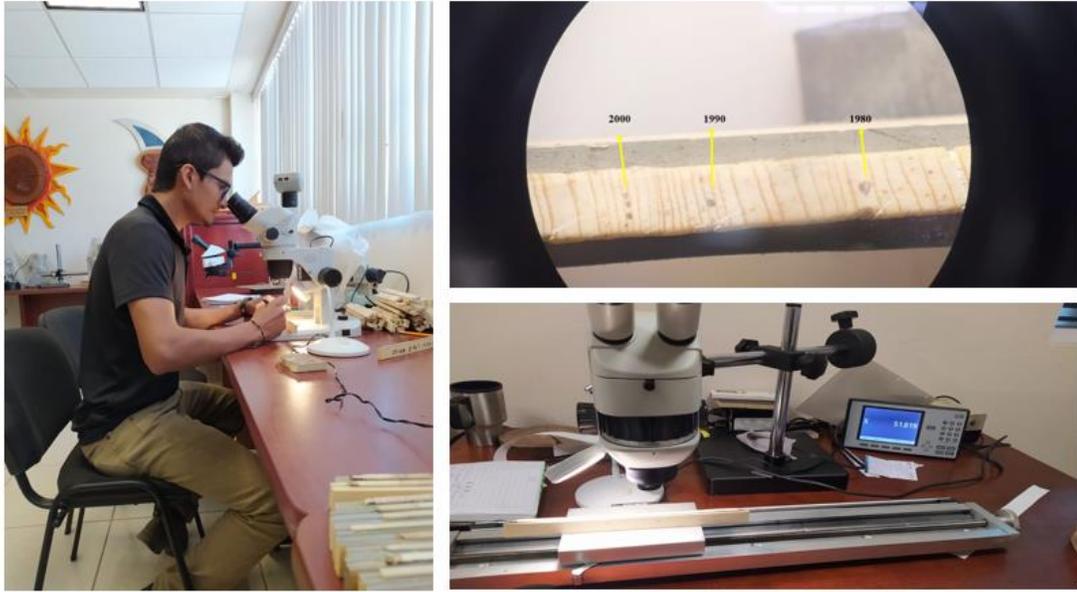
Las muestras extraídas se procesaron de acuerdo con técnicas estándar recomendadas por Stokes y Smilley, (1996). Finalizado el proceso de montaje se afinaron con distintos grados de lija de 120 a 1500 para lograr una mejor visibilidad de los anillos de crecimiento (Villanueva *et al.*, 2018) (Fig. 6).



**Figura 6.** Procesamiento de las muestras llevado a cabo en el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP CENID RASPA Gómez Palacio, Dgo.

Con un estereoscopio de alta resolución se identificó el crecimiento anual de los árboles y se fecharon los anillos de crecimiento al año exacto de su formación.

Se midió el ancho del anillo total de cada muestra (madera temprana y madera tardía) con una precisión de 0.001 mm, en un Sistema Velmex (platina de medición y micrómetro, asociados a un microscopio y una computadora) y a través del programa de medición J2X (Robinson y Evans, 1980) (Fig. 7).



**Figura 7.** Medición del ancho del anillo total de cada muestra

El cofechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo, se verificó con el programa COFECHA el cual, a través de los archivos de medición de cada serie de crecimiento, se comparó estadísticamente el fechado de cada muestra, al correlacionar sucesivamente segmentos de 50 años con traslapes de 25 (Holmes, 1983). Sólo se seleccionaron series con un coeficiente de correlación  $> 0.328$  ( $p < 0.01$ ) para desarrollar una cronología de ancho de anillo (Holmes 1983, Grissino-Mayer, 2001).

### **Desarrollo de la cronología**

El procedimiento de estandarización de los anchos de anillo de las series de *Pinus cembroides* y *P. nelsonii* se completó con el programa ARSTAN (Cook y Holmes 1986; Cook, 1987). Este procedimiento permite la homogeneización de la varianza entre las series y la transformación de los anchos de anillo en índices de ancho de anillo adimensionales, eliminando la influencia de perturbaciones y cambios en el crecimiento de los árboles asociados con la edad y las limitaciones geométricas; la estandarización preserva la variabilidad de baja frecuencia de origen climático (Fritts, 2001). El programa ARSTAN crea tres versiones de la cronología: Estándar, Residual y Arstan. Debido a que la versión estándar

muestra una buena respuesta a los datos climáticos, esta fue la única utilizada para el análisis (Speer, 2010).

La sensibilidad climática de las cronologías se analizó teniendo en cuenta varios parámetros como la correlación entre series (es decir, una medida de la fuerza de la señal climática común a nivel de rodal registrada para un sitio), la desviación estándar, la sensibilidad media (es decir, el cambio relativo en la anchura de los anillos de un año a otro), la autocorrelación de primer orden (es decir, influencias en las que el crecimiento del año anterior puede ejercer fuerza sobre el crecimiento del año siguiente), relación señal-ruido (es decir, una relación entre la señal climática y otros factores no relacionados), y  $R_{bar}$  (es decir, una estadística utilizada para examinar la fuerza de la señal a lo largo de la cronología) (Speer, 2010). Por último, se utilizó la señal expresada por la población (EPS, por sus siglas en inglés), una medida de la variabilidad común en la cronología, que depende de la profundidad de la muestra, con fines de reconstrucción climática (Wigley *et al.*, 1984).

Las cronologías de ancho de anillos de *P. cembroides* y *P. nelsonii* se desarrollaron por separado, pero dada la correlación alta y significativa ( $r = 0.74$ ,  $p < 0.001$ ), se combinaron en una única cronología de ancho de anillos, lo que dio lugar a una mayor profundidad de la muestra y a la ampliación de la longitud de la serie final de ancho de anillos.

### **Respuesta hidroclimática y reconstrucción de precipitación**

Para determinar la respuesta de los pinos piñoneros a la precipitación, se eligieron las estaciones meteorológicas más cercanas al sitio de Miquihuana y las que tienen los registros climáticos más largos y completos (CONAGUA, 2020a; CONAGUA, 2020b) (Fig. 3, Tab. 1). Estas estaciones cuentan con un periodo de 55 años (1964-2018) de datos pluviométricos confiables, por lo que todos los datos fueron promediados a nivel mensual para obtener información representativa de la precipitación regional.

**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas cercanas a los lugares de muestreo de pino piñonero en Miquihuana.

Estado	Estación meteorológica	Latitud (N)	Longitud (W)	Elevación (msnm)	Periodo (años)	Distancia al sitio de estudio (km)
Tamaulipas	Miquihuana	23° 34' 26"	99° 45' 11"	1770	1963-2018	5.5
	Palmillas	23° 18' 06.33"	99° 32' 51.14"	1550	1961-2018	33.7
Nuevo León	Dr. Arroyo	23° 40' 34.70"	100° 10' 36.50"	1731	1942-2018	44.6
	Mier y Noriega	23° 25' 16.22"	100° 06' 55.59"	1665	1943-2018	37.0

La relación entre la cronología del pino piñonero y los datos de precipitación media regional se evaluó con la correlación de Pearson y el análisis de la función de respuesta utilizando el paquete bootRes (Zang y Biondi, 2013). Considerando que las condiciones climáticas dominantes previas a la estación de crecimiento pueden tener una influencia significativa en el crecimiento radial del año en curso (Cleaveland *et al.*, 2003), se desarrollaron análisis de correlación y de función de respuesta utilizando los datos de precipitación durante 18 meses consecutivos (6 meses previos al año de crecimiento y 12 meses durante el año de crecimiento).

La precipitación acumulada del periodo estacional con asociación significativa ( $p < 0.01$ ) se correlacionó con la cronología estándar de la anchura de los anillos, y se generó un modelo de regresión lineal con fines de reconstrucción. El modelo de regresión se calibró utilizando la mitad de los registros climáticos, y se verificó con la otra mitad, utilizando la subrutina Verify de la Biblioteca del Programa de Dendrocronología de la Universidad de Arizona (Holmes, 2001). Así, se obtuvo una ecuación de transferencia para desarrollar la reconstrucción de la precipitación estacional para la longitud total de la cronología con un tamaño de muestra alto. Se ajustó una función spline de 10 años a la reconstrucción para resaltar los eventos de baja frecuencia (períodos secos o húmedos) (Esper *et al.*, 2003). Los valores de precipitación por debajo y por encima de la media se consideraron eventos secos y húmedos, respectivamente. Del mismo modo, cuando esta deficiencia o aumento de la disponibilidad de agua fue lo

suficientemente grande o prolongada como para afectar a las actividades humanas y a los ecosistemas, esos eventos se consideraron sequías o lluvias extremas, respectivamente (Wilhite, 2000).

Para determinar la presencia de picos significativos en la reconstrucción se utilizó un Análisis de Espectro de Potencia con un umbral de nivel de confianza del 95% (Bunn *et al.*, 2021). Para establecer los periodos en los que se produjeron esos picos significativos a lo largo de la serie, se utilizó un análisis de Ondeleta (Gouhier *et al.*, 2018).

### **Asociación con ENSO**

La influencia de los modos circulatorios a gran escala se determinó comparando los índices de las series dendrocronológicas con los índices de ENSO, por ejemplo, el Índice de Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en inglés), una serie temporal utilizada para caracterizar los patrones de Presión del Nivel del Mar (SLP por sus siglas en inglés) a gran escala en el Pacífico tropical. Se utilizaron datos medios mensuales de SLP de Tahití y Darwin. El SOI está vinculado a la variabilidad de la Temperatura Superficial del Mar (SST por sus siglas en inglés) tropical a gran escala y, como tal, es una medida de la Oscilación del Sur. Los periodos prolongados de SOI negativo se corresponden con eventos de El Niño, caracterizados por SST cálidas en el Pacífico tropical oriental y central (Ropelewski y Jones, 1987). Se utilizaron los valores mensuales estandarizados del SOI para el periodo 1866-2018 (<https://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/SOI.signal.txt> -NCAR 2021) para contrastarlos con las series dendrocronológicas del pino piñonero y así determinar su influencia en el crecimiento.

El Índice Multivariado de ENSO ampliado (MEI-ext, por sus siglas en inglés) capta una representación más holística de las anomalías atmosféricas y oceánicas que

se producen durante los eventos ENSO que las variables únicas, como los índices Niño SST. El MEI-ext se basa en campos reconstruidos de SLP y SST para el periodo 1871-2005 (Wolter y Timlin, 2011). Por lo tanto, se pudo establecer una relación entre el periodo común del MEI-ext (<https://psl.noaa.gov/enso/mei.ext/table.ext.html>; NOAA 2021) y la cronología de los anillos de los árboles.

### **Asociación con índices de sequía**

Se utilizaron los índices de sequía para determinar si la cronología de la anchura de los anillos de las dos especies de pino piñonero constituye una aproximación a la intensidad y duración de las sequías históricas registradas en la región.

Se utilizó el SPEI mensual de 1901-2018 (<https://spei.csic.es/database.html>; SPEI 2021) para analizar la influencia de las condiciones de sequía en periodos mensuales y estacionales en el desarrollo del crecimiento radial anual. El SPEI tiene en cuenta tanto la precipitación como la evapotranspiración potencial para determinar la sequía (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

El Índice de Severidad de la Sequía de Palmer auto calibrado (sc-PDSI, por sus siglas en inglés) reconstruido para junio, julio y agosto (<http://drought.memphis.edu/MXDA/>; Atlas Mexicano de la Sequía [MXDA] 2021) se relacionó con los índices de las series dendrocronológicas. El MXDA se desarrolló a partir de una extensa red de cronologías de anillos de árboles en México y países vecinos, que son sensibles al sc-PDSI de junio, julio y agosto, y proporciona información útil sobre la variabilidad espacial de la humedad del suelo sobre México desde 1400 hasta 2012 (Stahle *et al.*, 2016).

El SPI reconstruido (<http://drought.memphis.edu/NASPA/>; North American Seasonal Precipitation Atlas [NASPA] 2021) también se asoció con el crecimiento radial de los pinos piñoneros y se utilizó para analizar el comportamiento de las sequías y los episodios húmedos. El SPI reconstruido se desarrolló a partir de cronologías de anillos de árboles de Canadá (al sur de 60° N), Estados Unidos,

México y el oeste de Guatemala y cubre los últimos 600 años del NASPA (Stahle *et al.*, 2020).

### **Validación de la reconstrucción de la precipitación**

Los períodos reconstruidos con sequías y lluvias extremas se verificaron con archivos históricos nacionales y regionales, así como con estudios dendroclimatológicos previos desarrollados en el norte y centro de México. Finalmente, se utilizó el índice de sequía reconstruido con las mejores correlaciones observadas para producir mapas que muestren las condiciones climáticas a nivel nacional y verifiquen los eventos hidroclimáticos reconstruidos más representativos.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

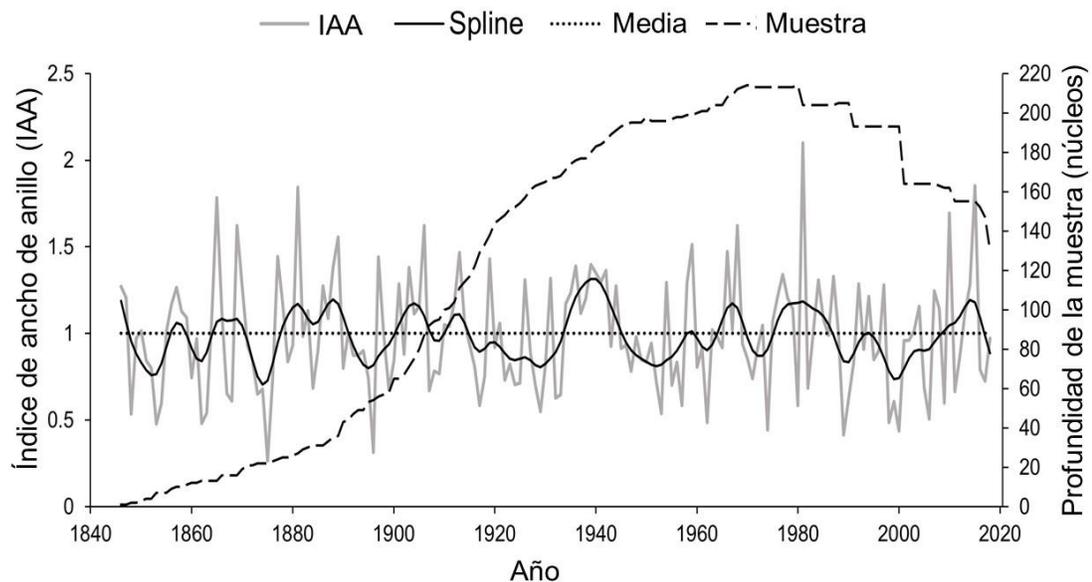
### **Cronología de anillos de árboles**

Los parámetros dendrocronológicos de las series de anchura de anillos muestran potencial para desarrollar de forma fiable reconstrucciones hidroclimáticas. Los valores de intercorrelación de las series fueron similares entre las cronologías y son mayores que el valor de correlación (0.328,  $p < 0.01$ ) requerido por COFECHA para un fechado correcto (Holmes, 1983). La respuesta común entre las anchuras de los anillos de los árboles de las dos especies estudiadas también se ve apoyada por los valores de la sensibilidad media. Otros parámetros como la desviación estándar, la autocorrelación de primer orden, la relación señal-ruido, y  $R_{bar}$  son indicios de una mayor variabilidad interanual y sensibilidad de *Pinus cembroides*, lo que se refleja también en un menor número de muestras necesarias para alcanzar un  $EPS > 0.85$  para esta especie, en comparación con *P. nelsonii*. La cronología combinada (*P. cembroides* + *P. nelsonii*) conservó la sensibilidad climática de la serie original de anchura de anillos de los árboles y permitió aumentar el tamaño de la muestra (Tab. 2). La cronología combinada del ancho de anillos de los pinos piñoneros para Miquihuana, Tamaulipas, cubre el periodo 1846-2018 (173 años), donde un  $EPS > 0.85$  comenzó en 1853. Por lo

tanto, para fines de reconstrucción climática, se consideró el periodo 1853-2018 (166 años) (Fig. 8).

**Tabla 2.** Parámetros dendrocronológicos de las series de núcleos de árboles de pino piñonero en Miquihuana, Tamaulipas, México. (1): Intercorrelación de series; (2): Desviación estándar; (3): Sensibilidad media; (4): Autocorrelación de primer orden; (5): Relación señal-ruido; (6): Rbar (intensidad de la señal); (7): Señal poblacional expresada; (\*): año a partir del cual el tamaño de la muestra es suficientemente robusta para las reconstrucciones climáticas.

Especies	Inter. Corr. Series <sup>1</sup>	Desv. Estandar <sup>2</sup>	Sens. Med <sup>3</sup>	Autocorrelación de 1er orden <sup>4</sup>	Señal/Ruido <sup>5</sup>	Rbar <sup>6</sup>	EPS <sup>7</sup> > 0.85 (Núcleos/árboles)	Longitud de cronología (Núcleos/árboles)
<i>Pinus cembroides</i>	0.73	0.87	0.42	0.55	65.25	0.53	*1890-2018 *(5/5)	1882-2018 (133/52)
<i>Pinus nelsonii</i>	0.75	0.51	0.48	0.29	42.15	0.53	*1853-2018 *(7/6)	1846-2018 (85/43)
<i>P. cembroides</i> + <i>P. nelsonii</i>	0.71	0.73	0.44	0.45	73.19	0.50	*1853-2018 *(7/6)	1846-2018 (218/95)

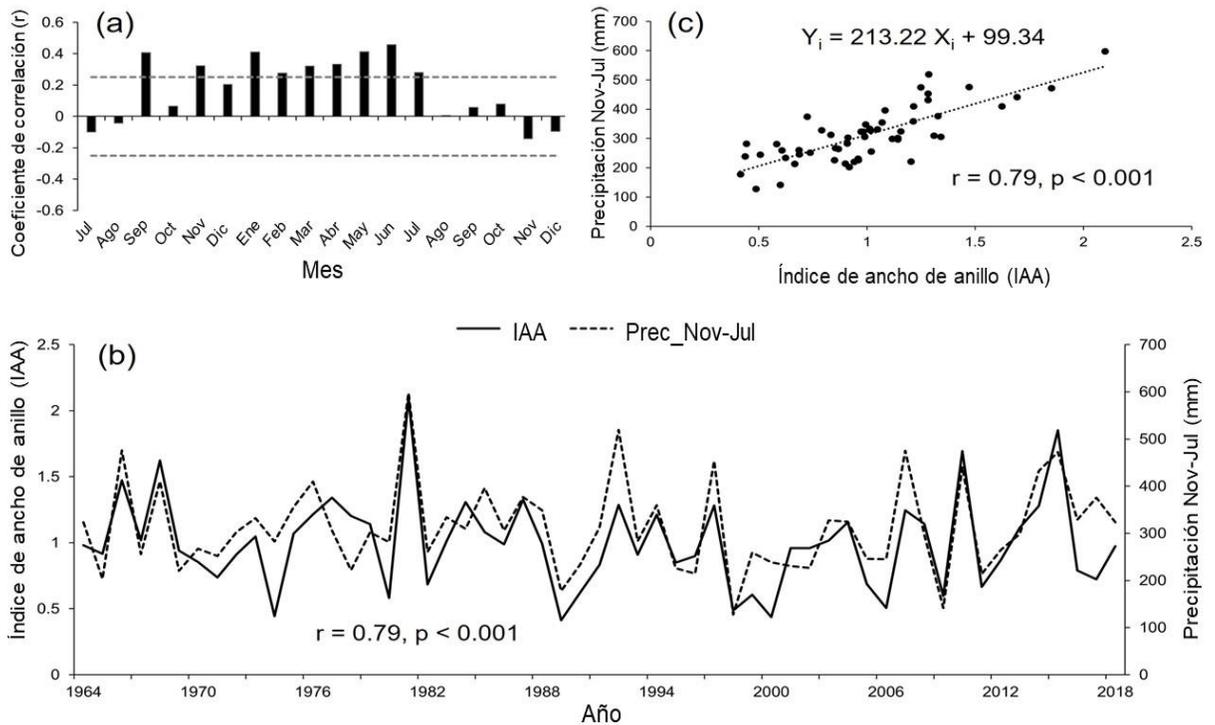


**Figura 8.** Cronología combinada del ancho de los anillos de los pinos piñoneros desde 1846 hasta 2018. Se obtuvo un EPS > 0.85 después de 1853. (RWI) indica los índices interanuales de anchura de anillos (alta frecuencia). (Spline) destaca los eventos de baja frecuencia a escala

decenal. (Media): es la media de la cronología, que es aproximadamente 1.0. (Muestra) muestra el número de núcleos incluidos en cada valor anual.

### Función de respuesta climática y reconstrucción de las precipitaciones

La cronología de la anchura de los anillos mostró una respuesta estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) a las precipitaciones desde septiembre del año anterior hasta julio del año de crecimiento actual, excepto en octubre y diciembre (Fig. 9a). Sin embargo, la mejor correlación estacional se obtuvo desde noviembre del año anterior hasta julio del año de crecimiento actual (Fig. 9b, 9c), lo que significa que el crecimiento radial de *P. cembroides* y *P. nelsonii* está mayormente influenciado por la precipitación estacional desde el invierno hasta parte de la estación de verano.



**Figura 9.** Función de respuesta a la precipitación de los pinos piñoneros. (a) Coeficiente de correlación entre los índices estándar de ancho de anillos anuales y 18 meses consecutivos de precipitación (julio-diciembre anterior al año de crecimiento y enero-diciembre durante el año de crecimiento), periodo 1964-2018; la línea discontinua indica un umbral de confianza del 95%. (b) Relación entre la versión estándar de la serie de ancho de anillo y la precipitación de noviembre-julio. (c) Gráfico de dispersión del modelo de regresión para la reconstrucción de la precipitación.

Este resultado es consistente con los reportados en estudios dendroclimáticos del noreste de México, no sólo respecto a los pinos piñoneros, sino también con

la respuesta hidroclimática de otras coníferas como *Pseudotsuga menziesii* y *Taxodium mucronatum*. Además, este estudio apoya la evidencia de que las lluvias de baja intensidad que caracterizan a la estación invernal (por ejemplo, las derivadas de los frentes fríos o "nortes") permiten reponer la humedad del suelo, la cual puede ser utilizada por estas especies durante el inicio de la estación de crecimiento (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Constante *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2011a; Villanueva *et al.*, 2018; Osorio-Osorio *et al.*, 2020). Sobre la base de la relación significativa ( $r = 0.79$ ,  $p < 0.001$ ) entre la serie del ancho de anillo anual y la precipitación media de noviembre-julio (1964-2018), fue posible desarrollar un modelo de regresión para reconstruir la precipitación estacional para este período (Fig. 9b, 9c).

El modelo utilizado para la reconstrucción fue  $Y_i = 213.22 X_i + 99.34$ , donde  $Y_i$  = precipitación reconstruida de noviembre a julio (mm) para un año específico;  $X_i$  = índice de anchura de anillo anual (Fig. 9c). Se realizó una calibración de dos mitades de los registros climáticos (1964-1991, 1992-2018), así como del periodo completo (1964-2018). La regresión del índice anual de anchura de anillos del mes de noviembre anterior a la precipitación del mes de julio actual consiguió calibrar el 61% de la varianza climática en los tres periodos analizados; los valores estadísticos de la regresión indican que el modelo fue adecuado para la reconstrucción (Tab. 3).

**Tabla 3.** Períodos de calibración y valores estadísticos del análisis de regresión entre la cronología estándar de la anchura del anillo y las precipitaciones de noviembre-julio. ( $R^2_{Adj}$ ): coeficiente de determinación ajustado a la baja por la pérdida de grados de libertad (Draper y Smith, 1981).

Periodo	$R^2_{Adj}$	Coeficiente (mm)		Error estándar (mm)		Estadística-t (H <sub>0</sub> : $\beta = 0$ )		Regresión (valor-p)
		$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_0$	$\beta_1$	
1964-1991	0.61	115.76	194.52	32.28	29.66	3.58	6.56	0.000
1992-2018	0.61	80.79	235.4	37.6	36.59	2.15	6.43	0.000
1964-2018	0.61	99.34	213.22	24.42	23.06	4.07	9.25	0.000

La prueba de verificación se realizó contrastando los valores estimados de precipitación obtenidos en el proceso de calibración (es decir, del subperíodo 1964-1991) con los datos instrumentales del subperíodo 1992-2018 y viceversa (Tab. 4). Los parámetros utilizados para determinar la significancia estadística del proceso de calibración-verificación superaron el nivel de confianza significativo ( $p < 0.05$ ). Así, el coeficiente de correlación de Pearson mostró que el modelo de regresión explica aproximadamente el 62% de la variabilidad de la precipitación tanto en los procedimientos de calibración como de verificación. La primera diferencia negativa está presente en la primera diferencia entre los valores observados y reconstruidos ( $t - t-1$ ), esta transformación elimina las tendencias que pueden afectar al coeficiente de correlación de Pearson (Fritts, 2001). Los valores positivos de la reducción del error indican una fuerte concordancia entre la precipitación observada y sus estimaciones, considerando que el valor de +1 indica una concordancia perfecta para este estadístico (Fritts, 2001). Por otro lado, el valor  $t$  muestra la comparación de las medias observadas y reconstruidas. La prueba de signos se refiere al número de acuerdos y desacuerdos entre la precipitación observada y la reconstruida. Por lo tanto, con base en estos resultados, el modelo de regresión para el periodo 1964-2018 se consideró estadísticamente válido para reconstruir la precipitación para la cronología completa.

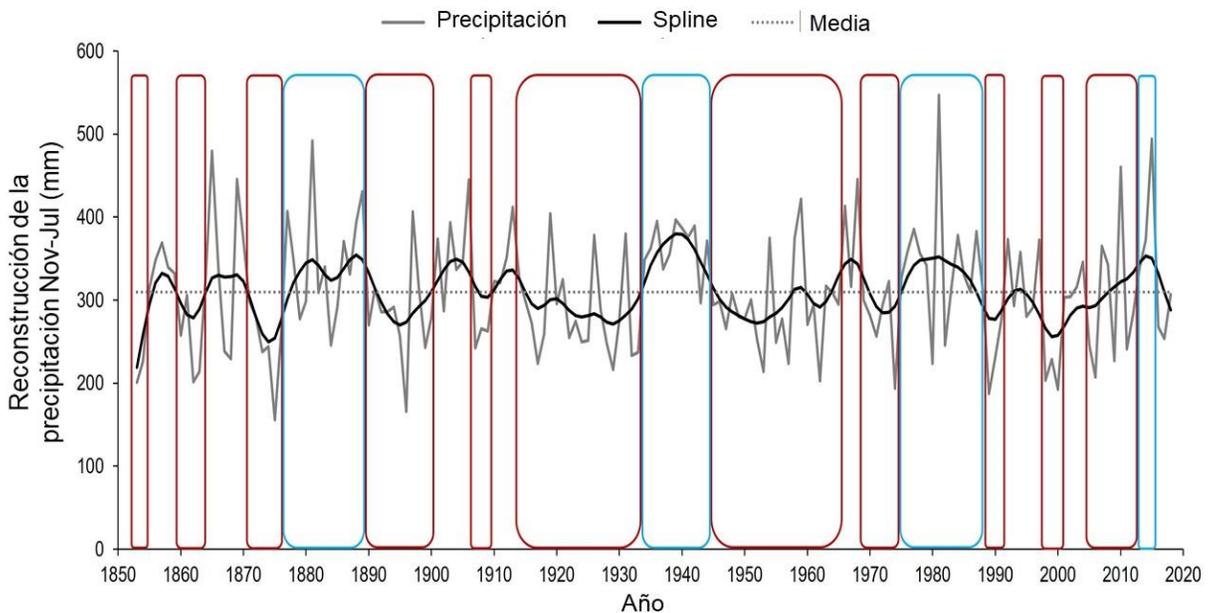
**Tabla 4.** Verificación estadística de la precipitación reconstruida de noviembre a julio. (\*): nivel de confianza significativo ( $p < 0.05$ ).

Periodo	Correlación de Pearson	Primera diferencia negativa	Reducción del error	Valor- $t$	Prueba de signos
1964-1991	0.79*	5*	0.62*	1.92*	7*
1992-2018	0.79*	6*	0.62*	3.50*	5*

### **Variabilidad de los eventos hidroclimáticos reconstruidos**

Las precipitaciones reconstruidas de noviembre a julio se extienden desde 1853 hasta 2018 (166 años) con altas variaciones interanuales y multianuales (Fig. 10). Las peores sequías se produjeron en el siglo XX, especialmente en las décadas de 1940, 1950 y 1960. Estas sequías se presentaron de forma continuada en el periodo 1945-1965 (21 años); 17 tuvieron precipitaciones por debajo de la media,

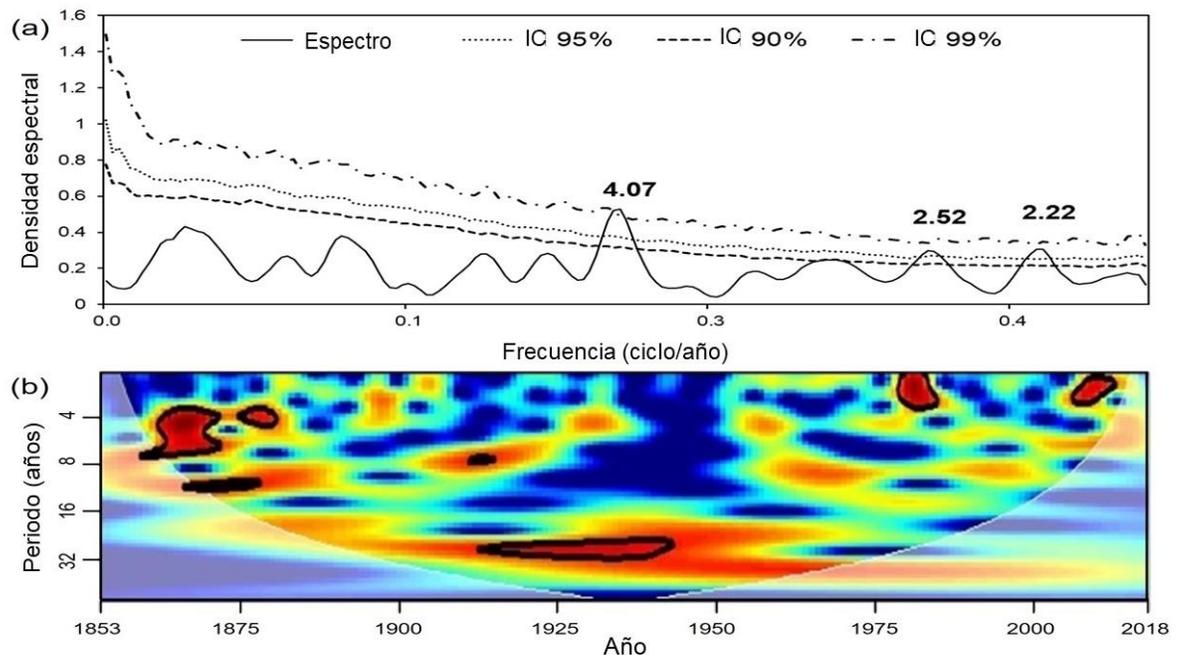
excepto 1954, 1958, 1959 y 1963. La segunda sequía más extensa tuvo lugar de 1915 a 1933 (19 años), con 15 años por debajo de la media histórica reconstruida de precipitaciones, excepto 1919, 1921, 1926 y 1931. Una tercera sequía grave se extendió de 1998 a 2000 (3 años); en este periodo se registró una precipitación media anual de 208 mm. Esta sequía causó un importante impacto negativo en los aspectos económicos, sociales y ecológicos de la región. En la reconstrucción hay tanto periodos húmedos como sequías. El periodo húmedo más prolongado de toda la reconstrucción se produjo entre 1975 y 1988, cuando 12 de los 14 años tuvieron precipitaciones anuales superiores a la media, excepto 1980 y 1982. El periodo 1934-1944 (11 años), ocupa la segunda posición, donde 10 años consecutivos tuvieron precipitaciones por encima de la media, excepto 1943. El periodo más antiguo reconstruido con precipitaciones abundantes es el de 1877-1889 (13 años), de los cuales 9 años estuvieron por encima de la media, excluyendo 1879-1880 y 1884-1885. El periodo más reciente de abundantes precipitaciones fue de 2013 a 2015 (Fig. 10).



**Figura 10.** Reconstrucción de la precipitación basada en anillos de árboles para los últimos 166 años en Miquihuana, Tamaulipas, México. Reconstrucción de la variabilidad de la precipitación (noviembre-julio, 1853-2018), la línea gris indica la precipitación estacional (alta frecuencia), la línea negra (spline) representa la variabilidad de la precipitación a nivel decenal (baja frecuencia)

para resaltar los episodios secos (bucle en línea roja) y húmedos (bucle en línea azul). La línea de puntos representa la media de la reconstrucción (309.84 mm).

El análisis del espectro de potencia indicó que las series de precipitaciones reconstruidas tuvieron frecuencias significativas en períodos de 2 y 4 años (Fig. 11a). El análisis del espectro de ondeleta muestra que el pico de 4 años se produjo de 1860 a 1873, y de 1875 a 1881 (Fig. 11b). La frecuencia de 2 años fue de 1979 a 1984, y de 2006 a 2015. Cabe señalar que, a diferencia del Análisis del Espectro de Potencia, el Espectro de Potencia de ondeleta reconoció una frecuencia significativa adicional a los 25-32 años en torno a 1915-1944, lo que pone de manifiesto la utilidad de realizar estos dos análisis conjuntamente para determinar los años en los que se produjeron las frecuencias significativas.



**Figura 11.** Frecuencias y periodos significativos de eventos hidrolimáticos extremos en la precipitación reconstruida. (a) Análisis del espectro de potencia: IC representa el intervalo de confianza; los valores sobre el intervalo de confianza del 99% corresponden a una frecuencia de 4.07 años, los que están sobre el 90% y el 95% corresponden a frecuencias de 2.52 y 2.22 años, respectivamente. (b) Análisis del espectro de potencia de ondeleta: los contornos negros indican las porciones del espectro significativas al 95%; las áreas sombreadas blancas identifican el cono de influencia del análisis.

La presencia de eventos hidroclimáticos extremos en esta reconstrucción y la frecuencia en que se produjeron (2-4 años), indica la fuerte influencia de ENSO en la variabilidad climática de la zona de estudio, confirmando a su vez la característica de alta frecuencia que presenta ENSO, que incluye periodos entre 2 y 8 años (Li *et al.* 2011). Por otro lado, la frecuencia a largo plazo de ENSO también se puso de manifiesto en este estudio. La frecuencia significativa de 25-32 años detectada por el análisis de ondeleta se corresponde estrechamente con la variabilidad de baja frecuencia de 30 a 33 años de ENSO documentada por Li *et al.*, (2011) (es decir, a partir del análisis de los valores reconstruidos del PDSI derivados de una serie de anillos de árboles de 1000 años) y con la frecuencia de 27 años registrada por Bruun *et al.*, (2017) (es decir, basada en una cronología reconstruida a partir de datos de anillos de árboles [por Li *et al.*, 2013] y el análisis de 700 años de anomalías de la SST).

Estudios a gran escala, como el de Li *et al.*, (2011) para América del Norte, han demostrado una importante frecuencia similar a la de ENSO de unos 50-60 años. Esta frecuencia se corresponde con los periodos en los que se han producido las sequías más severas y prolongadas en el noreste de México en los últimos 600 años (Cerano *et al.*, 2011a). En este sentido, es probable que las sequías que se presentaron en las décadas de 1940, 1950 y 1960, reconstruidas en este estudio, correspondan a la variabilidad de baja frecuencia de este fenómeno.

### **Influencia de ENSO y asociación con los índices de sequía**

La influencia de ENSO en las precipitaciones de Miquihuana se ve reforzada por la asociación detectada entre el incremento radial interanual de los pinos piñoneros (índices de ancho de anillo) y los índices de ENSO. Así, se obtuvo una relación negativa con los SOIs desde noviembre del año anterior hasta marzo del año de crecimiento actual ( $r = -0.38$ ,  $p = 0.000$ ,  $n = 152$ , 1867-2018). Esta asociación significativa es coherente con el resultado obtenido para el MEI-ext desde noviembre del año anterior hasta abril del año actual ( $r = 0.35$ ,  $p = 0.000$ ,  $n = 134$ , 1872-2005), lo que confirma la influencia de ENSO en la zona de estudio,

especialmente en la determinación de las condiciones de sequía en el periodo estacional invierno-primavera.

La relación entre las series dendrocronológicas con los índices de sequía fue positiva y altamente significativa, explicando hasta el 50% de la variabilidad del crecimiento de los anillos de los árboles. Del análisis con el periodo reconstruido sc-PDSI junio-agosto, el coeficiente de correlación obtenido fue  $r = 0.60$ , desde 1853 hasta 2012 (160 años) con  $p = 0.000$ . Sin embargo, esta asociación fue la más baja entre los índices. Por el contrario, la correlación obtenida con el período reconstruido del SPI diciembre-abril fue de  $r = 0.70$ , desde 1853 hasta 2016 (164 años) y  $p = 0.000$ . Este resultado se une al obtenido por la asociación con el periodo SPEI de noviembre del año anterior a julio del año actual de crecimiento ( $r = 0.70$ ,  $p = 0.000$ ,  $n = 117$ , 1902-2018). Por lo tanto, la asociación altamente significativa entre la cronología de la anchura de los anillos y los índices de sequía indica que las especies de pino piñonero que se estudiaron constituyen un excelente *proxy* de las condiciones históricas de sequía en la región, lo que a su vez aumenta la validez de esta reconstrucción de la precipitación.

Con base en los resultados de este estudio, se confirma que la teleconexión ENSO tiene una fuerte influencia en las precipitaciones de la región subtropical del noreste de México, en particular la de la temporada de invierno-primavera. Este hallazgo es muy fiable en el periodo comprendido entre los años 50 y el presente, en el que los instrumentos climatológicos modernos han podido recoger mejores datos. Las sequías detectadas en los años 1950-1960, 1970, 1998-2000 y 2011 pueden estar asociadas a los eventos de La Niña, mientras que los años húmedos de 1958-59, 1968, 1981, 2010 y 2015 pueden estar relacionados con la fase cálida de ENSO (Méndez Y Magaña, 2010).

### **Impacto de las sequías y las lluvias**

Los episodios secos y húmedos detectados en esta reconstrucción de la precipitación son consistentes con estudios dendroclimáticos realizados en el noreste y centro de México (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007, Constante *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2011a; Cardoza *et al.*, 2014; Carlón *et al.*,

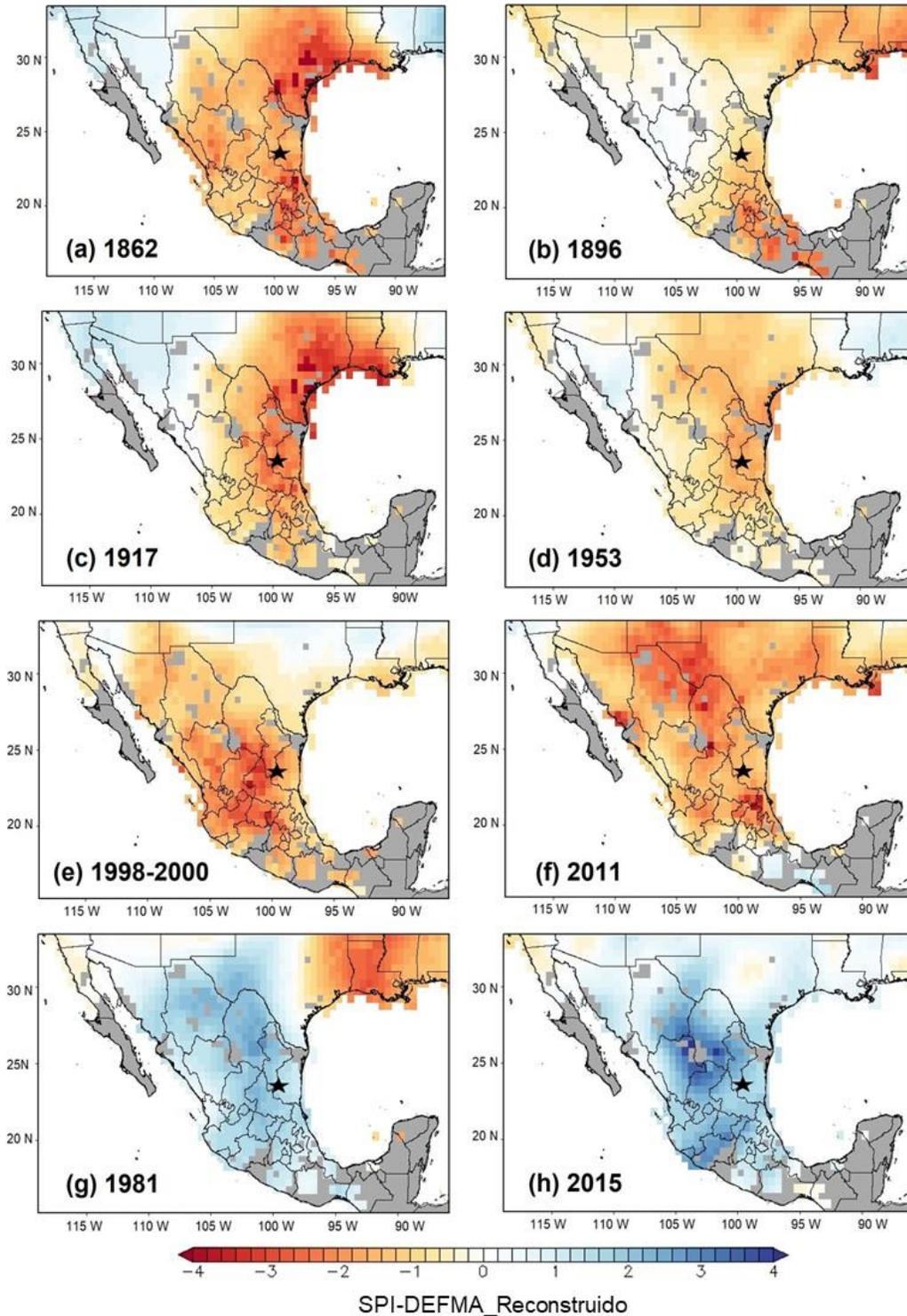
2018) y son verificados por los archivos históricos que describen el impacto de las sequías y las lluvias que se presentaron tanto en el norte como en el centro de México (Florescano, 1980; García, 1993; SMN, 2002; Dell, 2012; SAGARPA, 2012; CONAGUA-SMN, 2015; Herrera *et al.*, 2015; CONAGUA-SMN, 2021). Las sequías fueron los eventos climáticos mejor documentados por sus impactos negativos en la socioeconomía de la región. Algunos de los eventos hidroclimáticos fueron tan severos que afectaron a la mayor parte de México (Tab. 5 y Fig. 12).

**Tabla 5.** Eventos hidroclimáticos de relevancia socioeconómica en el noreste de México. Los valores por debajo y por encima de la media (309.84 mm; 1853-2018), indican condiciones secas y húmedas, respectivamente.

Condición	Periodo	Años extremos	Precipitación media (309.84)
Sequía	1853-1854	1853	200.97
	1860-1863	1862	201.76
	1871-1876	1875	155.77
	1890-1900	1896	166.03
	1907-1909	1907	242.23
	1915-1933	1917, 1929	223.70, 216.50
	1945-1965	1953, 1957, 1962	214.07, 223.83, 202.85
	1969-1974	1974	193.70
	1989-1991	1989	187.41
	1998-2000	2000	192.49
Lluvia	2005-2012	2006, 2009, 2011	207.18, 226.73, 241.15
	1877-1889	1881	492.25
	1934-1944	1939	397.09
	1975-1988	1981	546.75
	2013-2015	2015	494.05

Las sequías en México han sido recurrentes y persistentes a lo largo de su historia y, en particular, el norte de México ha sufrido sus efectos más drásticos. Las sequías han causado grandes pérdidas en las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, y han afectado negativamente a los habitantes de la región. Las condiciones de sequía de mediados del siglo XIX causaron un impacto negativo en el noreste de México (García, 1993; Constante *et al.* 2009); en el municipio de Miquihuana del estado de Tamaulipas se documentaron malas

cosechas debido a la sequía severa que se extendió de 1860 a 1863 y que provocó la migración de la población local a las zonas urbanas y redujo la población rural en más del 50% (Herrera *et al.*, 2015) (Fig. 12a).



**Figura 12.** Patrón espacial e intensidad del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) reconstruido con anillos de árboles para la temporada diciembre-abril. Seis sequías significativas (a-f) y dos precipitaciones importantes (g-h) en la historia de México fueron mapeadas utilizando el Atlas de Precipitación Estacional de América del Norte (Stahle *et al.*, 2020). El área de estudio se indica con una estrella negra.

A finales del siglo XIX, la sequía de 1896 causó pérdidas incalculables en la agricultura (Fig. 12b), situación que se agravó por las condiciones de sequía que prevalecían en México desde 1890 (Florescano, 1980; Therrell *et al.*, 2006; Villanueva *et al.*, 2009; Cardoza *et al.*, 2014). Los primeros años del siglo XX formaron parte de una serie de años secos registrados en el centro y norte de México. Esto dio lugar no sólo a la pérdida de cosechas, sino que también pudo haber desencadenado insurrecciones sociales como la Revolución Mexicana en 1910, que duraría hasta 1917 (Florescano, 1980; Silva-Herzog, 1995; Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Dell, 2012; Herrera *et al.*, 2015) (Fig. 12c).

La sequía de los años 50 (1945-1965) está catalogada como la peor de mediados del siglo XX. Es la mejor documentada y se describe como la que produjo un fuerte impacto social en el sector rural de todo México (Fig. 12d). Los años secos de 1953, 1957 y 1962 desencadenaron un aumento de la migración de las comunidades rurales a las urbanas y la migración de los trabajadores agrícolas a los Estados Unidos (Florescano, 1980; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Cerano *et al.*, 2011b).

El final del siglo XX se ha caracterizado por ser uno de los peores períodos de sequía en la historia de México, dando lugar a un número récord de incendios forestales en 1998 en la mayor parte del país. Estas condiciones de sequía continuaron durante 1999 y finalmente se alcanzó la menor cantidad de precipitación en el año 2000 (Fig. 12e) (Magaña *et al.*, 1999; Magaña *et al.*, 2003; Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017; Carlón *et al.*, 2018).

A principios del siglo XXI un nuevo periodo seco afectó al noreste de México, donde 2011 fue el año más seco (Carlón *et al.*, 2018; Osorio-Osorio *et al.*, 2020). Se dañaron millones de hectáreas de cultivo (principalmente maíz y frijol) y murieron miles de reses (Fig. 12f) (SAGARPA, 2012; SHCP, 2012; Esparza 2014; CONAGUA-SMN, 2021).

Las condiciones de humedad detectadas en 1981 son consistentes con las reconstrucciones de la precipitación de los anillos de los árboles del norte y centro de México (Cardoza *et al.*, 2014; Carlón *et al.*, 2018; Osorio-Osorio *et al.*, 2020; Villanueva-Díaz *et al.*, 2020a). Las abundantes lluvias registradas por los anillos arbóreos también podrían estar asociadas a las precipitaciones derivadas de la intensa actividad hidrometeorológica tanto del Océano Pacífico como del Golfo de México que afectó al país entre el verano de 1980 y el otoño de 1981, (El País 1980; SMN, 2002) (Fig. 12g).

Finalmente, el año extraordinariamente húmedo de 2015 fue de interés público a nivel nacional por el impacto causado en la sociedad (CONAGUA, 2015; CONAGUA-SMN, 2015) (Fig. 12h). Este periodo húmedo ha sido registrado en reconstrucciones dendroclimáticas del norte y centro de México (Carlón 2018; Villanueva-Díaz *et al.*, 2020a; Villanueva-Díaz *et al.*, 2020c).

## CONCLUSIONES

La reconstrucción de la precipitación con anillos de árboles de pinos piñoneros realizada en este estudio contribuye a una mejor comprensión de la variabilidad hidroclimática a largo plazo y la influencia de ENSO en la presencia de sequías y lluvias extremas en la región subtropical del noreste de México.

La respuesta climática indica que el crecimiento radial de *Pinus cembroides* y *P. nelsonii* está influenciado por la precipitación de noviembre anterior a la de julio actual. La precipitación reconstruida se extendió desde 1853 hasta 2018 (166 años) y mostró una alta variabilidad interanual y multianual, que provocó eventos hidroclimáticos extremos con frecuencias dominantes de 2 y 4 años, y de 25 a 35 años, atribuidos a ENSO. La asociación altamente significativa entre la cronología del ancho de los anillos y los índices de sequía confirma que los anillos anuales de los pinos piñoneros constituyen una de las mejores fuentes para determinar la variabilidad a largo plazo de las sequías en esta región.

Los eventos hidroclimáticos reconstruidos en este estudio son consistentes con las sequías y lluvias históricas y su impacto socioeconómico registrado en el norte y centro de México.

## BIBLIOGRAFÍA

- Astudillo-Sánchez, Villanueva-Díaz J, Endara-Agramont AR, Nava-Bernal GE, Gómez-Albores MA (2017) Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees* 31:441–453.
- Bruun JT, Allen JI, Smyth TJ (2017) El latido de la Oscilación del Sur explica las resonancias climáticas del ENSO. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122: 6746-6772.
- Bunn A, Korpela M, Biondi F, Campelo F, Mérian P, Qeadan F, Zang C (2021). dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.2.
- Campos-Aranda, Daniel, F, (2018a). Cuantificación con el SPEI de Sequías históricas y bajo cambio climático probable en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(2), 210-233.
- Campos-Aranda, Daniel, F, (2018b). Contrastes del Índice de Sequías de Palmer Estandarizado (SPDI) en tres ubicaciones climáticas de San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 246-279.
- Cardoza GF, Cerano J, Villanueva J, Cervantes R, Guerra V, Estrada J (2014). Annual precipitation reconstruction of the eastern region of Tlaxcala state. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5(23): 110-127
- Carlón, Mendoza, M. E., Díaz, J. V., y Li, Y. (2018). Climatic response of *Pinus cembroides* Zucc. radial growth in Sierra del Cubo, Guanajuato, Mexico. *Trees*, 32(5), 1387-1399.
- Cerano Paredes, J, Villanueva Díaz, J, Valdez Cepeda, Ricardo David, Cornejo Oviedo, Eladio Heriberto, Sánchez Cohen, Ignacio, y Constante García, Vicenta. (2011B). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 31-45.

- Cerano-Paredes, J, Villanueva-Díaz, J, Valdez-Cepeda, Ricardo D., Arreola-Ávila, José Guadalupe, y Constante-García, V. (2011a). 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*, 17(spe), 207-215.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2020). Paquetes Tecnológicos, *Pinus nelsoni* Shaw. Consultado 11-05-2020 en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/972Pinus%20nelsoni.pdf>.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), (2015). Durante el invierno 2015-2016, se prevén más lluvias de lo habitual en el norte de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/prensa/durante-el-invierno-2015-2016-se-preven-mas-lluvias-de-lo-habitual-en-el-norte-de-mexico>.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), (2020a). Organismo de Cuenca Golfo Norte, Tamaulipas. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/golfo-norte>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), (2020b). Organismo de Cuenca Río Bravo, Nuevo León. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/organismo-de-cuenca-rio-bravo>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), (2021). Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). Consultado 11-12-2021 en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi>
- CONAGUA-SMN (Comisión Nacional del Agua), (Servicio Meteorológico Nacional) (2015). Climatología, reporte anual del clima en México 2015. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2015.pdf>
- CONAGUA-SMN (Comisión Nacional del Agua), (Servicio Meteorológico Nacional), (2021). Monitor de Sequía de México. Porcentaje de afectación por sequía en México. Disponible en:

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>.

Constante García, V, Villanueva Díaz, J, Cerano Paredes, J, Cornejo Oviedo, E. H., y Valencia Manzo, Sr. (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 ER (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47: 37–59.

Cook ER, Holmes RH (1986) Guide for computer program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona, USA. Disponible en [https://www.esf.edu/for/bevilacqua/for496/arstan\\_description.pdf](https://www.esf.edu/for/bevilacqua/for496/arstan_description.pdf).

Dell M (2012). Path Dependence in Development: Evidence from the Mexican revolution. Working paper. Disponible en: <https://scholar.harvard.edu/dell/publications/path-dependence-development-evidence-mexican-revolution>.

DOF (Diario Oficial de la Federación), (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Disponible en: [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM\\_059\\_SEMARNAT\\_2010.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf)

Draper NR, Smith H (1998). *Applied Regression Analysis*. John Wiley, New York, USA, pp. 716.

El País (1980). El huracán "Allen" ha causado hasta el momento más de un centenar de muertos. Disponible en: [https://elpais.com/diario/1980/08/08/portada/334533603\\_850215.html](https://elpais.com/diario/1980/08/08/portada/334533603_850215.html).

- Endfield GH, Fernández I (2006). Decades of Drought, Years of Hunger: Archival Investigations of Multiple Year Droughts in Late Colonial Chihuahua. *Climatic Change* 75: 391.
- Englehart PJ, Douglas AV (2000). Dissecting the Macro-scale Variations in Mexican Maize Yields (1961-1997). *Geographical and Environmental Modelling* 4: 65–81.
- Esparza M (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-03482014000200008&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-03482014000200008&lng=es&tlng=es).
- Esper J, Cook ER, Krusic PJ, Peters K, Schweingruber F (2003). Tests of the RCS method for preserving low frequency variability in long tree-ring chronologies. *Tree-Ring Research* 59(2): 81–98.
- Farjon A (2013). *Pinus nelsonii*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T32628A2822530.
- Farjon A, Filer D (2013). An atlas of the world's conifers: an analysis of their distribution, biogeography, diversity and conservation status. Brill, pp. 512.
- Florescano E (1980). Análisis histórico de las sequías en México. Disponible en: <http://cenca.imta.mx/pdf/sequia.pdf>.
- Fogg GG (1966). The pinyon pines and man. *Economic Botany* 20: 103–105.
- Fritts HC (2001). *Tree Rings and Climate*. The Blackburn Press. Caldwell, New Jersey, USA, pp. 567.
- G. Gutiérrez-García y Martin Ricker. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, 14.
- García E (1986). *Apuntes de climatología*. 5ta edición, Universidad Nacional Autónoma de México, México. pp. 155.

- García E (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México. pp. 91.
- García V (1993). Las sequías históricas de México. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina 1: 2-18.
- González F. (2004). Las comunidades vegetales de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología (SEMARNAT-INE), México. pp. 82.
- Gouhier TC, Grinsted A, Simko V (2018). R package biwavelet: Conduct Univariate and Bivariate Wavelet Analyses. R package version 0.20.17.
- Grissino-Mayer HD (2001). Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree Ring Research* 57(2): 205–221.
- Herrera O, Vera R, Martínez E (2015). Altiplano Tamaulipeco, Miquihuana. “Tamaulipas a través de sus regiones y municipios. Tomo VI” (Herrera O, Vera R, Martínez E). Gobierno del Estado de Tamaulipas, Tamaulipas, México. pp. 373-477.
- Holmes RL (1983). Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Miquihuana, Tamaulipas. México en cifras. Información nacional, por entidad federativa y por Municipios. Disponible en: [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/28/28026.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28026.pdf).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), (2020). Marco Geoestadístico- Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas Estatales, Municipales y Localidades, Tamaulipas, México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/ageeml/>.

- Lanner RM (1981). *The Piñon Pine: A Natural and Cultural History*. University of Nevada Press, Reno, Nevada, USA, pp. 208.
- Li J, Xie SP, Cook ER, Huang G, D'Arrigo R, Liu F, Ma J, Zheng XT (2011). Interdecadal modulation of El Niño amplitude during the past millennium. *Nature Climate Change* 1: 114–118.
- Li J, Xie SP, Cook ER, Morales MS, Christie DA, Johnson NC, Chen F, D'Arrigo R, Fowler AM, Gou X, Fang K (2013). El Niño modulations over the past seven centuries. *Nature Climate Change* 3: 822–826.
- Liverman DM (1990). Drought and Agriculture in Mexico: The case of Sonora and Puebla in 1970. *Annals of the Association of American Geographers* 80: 49–72.
- Magaña V, Pérez JL, Vázquez LL, Carrizosa E, Pérez J (1999). El Niño y el clima. “Los impactos del Niño en México” (Magaña V ed). SEP-CONACYT, Multimedia PAOT, Mexico, pp. 23–68.
- Magaña VO, Vázquez JL, Pérez JL, Pérez JB (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional* 42: 313–330.
- Martínez-Sifuentes AR, Villanueva-Díaz J, Estrada-Avalos J (2020). Runoff reconstruction and climatic influence with tree rings, in the Mayo River basin, Sonora, Mexico. *IForest - Biogeosciences and Forestry* 13: 98–106.
- Méndez M, Magaña V (2010). Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*. 23: 1175–1188.
- MXDA (2021). Mexican Drought Atlas. Disponible en: <http://drought.memphis.edu/MXDA/>
- NASPA (2021). North American Seasonal Precipitation Atlas. Disponible en: <http://drought.memphis.edu/NASPA/>

- NCAR (2021). Southern Oscillation Indices: Signal, Noise and Tahiti/Darwin SLP (SOI). Disponible en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data>
- NOAA (2021). Extended Multivariate ENSO Index (MEI.ext). Disponible en: <https://psl.noaa.gov/enso/mei.ext/>
- NOM-059-SEMARNAT (2019). Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo. Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5578808&fecha=14/11/2019](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5578808&fecha=14/11/2019)
- O'Hara SL, Metcalfe SE (1997). The climate of Mexico since the Aztec period. *Quaternary International* 43–44: 25–31.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial), (2012). Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra.
- Osorio-Osorio, JA., Astudillo-Sánchez, CC., Villanueva-Díaz, J., y Vargas-tristán, V. (2020). Reconstrucción histórica de la precipitación en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México, mediante anillos de crecimiento en *Taxodium mucronatum* (Cupressaceae). *Biología Tropical*, 68(September 2020).
- Passini MF (1982). Les forets de *Pinus cembroides* s. l. au Mexique: etude phytogéographique et écologique. *Recherche Sur les Civilisations*. Paris, Francia, pp. 373.
- Pérez Miranda, R, Romero Sánchez, Martín Enrique, González Hernández, An, Rosales Mata, Sergio, Moreno Sánchez, F, y Arriola Padilla, Víctor Javier. (2019). Modelado de la distribución actual y bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(56), 218-237.
- Perry JP Jr (1991). *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press, Portland, Oregon, USA, pp. 231.

- Price RA, Liston A, Strauss SH (1998). Phylogeny and systematics of *Pinus*. In: "Ecology and Biogeography of *Pinus*" (Richardson MD ed). Cambridge University Press, Cambridge, New York, USA, pp. 49–68.
- Richardson MD, Rundel WP (1998). Ecology and Biogeography of *Pinus*: an introduction. In: "Ecology and Biogeography of *Pinus*" (Richardson MD ed). Cambridge University Press, Cambridge, New York, USA, pp. 1–46.
- Robinson WJ, Evans R (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree Ring Bull* 40: 59–64. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.986.3417&rep=rep1&type=pdf>.
- Romero A, Luna M, García E (2014). Factores físicos que influyen en las relaciones florísticas de los piñonares (Pinaceae) de San Luis Potosí. *Revista de Biología Tropical* 62: 795–808.
- Ropelewski CF, Jones PD (1987). An Extension of the Tahiti–Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review* 115: 2161–2165.
- Rzedowski J (2006). *Vegetación de México* (1ra. Edición digital). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, pp. 504.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación), (2012). Sequía de 2011. Prensa, Gobierno de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/prioridad-del-gobierno-federal-desarrollar-acciones-de-prevencion-para-contrarrestar-efectos-de-cambio-climatico-en-el-sector-agropecuario?idiom=es>
- Sánchez-González A (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques* 14: 107–120.
- Santillán-Hernández M, Cornejo-Oviedo EH, Villanueva-Díaz J, Cerano-Paredes J, Valencia-Manzo S, Capó-Arteaga MÁ (2010). Potencial dendroclimático de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques* 16: 17–30.

- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección Ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestres - Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio -Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la Federación. 30 de diciembre de 2010. México, D.F., México. 71 p.
- SHCP (2012). Sequía 2011. Gobierno de México. Disponible en: <https://www.gob.mx/shcp/documentos/informe-semanal-del-vocero-del-23-al-27-de-enero-de-2012>.
- Silva-Herzog J (1995). Breve historia de la revolución mexicana. Los antecedentes y la etapa maderista. Fondo de cultura económica, México. pp. 401.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional), (2002). Ciclones que han impactado en México, 1981–2001. Gobierno de México. Disponible en: [http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas\\_2000/estadisticas\\_ambientales\\_2000/01\\_Dimension\\_Social/01\\_08\\_Desastres/Cuadrol.8.1.pdf](http://www.paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/estadisticas_ambientales_2000/01_Dimension_Social/01_08_Desastres/Cuadrol.8.1.pdf).
- Speer JH (2010). Fundamentals of tree ring research. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA, pp. 333.
- SPEI (2021). Global SPEI database. Web site. Disponible en: <https://spei.csic.es/database.html>
- Stahle DW, Cleaveland MK (1993). Southern Oscillation Extremes Reconstructed from Tree Rings of the Sierra Madre Occidental and Southern Great Plains. *Journal of Climate* 6: 129–140.
- Stahle DW, Cook ER, Burnette DJ, Torbenson MCA, Howard IM, Griffin D, Villanueva Diaz J, Cook BI, Williams AP, Watson E, Sauchyn DJ, Pederson N, Woodhouse CA, Pederson GT, Meko D, Coulthard B, Crawford CJ (2020). Dynamics, Variability, and Change in Seasonal Precipitation Reconstructions for North America. *Journal of Climate* 33: 3173–3195.

- Stahle DW, Cook ER, Burnette DJ, Villanueva J, Cerano J, Burns JN, Griffin D, Cook BI, Acuña R, Torbenson MCA, Szejner P, Howard IM (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews* 149: 34–60.
- Stokes MA, Smiley TL (1996). An introduction to tree-ring dating. The University of Arizona Press, Tucson, USA, pp. 73.
- Suzán-Azpiri H, Sanchez-Ramos G, Martinez-Avalos JG, Villa-Melgarejo S, Franco M (2002). Population structure of *Pinus nelsoni* Shaw, an endemic pinyon pine in Tamaulipas, Mexico. *Forest Ecology and Management*. 165: 193–203.
- Therrell MD, Stahle DW, Diaz JV, Oviedo EHC, Cleaveland MK (2006). Tree-Ring Reconstructed Maize Yield in Central Mexico: 1474–2001. *Climatic Change*. 74: 493. - doi: 10.1007/s10584-006-6865-z
- Torbenson MCA, Stahle DW, Howard IM, Burnette DJ, Villanueva-Díaz J, Cook ER, Griffin D (2019). Multidecadal Modulation of the ENSO Teleconnection to Precipitation and Tree Growth Over Subtropical North America. *Paleoceanography and Paleoclimatology* 34: 886–900.
- Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23: 1696–1718.
- Villanueva Díaz, J, Cerano Paredes, J, Rosales Mata, S, Arrocena López, JC, Stahle, D. W., Ruiz Corral, J A, y Martínez Sifuentes, AR. (2014). Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca alta del Río Mezquital, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(spe10), 1897-1912.
- Villanueva Díaz, J, Cerano Paredes, Ju, Constante García, V, Fulé, Peter Z., y Cornejo Oviedo, Eladio. (2009a). Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques*, 15(3), 45-64.

- Villanueva Díaz, J, Dave W. Stahle, Malcom K. Cleaveland, y Mathew D. Therrell. 2020b. «Estado actual de la dendrocronología en México». *Revista Mexicana De Ciencias Forestales* 25 (88). México, ME:5-36.
- Villanueva Díaz, J, Vázquez Selem, L, Estrada Ávalos, J, Martínez Sifuentes, AR., Cerano Paredes, J, Canizales Velázquez, PA., Franco Ramos, O, y Reyes Camarillo, FR. (2018). Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(49), 165-187.
- Villanueva-Díaz J, Castruita-Esparza LU, Martínez-Sifuentes AR, Loera-Chaparro R, Estrada-Ávalos J (2020c). Chihuahua southwestern hydroclimatic variability inferred with coniferous growth rings. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 26(3): 373-389.
- Villanueva-Díaz J, Stahle DW, Luckman BH, Cerano-Paredes J, Therrell MD, Cleaveland MK, Cornejo-Oviedo E (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83: 117–131.
- Villanueva-Díaz J, Stahle DW, Therrell MD, Beramendi-Orosco L, Estrada-Ávalos J, Martínez-Sifuentes AR, Astudillo-Sánchez CC, Cervantes-Martínez R, Cerano-Paredes J (2020a). The climatic response of baldcypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) in San Luis Potosi, Mexico. *Trees* 34: 623–635.
- Wigley TML, Briffa KR, Jones PD (1984). On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201–213.
- Wilhite DA (2000). Drought as a Natural Hazard: Concepts and definitions. In: “Drought: A Global Assessment” (Wilhite DA ed). Routledge, London, UK, pp. 3-18.
- Wolter K, Timlin MS (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *International Journal of Climatology* 31: 1074–1087

Zang C, Biondi F (2013). Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia* 31: 68–74.