

# Dendrochronological potential of weeping pinyon (*Pinus pinceana* Gordon) in Tamaulipas, Mexico

## Potencial dendrocronológico del piñonero llorón (*Pinus pinceana* Gordon) en Tamaulipas, México

Lucero Contreras-Mata<sup>1</sup>; Claudia C. Astudillo-Sánchez<sup>1\*</sup>; Eduardo Alanís-Rodríguez<sup>2</sup>; Jacinto Treviño-Carreón<sup>1</sup>; Arturo Mora-Olivo<sup>1</sup>; Leroy Soria-Díaz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería y Ciencias. Centro Universitario Victoria. C. P. 87149. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. km 145 Carretera nacional 85. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Tamaulipas, Instituto de Ecología Aplicada/Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. km 5 Carretera Ciudad Victoria-Ciudad Mante. C. P. 87020. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

\*Corresponding author: ccastudillo@docentes.uat.edu.mx; tel.: +52 834 318 1718.

### Abstract

**Introduction.** The dendrochronological potential of a species indicates its ability to form annual tree rings that capture a clear climate signal.

**Objective.** To evaluate the dendrochronological potential of *Pinus pinceana* Gordon to record climate variability in its tree rings.

**Materials and methods.** Cores from *P. pinceana* were extracted in a submontane scrub vegetation in Tamaulipas, Mexico. Dendrochronology software was used to measure the annual tree-rings width, date the tree rings, and transform them into growth indices. These indices were then correlated with precipitation and temperature data.

**Results and discussion.** The correlation between series was  $r = 0.54$  ( $p < 0.001$ ) and mean sensitivity was 0.31. These values are lower than documented for the species; however, they indicate that the species is sensitive to climatic factors and can record its variability through their tree-ring width indices. A 153-year chronology (1867-2019) was generated with potential to detect variability in average cumulative September-May precipitation ( $r = 0.71$ ;  $p < 0.001$ ) and average maximum temperature September-June ( $r = -0.64$ ;  $p < 0.001$ ). Weeping pinyon in Tamaulipas overcomes the sensitivity to precipitation that the species shows in other populations of central and northern Mexico.

**Conclusions.** *P. pinceana* in Tamaulipas has good dendrochronological potential due to its ability to record regional climate variability, particularly precipitation, in its tree-rings.

**Keywords:** Tree rings;

pinyon pines; precipitation;

temperature; climate variability.

### Resumen

**Introducción.** El potencial dendrocronológico de una especie revela su capacidad para desarrollar anillos de crecimiento anuales con una fuerte señal climática.

**Objetivo.** Evaluar el potencial dendrocronológico de *Pinus pinceana* Gordon para registrar la variabilidad climática en sus anillos de crecimiento.

**Materiales y métodos.** Se extrajeron núcleos de crecimiento de *P. pinceana* en un matorral submontano en Tamaulipas, México. Se usaron programas dendrocronológicos para la medición del ancho anual de los anillos, su fechado y su transformación a índices de crecimiento. Estos índices se relacionaron con datos de precipitación y de temperatura.

**Resultados y discusión.** La correlación entre series fue  $r = 0.54$  ( $p < 0.001$ ) y la sensibilidad media de 0.31. Estos valores son más bajos que lo documentado para la especie; sin embargo, indican que esta es sensible a los factores climáticos y capaz de registrar su variabilidad a través del grosor de los anillos de crecimiento. Se generó una cronología de 153 años (1867-2019) con potencial para detectar la variabilidad de la precipitación promedio acumulada septiembre-mayo ( $r = 0.71$ ;  $p < 0.001$ ) y de temperatura máxima promedio septiembre-junio ( $r = -0.64$ ;  $p < 0.001$ ). El piñonero llorón en Tamaulipas supera la sensibilidad a la precipitación que la especie presenta en otras poblaciones del centro y norte de México.

**Conclusiones.** *P. pinceana* en Tamaulipas tiene un buen potencial dendrocronológico por la capacidad de registrar, en sus anillos de crecimiento, la variabilidad climática de la región, particularmente la precipitación.

**Palabras clave:** anillos de

crecimiento; pinos piñoneros;

precipitación; temperatura;

variabilidad climática.

Please cite this article as follows (APA 7): Contreras-Mata, L., Astudillo-Sánchez, C. C., Alanís-Rodríguez, E., Treviño-Carreón, J., Mora-Olivo, A., & Soria-Díaz, L. (2024). Dendrochronological potential of weeping pinyon (*Pinus pinceana* Gordon) in Tamaulipas, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 30(3) 107–125. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.01.001>

Received: January 18, 2024 / Accepted: October 4, 2024



<https://revistas.chapingo.mx/forestales>

## Introduction

*Pinus pinceana* Gordon, known as weeping pinyon, is an endemic species of Mexico that is endangered and distributed in the semi-arid regions of the Sierra Madre Oriental (Favela & Thomas, 2013; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2023). In this upland area, pinyon pine forests are key components of the ecosystem; however, weeping pinyon remains one of the least studied species (Favela et al., 2009; Sánchez-Castillo et al., 2022; Santillán-Hernández et al., 2010).

Conifers like *P. pinceana* are naturally distributed in geographic areas with pronounced climate seasonality, where trees halt their growth during unfavorable periods and resume it when climatic conditions become optimal. The evidence of this activity and dormancy is recorded in the wood structure as annual concentric layers that represent radial growth, which, in a cross-section, appear as a pattern of tree rings (Gutiérrez, 2009).

The tree rings in conifers consist of two bands of coloration: a light-colored band representing earlywood developed during spring, and a dark-colored band indicating the formation of latewood during summer. The difference in coloration between the last and the first cells of the year defines an annual tree ring (Speer, 2010).

In Mexico, precipitation is one of the most significant climatic factors limiting the radial growth of trees, especially in temperate and semi-arid climates. This information has enabled the reconstruction of precipitation data in areas where most weather stations have less than 50 years of records (Arroyo-Morales et al., 2023; Carlón et al., 2018; Cortés-Cortés et al., 2021; Villanueva-Díaz et al., 2020). Nevertheless, it is important to increase dendrochronological studies at sites where long-range climatic information is not available. However, it is not only sufficient for tree species to produce annual tree rings, but also to show that they have dendrochronological potential.

A tree species is considered to have dendrochronological potential when it has the capacity to develop annual tree rings with a strong climatic signal, reflected in the variations in tree rings width (Speer, 2010). To determine the dendrochronological potential, some basic statistical parameters are considered, such as intercorrelation between series, mean sensitivity, standard deviation, autocorrelation and signal-to-noise ratio. All of them are focused on determining whether there is fluctuation in the annual tree rings width and the extent of that fluctuation (Grissino-Mayer, 2001).

## Introducción

*Pinus pinceana* Gordon, conocido como piñonero llorón, es una especie endémica de México, que se encuentra en peligro de extinción y se distribuye en las regiones semiáridas de la Sierra Madre Oriental (Favela & Thomas, 2013; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2023). En esta zona montañosa, los bosques de pinos piñoneros constituyen comunidades forestales importantes; sin embargo, el piñonero llorón es uno de los menos estudiados (Favela et al., 2009; Sánchez-Castillo et al., 2022; Santillán-Hernández et al., 2010).

Las coníferas como *P. pinceana* se distribuyen de forma natural en zonas geográficas con una estacionalidad climática marcada, donde los árboles detienen su crecimiento durante la época desfavorable y lo reactivan cuando las condiciones climáticas se tornan óptimas. La evidencia de esta actividad y reposo queda marcada en la estructura de la madera en forma de capas concéntricas anuales que equivalen a su crecimiento radial, el cual, en un corte transversal, se ve como un patrón de anillos de crecimiento (Gutiérrez, 2009).

Los anillos de crecimiento en las coníferas poseen dos bandas de coloración: una de color claro que constituye la madera temprana desarrollada durante la primavera y una de color oscuro que indica la formación de madera tardía durante el verano. La diferencia en coloración de las últimas células, en relación con las primeras del año, es lo que delimita a un anillo de crecimiento anual (Speer, 2010).

En México se ha demostrado que la precipitación es uno de los factores climáticos que más limitan el crecimiento radial de los árboles, particularmente en climas templados y semiáridos. Esta información ha hecho posible hacer reconstrucciones de precipitación en lugares donde la mayoría de las estaciones meteorológicas no superan los 50 años de información (Arroyo-Morales et al., 2023; Carlón et al., 2018; Cortés-Cortés et al., 2021; Villanueva-Díaz et al., 2020). No obstante, es importante el incremento de estudios dendrocronológicos en sitios donde no se cuenta con información climática de largo alcance. Ahora bien, no solo basta que las especies arbóreas produzcan anillos de crecimiento anual, sino también evidenciar que tengan potencial dendrocronológico.

Se considera que una especie arbórea tiene potencial dendrocronológico cuando posee la capacidad de desarrollar anillos de crecimiento anual con una fuerte señal climática, reflejada en las variaciones del grosor de sus anillos (Speer, 2010). Para determinar el potencial dendrocronológico se toman en cuenta

The dendrochronological potential of *P. pinceana* has only been addressed by Santillán-Hernández et al. (2010), who studied the species' response to precipitation in populations from Coahuila, Hidalgo, San Luis Potosí, Querétaro, and Zacatecas, which were its known distribution areas at the time (including Nuevo León). Subsequently, *P. pinceana* was recorded in the southwestern part of Tamaulipas in 2015 (Martínez-Ávalos et al., 2015); therefore, it is now possible to expand the understanding of its dendrochronological potential to include its far northeastern distribution.

The northeast part of Mexico is characterized by low levels of precipitation and frequent droughts (Stahle et al., 2016), so the study of long-term precipitation patterns is essential to develop strategies to prevent the impacts of droughts. A long-range source of climate information, due to its longevity and habitat in semi-arid areas, is *P. pinceana*. The evaluation of the dendrochronological potential of this species would allow us to know the climatic factor that limits its radial growth in Tamaulipas, and then explore the use of the tree-rings of *P. pinceana* in climatic reconstructions of the region.

The hypothesis of this study was that due to the arid conditions where *P. pinceana* establishes itself in Tamaulipas, it is expected to have good dendrochronological potential, with precipitation being the climatic factor that limits its radial growth. To test the assumption of this research, the objectives were: 1) to develop an annual tree-ring width chronology of *P. pinceana*; 2) to determine its dendrochronological potential to register, in their tree rings, the climatic variability in the study area and 3) to associate radial growth with precipitation and regional temperature to support the climatic sensitivity of the species.

## Materials and methods

### Description of the study area

Specimens of *P. pinceana* are located in the municipality of Jaumave, near the ejido of Magdaleno Aguilar, and are part of the submontane scrub vegetation in the Sierra Madre Oriental in the southwestern part of Tamaulipas (SEMARNAT, 2014). The area where *P. pinceana* is found is a natural landscape not designated for timber extraction. The reference coordinates for the ejido are 23° 27' 08.9565" N and -99° 33' 32.945" W, where *P. pinceana* trees grow at an average elevation of 1 200 m (Figure 1).

The climate of the study area is semi-arid with extreme temperatures (García, 2004). It has an average annual precipitation of 491.56 mm, with September being the wettest month at 80.11 mm and February the driest at

algunos parámetros estadísticos básicos como la intercorrelación entre series, sensibilidad media, desviación estándar, autocorrelación y proporción señal ruido. Todos ellos, enfocados en evidenciar si existe fluctuación en el grosor de los anillos anuales y cuál es su intensidad (Grissino-Mayer, 2001).

El potencial dendrocronológico de *P. pinceana* solo se ha abordado por Santillán-Hernández et al. (2010), quienes analizaron la respuesta de la especie a la precipitación en poblaciones procedentes de Coahuila, Hidalgo, San Luis Potosí, Querétaro, y Zacatecas, hasta entonces su distribución conocida (incluido Nuevo León). Posteriormente, *P. pinceana* se registró en el suroeste de Tamaulipas en el 2015 (Martínez-Ávalos et al., 2015); por tanto, ahora es factible ampliar el conocimiento sobre el potencial dendrocronológico hasta su distribución extrema noreste.

El noreste de México se caracteriza por sus niveles bajos de precipitación y sequías frecuentes (Stahle et al., 2016), por lo que el estudio de los patrones de precipitación a largo plazo es fundamental para trazar estrategias de prevención frente a los impactos de las sequías. Una fuente de información climática de largo alcance, debido a su longevidad y hábitat en zonas semiáridas, es *P. pinceana*. La evaluación del potencial dendrocronológico de esta especie permitiría conocer el factor climático que limita su crecimiento radial en Tamaulipas, para luego explorar el uso de los anillos de crecimiento de *P. pinceana* en reconstrucciones climáticas de la región.

La hipótesis de este estudio fue que debido a las condiciones de aridez donde se establece *P. pinceana* en Tamaulipas, se espera que presente un buen potencial dendrocronológico, donde el factor climático que limite su crecimiento radial sea la precipitación. Para probar el supuesto de esta investigación, los objetivos fueron: 1) desarrollar una cronología de ancho de anillo anual de *P. pinceana*; 2) determinar su potencial dendrocronológico para registrar, en sus anillos de crecimiento, la variabilidad climática en el área de estudio y 3) asociar el crecimiento radial con la precipitación y la temperatura regional para sustentar la sensibilidad climática de la especie.

## Materiales y métodos

### Descripción del área de estudio

Los ejemplares de *P. pinceana* se encuentran en el municipio de Jaumave e inmediaciones del ejido Magdaleno Aguilar y forman parte del matorral submontano en la Sierra Madre Oriental del suroeste de Tamaulipas (SEMARNAT, 2014). El área donde se encuentra *P. pinceana* es un paisaje natural que

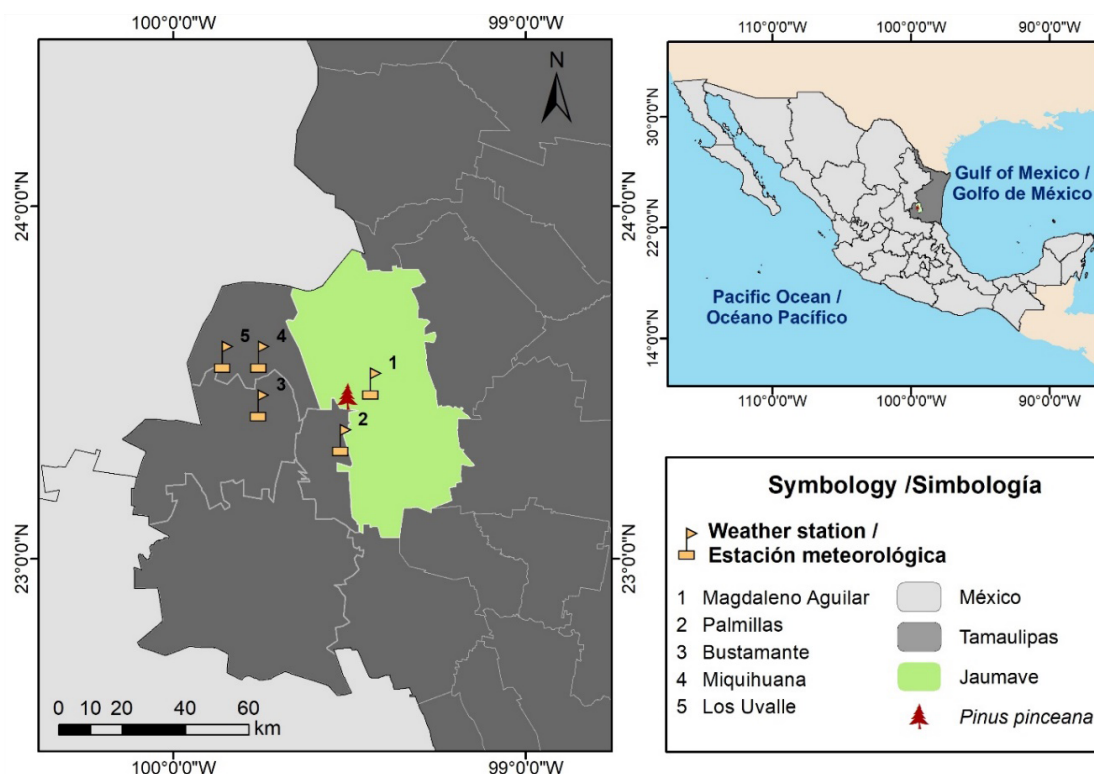


Figure 1. Geographic location of the *Pinus pinceana* population in Tamaulipas and the weather stations used in this study.

Figura 1. Ubicación geográfica de la población de *Pinus pinceana* en Tamaulipas y las estaciones meteorológicas empleadas en este estudio.

10.09 mm. The average annual precipitation for spring, summer, autumn, and winter is 24, 42, 26, and 8 %, respectively, with cold fronts playing an important role in low-intensity precipitation during winter (Magaña et al., 2003). The average annual temperature is 18 °C; May is the hottest month with a maximum temperature of 40 °C, while December and January are the coldest months with temperatures dropping to -4 °C (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2020).

The dominant soil type is Leptosol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2023), where submontane scrub vegetation thrives, and *P. pinceana* stands are associated with *Helietta parvifolia* (A. Gray) Benth., *Senegalia roemeriana* (Scheele) Britton & Rose, *Mimosa aculeaticarpa* Ortega, *Opuntia engelmannii* Salm-Dyck ex Engelm., *Bernardia myricifolia* (Scheele) S. Wats., *Jatropha dioica* Sessé, *Bursera fagaroides* Engl., *Dioon angustifolium* Miq., *Brahea dulcis* (Kunth) Mart., *Hechtia hernandez-sandovalii* Ramírez, C. F. Jiménez and Treviño and *Lantana camara* L.

### Field sampling

In June 2020, specimens of weeping pinyon were located in the ejido of Magdaleno Aguilar, and through selective sampling, 50 mature and healthy trees were

no se destina al aprovechamiento maderable. Las coordenadas de referencia del ejido son 23° 27' 08.9565" N y -99° 33' 32.945" O, donde los árboles de *P. pinceana* se establecen a una elevación promedio de 1 200 m (Figura 1).

El clima del área de estudio es semiárido con temperaturas extremas (García, 2004). Cuenta con una precipitación media anual de 491.56 mm; septiembre es el mes más lluvioso con 80.11 mm y febrero el más seco con 10.09 mm. La precipitación media anual para primavera, verano, otoño e invierno es de 24, 42, 26 y 8 %, respectivamente, donde los frentes fríos tienen un rol importante en la precipitación de baja intensidad durante el invierno (Magaña et al., 2003). La temperatura media anual es 18 °C; mayo es el mes más caliente con una máxima de 40 °C, mientras que diciembre y enero son los más fríos con temperaturas de hasta -4 °C (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2020).

El tipo de suelo predominante es Leptosol (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2023), donde prospera una vegetación de tipo matorral submontano y los rodales de *P. pinceana* se asocian con *Helietta parvifolia* (A. Gray) Benth., *Senegalia roemeriana* (Scheele) Britton & Rose, *Mimosa aculeaticarpa* Ortega, *Opuntia engelmannii* Salm-Dyck ex Engelm., *Bernardia*

chosen – meaning they showed no signs of pests, forest fire damage, or mechanical injury. Two to three cores were extracted from each tree using Pressler borers (Haglöf brand) that were 51 cm long with internal diameters of 5 and 12 mm. Samples were taken at 1.3 meters above the ground, following the slope and perpendicular to the trunk of the tree. Each sample was labeled with the site code, tree number, and subsample designation. Diameter at breast height of the corresponding tree (at 1.30 m), location coordinates, altitude, and site exposure were also recorded.

### Sample processing, measurement and dating of tree rings

Cores were placed in grooved wooden molds and fixed with glue and tape. Subsequently, they were polished with sandpaper of different grit thickness (120 to 1500) to highlight the tree rings. Based on standard dendrochronological techniques (Stokes & Smiley, 1968) and with a high-resolution stereoscope, tree rings of each sample were counted, and a tentative date was assigned to the year of formation (pre-dated).

Earlywood and latewood widths were measured in each tree ring to determine the total (annual) ring width used in the rest of the analyses. These measurements were made at the Forest Ecology and Dendrochronology Laboratory of the Faculty of Engineering and Sciences of the Universidad Autónoma de Tamaulipas, where a Velmex System with 0.001 mm precision and the Measure J2X software (Speer, 2010; Velmex Inc., 2023) were used. The quality of the dating was verified with the COFECHA program. This program statistically compares the dating of each sample through the measurement files of each tree-ring width series by successively correlating segments of 50 years with an overlap of 25 years. COFECHA identifies segments of the tree-ring width series that are poorly correlated with the master chronology series, for which it shows dating errors, measurement errors, or growth problems; this process allows the assignment of the exact date to each of the tree rings (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983).

### Development of chronology and determination of dendrochronological potential

To determine the dendrochronological potential, it is necessary to standardize the tree-ring width measurement values beforehand, i.e., to remove growth trends due to the age of the trees and underlying geometric effect, among other environmental factors unrelated to climate. This procedure was carried out using the ARSTAN program (Cook & Holmes, 1999).

*myricifolia* (Scheele) S. Wats., *Jatropha dioica* Sessé, *Bursera fagaroides* Engl., *Dioon angustifolium* Miq., *Brahea dulcis* (Kunth) Mart., *Hechtia hernandez-sandovalii* Ramírez, C. F. Jiménez y Treviño y *Lantana camara* L.

### Trabajo de campo

En junio del 2020 se ubicaron ejemplares del piñonero llorón en el ejido Magdaleno Aguilar y mediante un muestreo selectivo se eligieron 50 árboles maduros y sanos; es decir, sin presencia de plagas ni afectaciones por incendios forestales o daños mecánicos. Se extrajeron de dos a tres núcleos de crecimiento por árbol con taladros de Pressler (marca Haglöf) de 51 cm de largo y con diámetro interno de broca de 5 y 12 mm. Las muestras se tomaron a 1.3 m del suelo en el sentido de la pendiente y perpendicular al fuste del árbol. En cada muestra se rotuló la clave del sitio, el número de árbol y submuestra. También se registró el diámetro normal del árbol correspondiente (a 1.30 m), sus coordenadas de ubicación, altitud y exposición del sitio.

### Procesamiento de muestras, medición y fechado de anillos de crecimiento

Los núcleos de crecimiento se colocaron en moldes acanalados de madera y se fijaron con pegamento y cinta adhesiva. Posteriormente, se pulieron con lijas de diferente grosor de grano (120 a 1500) para resaltar los anillos de crecimiento. Con base en técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes & Smiley, 1968) y con un estereoscopio de resolución alta se contaron los anillos de crecimiento de cada muestra y se asignó una fecha tentativa al año de su formación (prefechado).

El ancho de la madera temprana y madera tardía se midieron en cada anillo de crecimiento, para así determinar el ancho de anillo total (anual) que se utilizó en el resto de los análisis. Estas mediciones se hicieron en el Laboratorio de Ecología Forestal y Dendrocronología de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, donde se utilizó un Sistema Velmex con precisión 0.001 mm y el programa Measure J2X (Speer, 2010; Velmex Inc., 2023). La calidad del fechado se verificó con el programa COFECHA. Este programa compara estadísticamente el fechado de cada muestra a través de los archivos de medición de cada serie de crecimiento, al correlacionar sucesivamente segmentos de 50 años con traslapes de 25. COFECHA identifica segmentos de la serie de anillos poco correlacionados con la serie maestra de la cronología, para los cuales muestra los errores de fechado, de medición, o bien problemas de crecimiento; este proceso permite la asignación de la fecha exacta a cada uno de los anillos (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983).

A double standardization of the tree-rings width was used, which consisted of first applying a negative exponential curve or a linear regression line to each tree-ring width series according to its growth pattern. For better fitting, a second standardization was performed in which a cubic spline curve was applied that preserved 50 % of the variance contained in the series.

In each case, standardization consisted of dividing the annual tree-ring width by the value of the fitting curve, transforming these increments into ring width indices (RWI), dimensionless values that enable the comparison of growth series from different ages. Once RWI for all samples was collected, a chronology was developed; that is, a temporal sequence that shows the mean RWI for each year.

ARSTAN has three versions of the chronology: standard, residual and arstan. In this study we chose to work with the standard version, in which a biweight robust mean is applied. This statistic is used to remove endogenous effects originated by stand disturbance and maximize the common climatic signal contained in the tree rings. Finally, a 10-year spline curve was applied to the chronology to highlight low frequency events.

The basic statistics describing the standard chronology of *P. pincheana* and defining its dendrochronological potential were also derived from ARSTAN. These are intercorrelation between series (indicating the intensity of the climatic signal that is common at the tree population level), mean sensitivity (relative change in ring width from one year to the next), standard deviation (variation in ring width growth), first order autocorrelation (influence of previous ring growth on the ring width of the following year; low values reflect greater variation in growth from one year to the next) and the signal-to-noise ratio (ratio of the climatic signal to other non-climate related factors). Additionally, two statistics that depend on the depth of the sample along the chronology were obtained to accurately highlight the climatic sensitivity of the *P. pincheana* chronology. These are Rbar (running between average relationship) and EPS (expressed population signal), which were analyzed with the dplR package in R (Bunn et al., 2024). The Rbar is the average correlation between all series in 100-year intervals with 50 years of overlap. Being a continuous correlation between series, it is a good measure of the intensity of the common climatic signal between samples over the chronology (Speer, 2010). EPS indicates the intensity of the climatic signal expressed by the population as it approaches the longest part of the chronology. For EPS, a value of 0.85 is used as a significant point, from the year in which this value is exceeded and, in conjunction with the other dendrochronological parameters, the chronology has greater potential to be used for climate reconstruction purposes (Buras, 2017).

## Desarrollo de la cronología y determinación del potencial dendrocronológico

Para determinar el potencial dendrocronológico es precisa la estandarización previa de los valores de medición del ancho de los anillos; es decir, eliminar las tendencias de crecimiento, producto de la edad de los árboles y su efecto geométrico subyacente, entre otros factores ambientales no relacionados con el clima. Este procedimiento se realizó con el programa ARSTAN (Cook & Holmes, 1999).

Se utilizó una doble estandarización de los anillos de crecimiento, la cual consistió en aplicar en primer lugar una curva exponencial negativa o una línea de regresión lineal a cada serie de ancho de anillo según se ajustara a su patrón de crecimiento. Para un mejor ajuste, se hizo una segunda estandarización en la cual se aplicó una curva suavizada cúbica que preservara 50 % de la varianza contenida en las series.

En cada caso, la estandarización consistió en dividir el ancho del anillo anual entre el valor de la curva de ajuste, transformando estos incrementos en índices de ancho de anillo (IAA), valores adimensionales que permiten comparar series de crecimiento de edades diferentes. Una vez obtenidos los IAA de todas las muestras se generó una cronología; es decir, una secuencia temporal que muestra la media del IAA por año.

El programa ARSTAN presenta tres versiones de la cronología: estándar, residual y arstan. En este estudio se eligió trabajar con la versión estándar, en la cual se aplica una media bipesada robusta. Este estadístico se utiliza para remover los efectos endógenos originados por la perturbación del rodal y maximizar la señal climática común contenida en los anillos de crecimiento. Finalmente, a la cronología se le aplicó una curva suavizada de 10 años para resaltar los eventos de baja frecuencia.

Los estadísticos básicos que describen la cronología estándar de *P. pincheana* y que definen su potencial dendrocronológico también se obtuvieron con el programa ARSTAN. Estos son intercorrelación entre series (indica la intensidad de la señal climática que es común a nivel de la población arbórea), sensibilidad media (cambio relativo del ancho de los anillos de un año al siguiente), desviación estándar (variación en el crecimiento del ancho de los anillos), autocorrelación de primer orden (influencia del crecimiento del anillo previo sobre el grosor del anillo del año siguiente; valores bajos reflejan mayor variación en el crecimiento de un año a otro) y la proporción señal ruido (proporción de la señal climática con respecto a otros factores no relacionados con el clima). Adicionalmente, se obtuvieron dos estadísticos que dependen de la profundidad de la muestra a lo largo de

## Relationship between radial growth of *Pinus pinceana* and regional climate

The influence of climate on radial growth of *P. pinceana* was analyzed through a correlation matrix between annual RWI series and series of regional average monthly values of precipitation and temperature (maximum and minimum). Prior to a Shapiro-Wilk normality test of the data series involved, which was satisfactory, the 'treeclim' package in R was used, with a Pearson bootstrap correlation, which was used to determine the months of precipitation and temperature that significantly influence tree-rings width, thereby supporting the climate sensitivity of weeping pinyon (Zang & Biondi, 2015).

Precipitation and temperature data were collected from weather stations near the study site that had reliable and complete climate records. Five stations met these requirements over a common period from 1981 to 2018 (38 years). The climatic data were averaged to estimate monthly precipitation and temperature (maximum and minimum) values at the regional level (Table 1).

Climatic conditions prior to the tree growing season can influence the tree-ring width of the current year. Therefore, to analyze the months in which tree radial growth responds positively or negatively to climate, we used precipitation and temperature data (maximum and minimum) from 18 consecutive months: six months prior to the growing year and 12 months during the current growing year (Arroyo-Morales et al., 2023).

## Results and Discussion

### Dendrochronological potential of *Pinus pinceana*

From a total of 50 trees sampled, 149 cores were recorded, of which 124 were dated, representing 83 % of the samples collected. Twenty-five samples were discarded, corresponding to 17 %, because they showed growth problems and a high amount of resin. Even the samples that could be dated amounted to 72 missing

la cronología, para destacar con precisión la sensibilidad climática de la cronología de *P. pinceana*. Estos son el Rbar (running between average relationship) y el EPS (expressed population signal), los cuales se analizaron con el paquete dplR en R (Bunn et al., 2024). El Rbar es la correlación promedio entre todas las series en intervalos de 100 años con 50 años de superposición. Al ser una correlación continua entre series, es una buena medida de la intensidad de la señal climática común entre las muestras a lo largo de la cronología (Speer, 2010). Por su parte, el EPS indica la intensidad de la señal climática expresada por la población a medida que se acerca a la parte más longeva de la cronología. Para el EPS se utiliza un valor de 0.85 como punto significativo, a partir del año en que se supera este valor y, en conjunto con los otros parámetros dendrocronológicos, la cronología tiene mayor potencial para utilizarse con fines de reconstrucción climática (Buras, 2017).

### Asociación entre el crecimiento radial de *Pinus pinceana* y el clima regional

La influencia del clima sobre el crecimiento radial de *P. pinceana* se analizó a través de una matriz de correlación entre la serie de IAA anual y la serie de valores mensuales promedio de precipitación y de temperatura (máxima y mínima) regional. Previo a una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk de las series de datos involucradas, la cual fue satisfactoria, se utilizó el paquete 'treeclim' en R, con una correlación *bootstrap* de Pearson, con la cual se determinaron los meses de precipitación y de temperatura que influyen significativamente en el grosor de los anillos de crecimiento para así sustentar la sensibilidad climática del piñonero llorón (Zang & Biondi, 2015).

Los datos de precipitación y temperatura se obtuvieron de estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio que tuvieran registros climáticos confiables y completos. Cinco estaciones cumplieron con estos requisitos en un periodo común de 1981 a 2018 (38 años). Los datos climáticos se promediaron para estimar los valores mensuales de precipitación y temperatura (máxima y mínima) a nivel regional (Cuadro 1).

**Table 1. Weather stations near the *P. pinceana* sampling site in Tamaulipas.**

**Cuadro 1. Estaciones meteorológicas cercanas al sitio de muestreo de *Pinus pinceana* en Tamaulipas.**

| Station / Estación | Latitude N /<br>Latitud N | Longitude W /<br>Longitud O | Altitude (m) /<br>Altitud (m) | Period (years) /<br>Periodo (años) | Distance (km) /<br>Distancia (km) |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Magdaleno Aguilar  | 23° 27' 13"               | -99° 30' 33"                | 1430                          | 1981-2019 (39)                     | 1.9                               |
| Palmillas          | 23° 18' 00"               | -99° 33' 00"                | 1550                          | 1961-2018 (58)                     | 16.6                              |
| Bustamante         | 23° 26' 09"               | -99° 45' 15"                | 1600                          | 1971-2019 (49)                     | 26.5                              |
| Miquihuana         | 23° 34' 26"               | -99° 45' 11"                | 1770                          | 1963-2019 (57)                     | 30.1                              |
| Los Uvalle         | 23° 34' 28"               | -99° 51' 24"                | 1560                          | 1981-2019 (39)                     | 39.7                              |

rings representing 1.50 % of the total. The presence of missing rings is a common dendrochronological characteristic in *P. pinceana* and is consistent with the populations analyzed by Santillán-Hernández et al. (2010) in the latitudinal gradient of natural distribution in the Sierra Madre Oriental (north-south), whose chronologies recorded between 0.43 and 3.68 % of missing rings (Table 2).

Table 2 shows that most populations of *P. pinceana* have missing rings in their growth series. Sites with lower precipitation such as Coahuila and Zacatecas (350-400 mm) and San Luis Potosí (400-500) have the highest percentages in this category. Although missing rings reflect the climatic sensitivity of the trees, this high variability represents a greater difficulty for the dating of the samples. Thus, problems in the radial growth of the trees can have a negative impact on the parameters that define their dendrochronological potential.

Despite the challenge of dating the radial growth of *P. pinceana*, the dendrochronological parameters presented in Table 3 showed that this species has the potential to record climatic variability in its tree-rings. This is supported by an intercorrelation between series of 0.54 ( $p < 0.001$ ); that is, higher than the correlation value required by the COFECHA program (0.328,  $p < 0.01$ ) for correct dating (Grissino-Mayer, 2001). Mean sensitivity, standard deviation, first-

Las condiciones climáticas previas a la estación de crecimiento de los árboles pueden influir en el grosor de los anillos del año actual. Por tal razón, para analizar los meses en los cuales el crecimiento radial de los árboles responde de forma positiva o negativa al clima, se utilizaron datos de precipitación y de temperatura (máxima y mínima) de 18 meses consecutivos: seis meses previos al año de crecimiento y 12 meses durante el año de crecimiento actual (Arroyo-Morales et al., 2023).

Resultados y discusión

Potencial dendrocronológico de Pinus pinceana

De un total de 50 árboles muestreados se obtuvieron 149 núcleos de crecimiento, de los cuales se lograron fechar 124 virutas que representan 83 % de las muestras recolectadas. Se descartaron 25 muestras que corresponden al 17 %, debido a que presentaron problemas de crecimiento y una cantidad alta de resina. Aun las muestras que pudieron fecharse sumaron 172 anillos ausentes que representan 1.50 % del total. La presencia de anillos ausentes es una característica dendrocronológica común en *P. pinceana* y es consistente con las poblaciones analizadas por Santillán-Hernández et al. (2010) en el gradiente latitudinal de distribución natural en la Sierra Madre Oriental (norte-sur), cuyas cronologías registraron entre 0.43 y 3.68 % de anillos ausentes (Cuadro 2).

Table 2. Missing rings detected in the dated series of *Pinus pinceana* population in Tamaulipas, compared to the Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro and Hidalgo populations (Santillán-Hernández et al., 2010). Populations are arranged north-south of the Sierra Madre Oriental.

Cuadro 2. Anillos ausentes detectados en el fechado de las series de crecimiento de la población de *Pinus pinceana* en Tamaulipas, comparados con las poblaciones de Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro e Hidalgo (Santillán-Hernández et al., 2010). Las poblaciones están ordenadas norte-sur de la Sierra Madre Oriental.

| State/<br>Entidad | Population/<br>Población  | Dated samples/<br>Muestras fechadas | Serie length (years) /<br>Longitud de la<br>serie (años) | Missing rings (%) /<br>Anillos ausentes (%) | Mean anual<br>precipitation (mm) /<br>Precipitación media<br>anual (mm) |
|-------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Tamaulipas        | Magdaleno Aguilar         | 124                                 | 153                                                      | 1.50                                        | 400-600                                                                 |
| Coahuila          | Las Norias                | 43                                  | 106                                                      | 0.43                                        | 350-400                                                                 |
|                   | Palmas Altas              | 25                                  | 205                                                      | 2.26                                        |                                                                         |
| Zacatecas         | Cañón de las Bocas        | 46                                  | 125                                                      | 1.27                                        | 350-400                                                                 |
|                   | San José<br>Carbonerillas | 43                                  | 157                                                      | 2.93                                        |                                                                         |
| San Luis Potosí   | Matehualilla              | 33                                  | 125                                                      | 3.53                                        | 400-500                                                                 |
|                   | La Trinidad               | 49                                  | 131                                                      | 3.68                                        |                                                                         |
| Querétaro         | Maguey Verde              | 16                                  | 135                                                      | 2.68                                        | 400-600                                                                 |
|                   | El Tepozán                | 6                                   | 57                                                       | 0.00                                        |                                                                         |
| Hidalgo           | San Cristóbal             | 14                                  | 49                                                       | 0.00                                        | 400-600                                                                 |
|                   | El Arenalito              | 0                                   | 0                                                        | 0.00                                        |                                                                         |

<sup>a</sup>Dating of El Arenalito population was not possible, because no growth pattern was found.  
<sup>b</sup>El fechado de la población El Arenalito no fue posible, debido a que no se encontró un patrón de crecimiento.

**Table 3. Dendrochronological parameters of the tree cores series of *Pinus pinceana* in Magdaleno Aguilar, Jaumave, Tamaulipas, Mexico.****Cuadro 3. Parámetros dendrocronológicos de la serie de núcleos de árboles de *Pinus pinceana* en Magdaleno Aguilar, Jaumave, Tamaulipas, México.**

| Statistical parameter / Parámetro estadístico                                                     | Value / Valor                            | Reference value / Valor de referencia |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|
| Series intercorrelation / Intercorrelación entre series                                           | 0.54                                     | 0.40 a 0.90                           |
| Mean sensitivity / Sensibilidad media                                                             | 0.31                                     | 0.15 a 0.65                           |
| Standard deviation / Desviación estándar                                                          | 0.33                                     | 0.30 a 0.80                           |
| First-order autocorrelation / Autocorrelación de primer orden                                     | 0.28                                     | 0.60 a 0.80                           |
| Signal-to-noise ratio / Proporción señal ruido                                                    | 43.18                                    | 28.90-34.63                           |
| Rbar (total) / Rbar (total)                                                                       | 0.34                                     | —                                     |
| EPS<br>(Núcleos/árboles) / (Cores/Trees)                                                          | 1876-2018<br>(44)                        | > 0.85                                |
| Chronology length (years) / Longitud de la cronología (años)<br>(Cores/Trees) / (Núcleos/árboles) | 1867-2019 (153 años / years)<br>(124/46) |                                       |

Reference value Grissino-Mayer, (2001), for the first four statistical parameters. "High values are recommended (Santillán-Hernández et al., 2010; Villanueva et al., 2018). "Year from which the sample size is sufficiently robust for climate reconstructions. — The reference value for Rbar (running between average relationship) is unique for each chronology, since it depends on the depth sample. EPS: Expressed Population Signal.

Valor de referencia Grissino-Mayer (2001), para los primeros cuatro parámetros estadísticos. "Se recomiendan valores altos (Santillán-Hernández et al., 2010; Villanueva et al., 2018). "Año a partir del cual el tamaño de la muestra es suficientemente robusto para reconstrucciones climáticas. — El valor de referencia para Rbar (relación entre promedios) es único para cada cronología, ya que depende de la profundidad de la muestra. EPS: señal expresada por la población.

order autocorrelation, signal-to-noise ratio and Rbar values indicate high interannual variability in tree rings width (Grissino-Mayer, 2001; Speer, 2010). These dendrochronological parameters support the climatic sensitivity of *P. pinceana* from 1867 to 2019 (153 years), for which an EPS > 0.85 was determined from 1876, a year from which climatic reconstruction could be performed (Table 3; Figure 2).

According to Table 4, the basic statistical criteria that define the dendrochronological potential of *P. pinceana* in Magdaleno Aguilar, Tamaulipas, show that this species presents lower values of intercorrelation, mean sensitivity and standard deviation compared to those recorded by Santillán-Hernández et al. (2010); however, a very important aspect to consider is the number of samples analyzed for the Magdaleno Aguilar site (124 growth cores), which doubles the sample size used by Santillán-Hernández et al. (2010) (Table 2). This feature largely supports the value of the dendrochronological parameters of this study and enhances the importance of the low autocorrelation value, which was similar to that recorded in Coahuila, Zacatecas and San Luis Potosí. As for the signal-to-noise ratio, this value was higher than that recorded in all the populations analyzed by Santillán-Hernández et al. (2010) (Table 4).

The dendrochronological potential of *P. pinceana* in Tamaulipas, compared to that reported for *P. cembroides* Zucc. and *P. nelsonii* Shaw in the study area, also shows

El Cuadro 2 muestra que la mayoría de las poblaciones de *P. pinceana* registran anillos ausentes en sus series de crecimiento. Los sitios con menor precipitación como son Coahuila y Zacatecas (350-400 mm) y San Luis Potosí (400-500) registran los porcentajes más altos en este rubro. Si bien los anillos ausentes son un reflejo de la sensibilidad climática de los árboles, esa variabilidad alta representa mayor dificultad para el fechado de las muestras. Así, los problemas en el crecimiento radial de los árboles pueden repercutir negativamente en los parámetros que definen su potencial dendrocronológico.

A pesar del reto que representa el fechado del crecimiento radial de *P. pinceana*, los parámetros dendrocronológicos señalados en el Cuadro 3 mostraron que esta especie tiene potencial para registrar la variabilidad climática en sus anillos de crecimiento. Esto se respalda con una intercorrelación entre series de 0.54 ( $p < 0.001$ ); es decir, mayor que el valor de correlación requerido por el programa COFECHA (0.328,  $p < 0.01$ ) para un fechado correcto (Grissino-Mayer, 2001). Los valores de sensibilidad media, desviación estándar, autocorrelación de primer orden, proporción señal ruido y de Rbar indican variabilidad interanual alta en el ancho de los anillos de crecimiento (Grissino-Mayer, 2001; Speer, 2010). Estos parámetros dendrocronológicos sustentan la sensibilidad climática de *P. pinceana* de 1867 a 2019 (153 años), para la cual se obtuvo un EPS > 0.85 a partir de 1876, año desde el cual se podría realizar una reconstrucción climática (Cuadro 3; Figura 2).

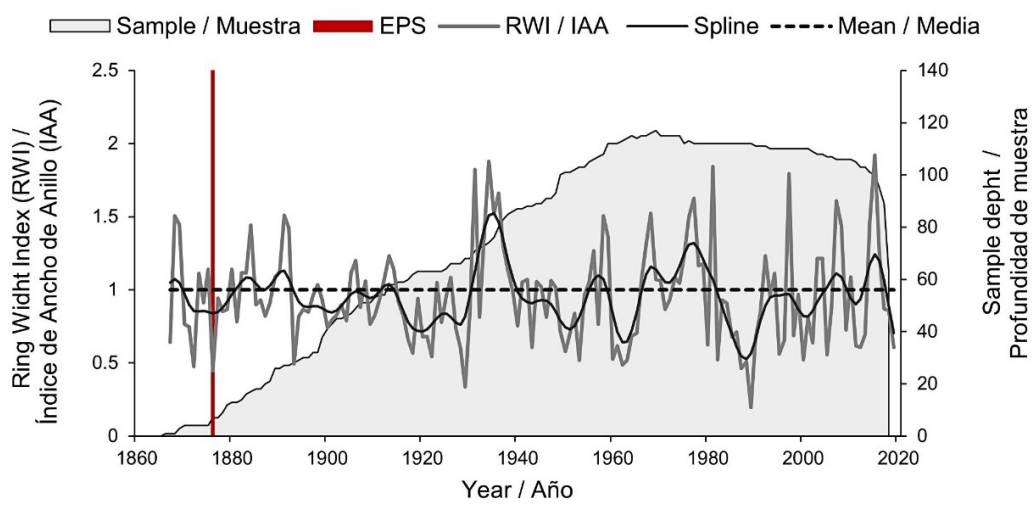


Figure 2. Annual ring width indices (RWI) chronology of *Pinus pinceana* period 1867-2019 (153 years). An EPS (Expressed Population Signal) > 0.85 was obtained from 1876. Spline stands the low frequency events at decadal level; The mean for chronology is approximately 1.0. Sample depth is the number of growth cores included in each annual value.

Figura 2. Cronología del índice de ancho de anillo (IAA) anual de *Pinus pinceana* en el periodo 1867-2019 (153 años). Se obtuvo un EPS (Expressed Population Signal) > 0.85 a partir de 1876. Spline destaca los eventos de baja frecuencia a escala decenal; la media de la cronología es aproximadamente 1.0. La profundidad de muestra es el número de núcleos de crecimiento incluidos en cada valor anual.

Table 4. Basic dendrochronological parameters of *Pinus pinceana* in Tamaulipas compared to those of Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro, and Hidalgo (Santillán-Hernández et al., 2010). Populations are arranged north-south of the Sierra Madre Oriental.

Cuadro 4. Parámetros dendrocronológicos básicos de *Pinus pinceana* en Tamaulipas comparados con los de Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro e Hidalgo (Santillán-Hernández et al., 2010). Las poblaciones están ordenadas norte-sur de la Sierra Madre Oriental.

| State / Estado  | Population / Población | Intercorrelation / Intercorrelación | Mean sensitivity / Sensibilidad media | Standard deviation / Desviación estándar | First-order autocorrelation / Autocorrelación de primer orden | Signal noise ratio / Proporción señal ruido |
|-----------------|------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Tamaulipas      | Magdaleno Aguilar      | 0.54                                | 0.31                                  | 0.33                                     | 0.28                                                          | 43.18                                       |
| Coahuila        | Las Norias             | 0.61                                | 0.53                                  | 0.32                                     | 0.21                                                          | 14.80                                       |
|                 | Palmas Altas           | 0.77                                | 0.59                                  | 0.46                                     | 0.28                                                          | 30.02                                       |
| Zacatecas       | Cañón de las Bocas     | 0.74                                | 0.49                                  | 0.38                                     | 0.27                                                          | 33.64                                       |
|                 | San José Carbonerillas | 0.72                                | 0.61                                  | 0.42                                     | 0.29                                                          | 34.63                                       |
| San Luis Potosí | Matehualilla           | 0.69                                | 0.69                                  | 0.45                                     | 0.27                                                          | 28.90                                       |
|                 | La Trinidad            | 0.69                                | 0.64                                  | 0.45                                     | 0.20                                                          | 29.41                                       |
| Querétaro       | Maguey Verde           | 0.69                                | 0.58                                  | 0.43                                     | 0.23                                                          | 11.72                                       |
|                 | El Tepozán             | 0.63                                | 0.51                                  | 0.38                                     | 0.09                                                          | 1.35                                        |
| Hidalgo         | San Cristóbal          | 0.75                                | 0.58                                  | 0.47                                     | 0.39                                                          | 15.83                                       |
|                 | El Arenalito           | 0.00                                | 0.00                                  | 0.00                                     | 0.00                                                          | 0.00                                        |

<sup>1</sup>Dating of El Arenalito population was not possible, because no growth pattern was found.

<sup>2</sup>El fechado de la población El Arenalito no fue posible, debido a que no se encontró un patrón de crecimiento.

a lower potential, particularly in the parameters of intercorrelation between series, mean sensitivity and standard deviation. Nevertheless, *P. pinceana* shows better performance in first-order autocorrelation and signal-to-noise ratio (Arroyo-Morales et al., 2023), even compared to *P. cembroides* populations from Coahuila (Constante et al., 2009). On the other hand, *P. pinceana* seems to have higher climatic sensitivity than some *P. cembroides* populations from the central part of Mexico (Carlón et al., 2018), being superior in values of intercorrelation between series, mean sensitivity and standard deviation.

The value of the statistical criteria that determine the dendrochronological potential of a species can vary depending on the geographic area, site characteristics, and the climatic variable that most limits its growth (Speer, 2010). For this reason, in addition to the geographic location of the *P. pinceana* populations, Table 5 shows other site characteristics such as slope exposure, slope, altitude, and amount of rainfall (climatic variable of the sites accessed) that provide additional information about the dendrochronological potential of the populations compared in this study.

Table 5 indicates that most populations of *P. pinceana* are established on slopes with northern exposure and steep slopes, which is consistent with that reported by López et al. (2018), according to the potential distribution of this species in northeastern part of

Acorde con el Cuadro 4, los criterios estadísticos básicos que definen el potencial dendrocronológico de *P. pinceana* en Magdaleno Aguilar, Tamaulipas, revelan que esta especie presenta valores inferiores de intercorrelación, sensibilidad media y desviación estándar comparados con los registrados por Santillán-Hernández et al. (2010); sin embargo, un aspecto muy importante a considerar es el número de muestras analizadas para el sitio Magdaleno Aguilar (124 núcleos de crecimiento), el cual duplica el tamaño de muestra que utilizaron Santillán-Hernández et al. (2010) (Cuadro 2). Esta característica sustenta, en gran medida, el valor de los parámetros dendrocronológicos de este estudio y potencia la importancia del valor bajo de autocorrelación, el cual fue similar al registrado en Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí. Con respecto a la proporción señal ruido, este valor fue superior al registrado en todas las poblaciones analizadas por Santillán-Hernández et al. (2010) (Cuadro 4).

El potencial dendrocronológico de *P. pinceana* en Tamaulipas, frente al que se ha documentado para *P. cembroides* Zucc. y *P. nelsonii* Shaw en el área de estudio, evidencia también un potencial más bajo, particularmente en los parámetros de intercorrelación entre series, sensibilidad media y desviación estándar. No obstante, *P. pinceana* muestra un mejor desempeño en la autocorrelación de primer orden y la proporción señal ruido (Arroyo-Morales et al., 2023), incluso comparada con poblaciones de *P. cembroides* procedentes de Coahuila (Constante et al., 2009). Por otra parte, *P.*

**Table 5. Site characteristics where the *Pinus pinceana* population is established in Tamaulipas and those studied by Santillán-Hernández et al. (2010), based on information from Villarreal et al. (2009). Populations are arranged north-south of the Sierra Madre Oriental.**

**Cuadro 5. Características del sitio donde se establece la población de *Pinus pinceana* en Tamaulipas y las estudiadas por Santillán-Hernández et al. (2010), a partir de la información de Villarreal et al. (2009). Las poblaciones están ordenadas norte-sur de la Sierra Madre Oriental.**

| State/<br>Estado | Population/<br>Población | Exposure/<br>Exposición | Slope (%)/<br>Pendiente (%) | Altitude (m)/<br>Altitud (m) | Annual precipitation (mm)/<br>Precipitación anual (mm) |
|------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Tamaulipas       | Magdaleno Aguilar        | N                       | 41                          | 1 200                        | 400-600                                                |
| Coahuila         | Las Norias               | N                       | 11                          | 1 800                        | 350-400                                                |
|                  | Palmas Altas             | S                       | 20                          | 2 300                        |                                                        |
| Zacatecas        | Cañón de las Bocas       | N                       | 33                          | 2 500                        | 350-400                                                |
|                  | San José Carbonerillas   | N                       | 23                          | 2 250                        |                                                        |
| San Luis Potosí  | Matehualilla             | N                       | 11                          | 2 000                        | 400-500                                                |
|                  | La Trinidad              | N                       | 39                          | 1 950                        |                                                        |
| Querétaro        | Maguey Verde             | N                       | 18                          | 2 200                        | 400-600                                                |
|                  | El Tepozán               | S                       | 25                          | 2 200                        |                                                        |
| Hidalgo          | San Cristóbal            | S                       | 35                          | 1 750                        | 400-600                                                |
|                  | El Arenalito             | S                       | 24                          | 1 900                        |                                                        |

Mean value./Valor promedio.

Mexico. The populations of Coahuila, Zacatecas and San Luis Potosí, located at higher altitudes and with lower precipitation, show greater dendrochronological potential, because these have higher values of intercorrelation between series, mean sensitivity and signal-to-noise ratio (Table 4). The dendrochronological potential of *P. pinceana*, in relation to elevation and precipitation of the sites where the species is established in Coahuila, Zacatecas and San Luis Potosí, is similar to that recorded for *P. cembroides* and *P. nelsonii* in sites with elevations between 1900 and 2000, and 1950 and 2250 m, respectively, with mean annual precipitation between 200 and 500 mm in Miquihuana, Tamaulipas (Arroyo-Morales et al., 2023).

Table 5 also shows that populations that grow at lower altitudes, with higher precipitation and, preferably, with southern exposure, have lower dendrochronological potential, as evidenced by the populations of Querétaro and Hidalgo, which show lower values of intercorrelation between series, mean sensitivity and signal-to-noise ratio. It is even possible not to find a defined growth pattern in the trees, as in the case of El Arenalito in Hidalgo (Table 4; Santillán-Hernández et al., 2010). In this regard, the low values of intercorrelation and mean sensitivity of the *P. pinceana* population in Tamaulipas are consistent with the characteristics of lower elevation and higher precipitation, highlighting this population for recording the lowest average elevation where the species grows (1200 m) (Table 5).

The value of the signal-to-noise ratio of the *P. pinceana* population in Tamaulipas is higher than that recorded with the populations compared (Table 4), even for *P. nelsonii* that inhabits near the study area (Arroyo-Morales et al., 2023). This suggests that, in addition to the altitude and precipitation characteristics of the site, other factors such as the slope of the hillside and perhaps the type of soil influence the moisture retention capacity; therefore, these are factors to consider in the climatic sensitivity of trees. Meanwhile, the evidence so far indicates that *P. pinceana* trees in Magdaleno Aguilar, Tamaulipas, are found on slopes that are on average 41 % steep, the highest value recorded among the populations analyzed (Table 5).

Based on the dendrochronological values of *P. pinceana* in the study area, which exceed the average values suggested by Grissino-Mayer (2001), especially those of autocorrelation and signal-to-noise ratio, it is supported that the radial growth of weeping pinyon in Tamaulipas is sensitive to climate. Therefore, the species has adequate dendrochronological potential; that is, the tree rings width of *P. pinceana* in Magdaleno Aguilar, Tamaulipas, is controlled mainly by climatic conditions.

*pinceana* parece tener mayor sensibilidad climática que algunas poblaciones de *P. cembroides* del centro de México (Carlón et al., 2018), siendo superior en los valores de intercorrelación entre series, sensibilidad media y desviación estándar.

El valor de los criterios estadísticos que determinan el potencial dendrocronológico de una especie puede variar en función de la zona geográfica, las características del sitio y la variable climática que más limita su crecimiento (Speer, 2010). Por esta razón, aunado a la ubicación geográfica de las poblaciones de *P. pinceana*, el Cuadro 5 presenta otras características del sitio como la exposición de ladera, la pendiente, la altitud y la cantidad de lluvia (variable climática de los sitios a la cual se tuvo acceso) que revelan información adicional sobre el potencial dendrocronológico de las poblaciones que se comparan en este estudio.

El Cuadro 5 indica que la mayoría de las poblaciones de *P. pinceana* se establecen en laderas con exposición norte y pendientes pronunciadas, lo cual es consistente con lo documentado por López et al. (2018), de acuerdo con la distribución potencial de esta especie en el noreste de México. Las poblaciones de Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí, ubicadas a mayor altitud y con menor precipitación, presentan mayor potencial dendrocronológico, debido a que estas cuentan con valores más altos de intercorrelación entre series, sensibilidad media y proporción señal ruido (Cuadro 4). El potencial dendrocronológico de *P. pinceana*, en relación con la elevación y la precipitación de los sitios donde se establece la especie en Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí, es similar al documentado en *P. cembroides* y *P. nelsonii* en sitios con elevación entre 1900 y 2000, y 1950 y 2250 m, respectivamente, con una precipitación media anual entre 200 y 500 mm en Miquihuana, Tamaulipas (Arroyo-Morales et al., 2023).

En el Cuadro 5 también se puede apreciar que las poblaciones que se desarrollan a menor altitud, con mayor precipitación y, preferentemente, con exposición sur, presentan menor potencial dendrocronológico, tal como lo evidencian las poblaciones de Querétaro e Hidalgo que muestran valores más bajos de intercorrelación entre series, sensibilidad media y proporción señal ruido. Incluso, es posible no encontrar un patrón de crecimiento definido en los árboles, como en el caso de El Arenalito en Hidalgo (Cuadro 4; Santillán-Hernández et al., 2010). En este sentido, los valores bajos de intercorrelación y de sensibilidad media de la población de *P. pinceana* en Tamaulipas son consistentes con las características de menor elevación y mayor precipitación, destacando esta población por registrar la elevación promedio más baja donde se desarrolla la especie (1200 m) (Cuadro 5).

### Climatic response of *Pinus pinceana* radial growth

The relationship between regional precipitation and radial growth of weeping pinyon for the common data period 1981-2018 (38 years) showed positive and significant response in the months of September of the previous year of growth and March, April and May of the current year. However, with the accumulated precipitation it is shown that the period of greatest influence on the radial growth of *P. pinceana* is from September of the previous year of growth to May of the current year ( $r = 0.71$ ;  $p < 0.001$ ); the coefficient of determination ( $r^2 = 0.50$ ) indicates that 50 % of the radial increase is explained by the autumn-spring precipitation. On the other hand, the most influential cumulative precipitation during the current growing year is March-May ( $r = 0.60$ ;  $p < 0.001$ ), where the coefficient of determination ( $r^2 = 0.36$ ) shows that 36 % of the radial increment is explained by spring precipitation (Figure 3a).

The relationship between regional temperature and radial growth of *P. pinceana* shows a negative response. Compared to minimum temperature, maximum temperature has a greater influence on the radial growth of weeping pinyon (Figure 3). This climatic variable significantly limits radial growth in September of the previous growth year and in January, March, April, May, and June of the current year. However, a positive and significant influence was detected in December of both the previous and current years, when in both cases, the maximum value does not exceed 32 °C (Figure 3b).

The period of maximum temperature with the greatest negative and significant influence is from September of the previous year to June of the current year ( $r = -0.64$ ;  $p < 0.001$ ) and the coefficient of determination ( $r^2 = 0.40$ ) indicates that 40 % of the decrease in the width of the rings of *P. pinceana* is explained by the maximum temperature in autumn and early summer. On the other hand, the most influential period of maximum temperature during the current growing year is March-June ( $r = -0.53$ ;  $p < 0.001$ ), where the coefficient of determination ( $r^2 = 0.28$ ) shows that 28 % of the decrease in ring width is explained by the maximum temperature of spring and early summer (Figure 3b).

The relationship between minimum temperature and radial growth of *P. pinceana* showed an equal number of negative and positive responses; however, only the positive correlation in March of the current year of growth was significant ( $r = 0.31$ ;  $p < 0.05$ ), when the maximum minimum temperature value in this month is 6.6 °C. Since no significant seasonal period of minimum temperature was detected, the period of 18 consecutive months of minimum temperature was

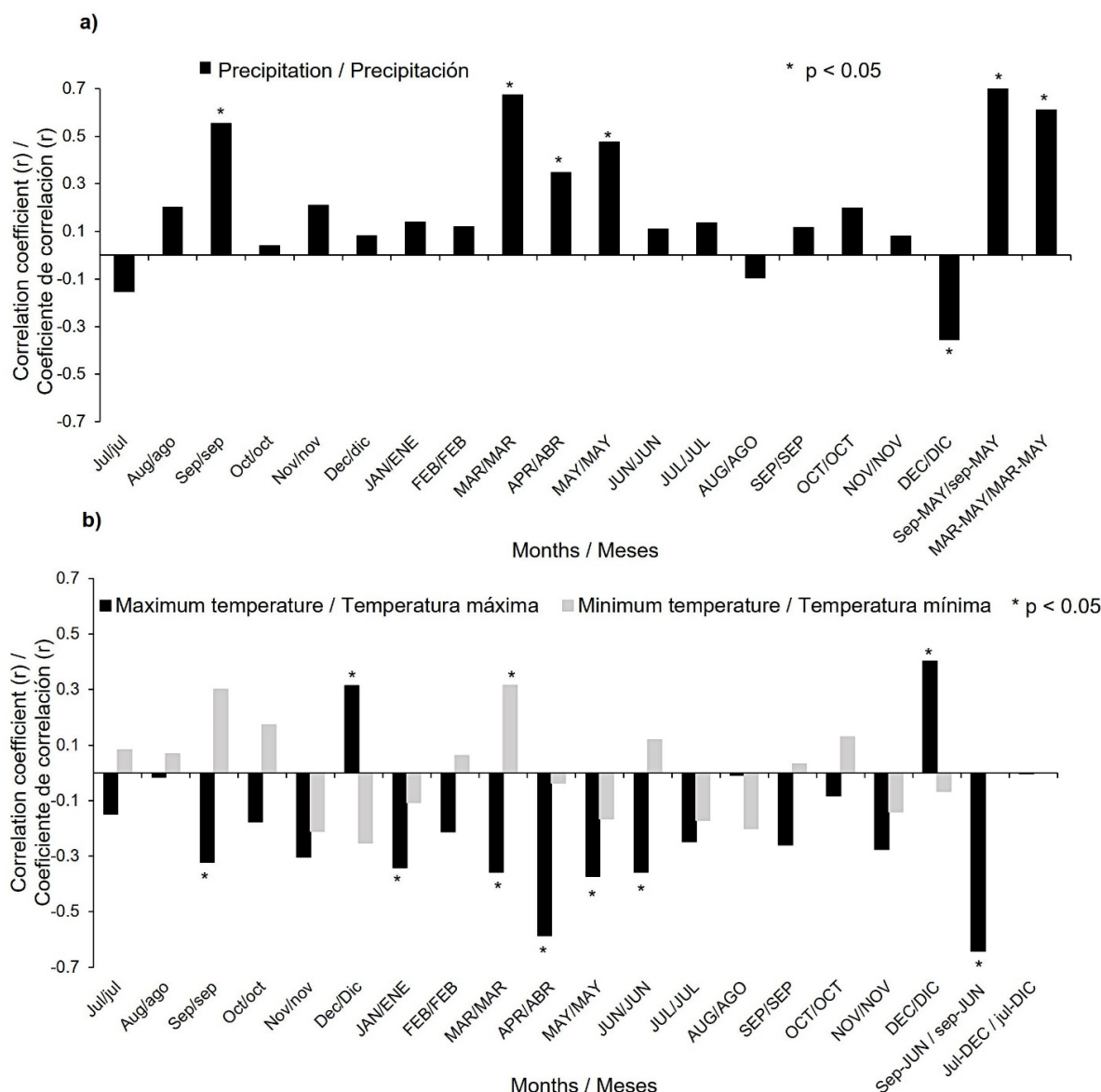
El valor de la proporción señal ruido de la población de *P. pinceana* en Tamaulipas es superior al registrado con las poblaciones comparadas (Cuadro 4), incluso para *P. nelsonii* que habita cerca del área de estudio (Arroyo-Morales et al., 2023). Esto hace pensar que, aunado a las características de altitud y precipitación del sitio, otros factores como la pendiente de la ladera y tal vez el tipo de suelo influyan en la capacidad de retención de la humedad; por lo tanto, son factores para considerar en la sensibilidad climática del arbolado. Mientras tanto, la evidencia hasta el momento indica que los árboles de *P. pinceana* en Magdaleno Aguilar, Tamaulipas, se encuentran en laderas que tienen en promedio 41 % de inclinación, el valor más alto registrado entre las poblaciones analizadas (Cuadro 5).

Con base en los valores dendrocronológicos de *P. pinceana* en el área de estudio, los cuales superan los valores promedio sugeridos por Grissino-Mayer (2001), especialmente aquellos de autocorrelación y de la proporción señal ruido, se sustenta que el crecimiento radial del piñonero llorón en Tamaulipas es sensible al clima. Por lo tanto, la especie cuenta con potencial dendrocronológico adecuado; es decir, el ancho de los anillos de crecimiento de *P. pinceana* en Magdaleno Aguilar, Tamaulipas, es controlado principalmente por las condiciones climáticas.

### Respuesta climática del crecimiento radial de *Pinus pinceana*

La relación entre la precipitación regional y el crecimiento radial del piñonero llorón para el periodo común de datos 1981-2018 (38 años) mostró respuesta positiva y significativa en los meses de septiembre del año previo de crecimiento y marzo, abril y mayo del año actual. No obstante, con la precipitación acumulada se demuestra que el periodo de mayor influencia sobre el crecimiento radial de *P. pinceana* comprende desde septiembre del año previo de crecimiento hasta mayo del año actual ( $r = 0.71$ ;  $p < 0.001$ ); el coeficiente de determinación ( $r^2 = 0.50$ ) indica que 50 % del incremento radial es explicado por la precipitación de otoño-primavera. Por otro lado, la precipitación acumulada que más influye durante el año corriente de crecimiento es la de marzo-mayo ( $r = 0.60$ ;  $p < 0.001$ ), donde el coeficiente de determinación ( $r^2 = 0.36$ ) evidencia que 36 % del incremento radial es explicado por la precipitación de primavera (Figura 3a).

La relación entre la temperatura regional y el crecimiento radial de *P. pinceana*, en general, muestra respuesta negativa. Comparada con la temperatura mínima, la temperatura máxima tiene mayor influencia sobre el crecimiento radial del piñonero llorón (Figura 3). Así, esta variable climática limita el crecimiento radial de forma significativa en septiembre del año



**Figure 3. Influence of regional climate on the radial growth of *Pinus pinceana*. Correlation coefficient between the annual ring width indices and 18 consecutive months of a) precipitation and b) temperature (maximum and minimum). Lowercase letters indicate previous year months; capital letters, current year months.**

**Figura 3. Influencia del clima regional en el crecimiento radial de *Pinus pinceana*. Coeficiente de correlación entre los índices de ancho de anillo anual y 18 meses consecutivos de precipitación (a) y temperaturas máxima y mínima (b). Las letras minúsculas indican los meses del año anterior; las mayúsculas, meses del año actual.**

correlated with the radial growth of *P. pinceana*. Thus, a non-significant negative correlation ( $r = -0.00078$ ;  $p > 0.05$ ) of minimum temperature on radial growth of *P. pinceana* was recorded (Figure 3b).

In Tamaulipas, the response of *P. pinceana* to precipitation shows that this variable is the most limiting factor for the radial growth of the species, where precipitation in September, which accumulates with that from October to February, enhances its radial growth during March, April and May (Figure 3). This

previo de crecimiento y enero, marzo, abril, mayo y junio del año actual; sin embargo, se detectó influencia positiva y significativa en diciembre del año previo y del año actual, cuando en ambos casos el valor máximo no supera los 32 °C (Figura 3b).

El periodo de temperatura máxima con mayor influencia negativa y significativa es de septiembre del año previo a junio del año actual ( $r = -0.64$ ;  $p < 0.001$ ) y el coeficiente de determinación ( $r^2 = 0.40$ ) indica que 40 % de la disminución en el ancho de los anillos de *P.*

climatic response is consistent with the documented evidence for radial growth of *P. cembroides* and *P. nelsonii* in the study area (Arroyo-Morales et al., 2023).

The radial growth response of weeping pinyon in Tamaulipas is consistent with the general response of conifers in the northeastern part of Mexico, which do not react immediately to torrential rains such as those of September but need moisture to be available in the soil for later use. Thus, the moisture available in the soil profile as a result of the September rains, combine with the moisture that infiltrates during the winter after cold fronts, is used when trees emerge from dormancy and reactivate their metabolic functions during the spring growing season (Arroyo-Morales et al., 2023; Constante et al., 2009).

Although it has been demonstrated in this study that precipitation has a greater influence on the radial growth of *P. pinceana*, this does not mean that this variable acts independently of temperature. Thus, the gradual decrease of this climatic factor from September until winter also allows a lower degree of evapotranspiration in the region. Thus, at the beginning of the growing season in March, precipitation in this month stands out among all the months where *P. pinceana* has a positive response (Figure 3a). This could indicate an adequate combination between the available soil moisture and the environmental temperature that begins to increase in March but is not yet stressful for the physiology of the trees (the extreme value of maximum temperature in February is 34.6 and 37.8 °C in March, compared to 39.2 and 40.8 °C in April and May, respectively).

Since the radial growth of conifers in the northeastern part of Mexico generally responds better to precipitation, there is more information available on the interaction between these two variables. However, to date, the only dendroclimatic study on *P. pinceana* that addresses its response to precipitation is that of Santillán-Hernández et al. (2010). Therefore, the present study relies on this reference to compare the species' response to the common climate variable.

Santillán-Hernández et al. (2010) report that the radial growth of *P. pinceana* populations in northeastern Mexico (Coahuila) respond significantly to rainfall in December of the previous year, and February, May and July of the current year. Populations in central-northern Mexico, represented by the states of Zacatecas and San Luis Potosí, respond to rainfall in December of the previous year, and January, February, March, May and July of the current year. In Tamaulipas, the response of *P. pinceana* to rainfall (this study) only finds synchrony with the results of Santillán-Hernández et al. (2010), in the positive and significant response to

*pinceana* es explicado por la temperatura máxima del otoño y principios de verano. Por otra parte, el periodo de temperatura máxima que más influye durante el año corriente de crecimiento es marzo-junio ( $r = -0.53$ ;  $p < 0.001$ ), donde el coeficiente de determinación ( $r^2 = 0.28$ ) evidencia que 28 % de la disminución en el ancho de los anillos es explicado por la temperatura máxima de la primavera y principios del verano (Figura 3b).

La asociación entre la temperatura mínima y el crecimiento radial de *P. pinceana* mostró un número igual de respuestas negativas y positivas; sin embargo, solo la correlación positiva en marzo del año actual de crecimiento fue significativa ( $r = 0.31$ ;  $p < 0.05$ ), cuando el valor máximo de temperatura mínima en este mes es de 6.6 °C. Debido a que no se detectó algún periodo estacional de temperatura mínima significativo, se correlacionó el periodo de 18 meses consecutivos de temperatura mínima con el crecimiento radial de *P. pinceana*. De esta forma, se obtuvo una correlación negativa no significativa ( $r = -0.00078$ ;  $p > 0.05$ ) de la temperatura mínima sobre el crecimiento radial de *P. pinceana* (Figura 3b).

En Tamaulipas, la respuesta de *P. pinceana* a la precipitación evidencia que esta variable es la que más limita el crecimiento radial de la especie, donde la precipitación de septiembre, que se acumula con la de octubre a febrero, potencia su crecimiento radial durante marzo, abril y mayo (Figura 3). Esta respuesta climática es consistente con la evidencia documentada para el crecimiento radial de *P. cembroides* y *P. nelsonii* en el área de estudio (Arroyo-Morales et al., 2023).

La respuesta del crecimiento radial del piñonero llorón en Tamaulipas es consistente con la respuesta que presentan en general las coníferas del noreste de México, las cuales no reaccionan de forma inmediata a las precipitaciones torrenciales como las de septiembre, sino que necesitan que la humedad esté disponible en el suelo para su uso posterior. Así, la humedad disponible en el perfil del suelo a consecuencia de las lluvias de septiembre, sumada a la que logra infiltrarse durante el invierno tras los frentes fríos, se aprovecha cuando los árboles salen de la dormancia y reactivan sus funciones metabólicas durante la estación de crecimiento en primavera (Arroyo-Morales et al., 2023; Constante et al., 2009).

Pese a que se ha demostrado en el presente estudio que la precipitación tiene mayor influencia sobre el crecimiento radial de *P. pinceana*, no significa que esta variable actúe independientemente de la temperatura. Así, la disminución gradual de este factor climático a partir de septiembre y hasta el invierno permite también un menor grado de evapotranspiración en la región. De tal manera que, al llegar el inicio de la

the months of March and May of the current year of growth (Table 6). Regarding the response to a period of accumulated rainfall, the populations analyzed by Santillán-Hernández et al. (2010) show sensitivity to seasonal rainfall from January of the previous year of growth to July of the current year; that is, they are consistent with winter rainfall in early summer. On the other hand, the weeping pinyon in Tamaulipas shows to be more responsive to precipitation from September of the previous year of growth to May of the current year; that is, an autumn-spring period and in lower altitude zones (Figure 3a; Table 6).

The radial growth response of *P. pinceana*, from a cumulative precipitation starting in September of the previous year, differs from that documented for other pinyon species such as *P. cembroides* and *P. nelsonii*, which usually respond starting in November or December of the previous year (Arroyo-Morales et al., 2023; Carlón et al., 2018; Constante et al., 2009). However, the response of *P. pinceana* to precipitation in the current year (March-May) is consistent with the behavior of *P. cembroides* and *P. nelsonii* in the study area (Arroyo-Morales et al., 2023). Thus, once the soil has available moisture (from the previous year's precipitation) during March, April and May (months of higher solar radiation and high temperatures), a minimum amount of rainfall (24 % of the annual precipitation in spring) is what enhances the growth of *P. pinceana* (CONAGUA, 2020).

The response of *P. pinceana* to precipitation in the southwestern part of Tamaulipas reflects precipitation conditions outside of the intra-summer drought or midsummer drought period that naturally occurs between July and August in the study area (Corrales-Suastegui et al., 2020; Sánchez-Santillán et al., 2018).

estación de crecimiento en marzo, la precipitación de este mes destaca entre todos los meses donde *P. pinceana* tiene respuesta positiva (Figura 3a). Esto podría indicar una combinación adecuada entre la humedad disponible en el suelo y la temperatura ambiental que empieza a incrementar en marzo, pero que aún no es estresante para la fisiología del arbolado (el valor extremo de temperatura máxima de febrero es 34.6 y el de marzo de 37.8 °C, comparado con el de abril y mayo de 39.2 y 40.8 °C, respectivamente).

Debido a que el crecimiento radial de las coníferas del noreste de México, en general, responde mejor a la precipitación, existe más información sobre la interacción entre estas dos variables. No obstante, hasta el momento, el único estudio dendroclimático sobre *P. pinceana* que aborda su respuesta a la precipitación es el de Santillán-Hernández et al. (2010), por lo que el presente trabajo se apoya en esta referencia para comparar la respuesta de la especie a la variable climática en común.

Santillán-Hernández et al. (2010) documentan que el crecimiento radial de las poblaciones de *P. pinceana* en el noreste de México (Coahuila) responden de forma significativa a la lluvia de diciembre del año previo, y febrero, mayo y julio del año actual. En cuanto a las poblaciones del centro-norte, representadas por los estados de Zacatecas y San Luis Potosí, responden a la lluvia de diciembre del año previo, y enero, febrero, marzo, mayo y julio del año actual. En Tamaulipas, la respuesta de *P. pinceana* a la precipitación (este trabajo) solo encuentra sincronía con los resultados de Santillán-Hernández et al. (2010), en la respuesta positiva y significativa de los meses de marzo y mayo del año actual de crecimiento (Cuadro 6). En cuanto a

Table 6. Influence of precipitation on the radial growth of *P. pinceana* in Tamaulipas and those studied by Santillán-Hernández et al. (2010) in Coahuila, Zacatecas and San Luis Potosí. Populations are arranged north-south of the Sierra Madre Oriental.

Cuadro 6. Influencia de la precipitación sobre el crecimiento radial de *Pinus pinceana* en Tamaulipas y las estudiadas por Santillán-Hernández et al. (2010) en Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí. Las poblaciones están ordenadas norte-sur de la Sierra Madre Oriental.

| State / Estado              | Mean altitude (m) / Altitud promedio (m) | Months with significant influence / Meses con influencia significativa                            | Response period / Periodo de respuesta                            |
|-----------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Tamaulipas                  | 1 200                                    | September, March, April and May / Septiembre, marzo, abril y mayo                                 | Autumn-Spring (September-May) / Otoño-primavera (septiembre-mayo) |
| Coahuila                    | 2 050                                    | December, February, May and July / Diciembre, febrero, mayo y julio                               | Winter-Summer (January-July) / Invierno-verano (enero-julio)      |
| Zacatecas y San Luis Potosí | 2 175                                    | December, January, February, March, May and July / Diciembre, enero, febrero, marzo, mayo y julio | Winter-Summer (January-July) / Invierno-verano (enero-julio)      |

Thus, the potential of the weeping pinyon to record precipitation variability during the seasonal period from September of the previous year to May of the current year is demonstrated. This information could be useful for further studies of precipitation reconstruction and droughts that have occurred in the region (Stahle et al., 2016); however, it is recommended to increase the number of dendroclimatic studies that address *P. pinceana* in Tamaulipas, to verify if the same response to climatic variables is maintained, once more populations are incorporated at different elevations.

## Conclusions

This study represents the first dendroclimatic research that addresses *Pinus pinceana* in Tamaulipas and provides 153 years of information (1867-2019) on variability of radial growth, which is determined by both maximum temperature and precipitation with the latter being the more significant factor. Therefore, the dendrochronological potential of *P. pinceana* is demonstrated as an alternative source of long-term climatic information. This knowledge can be applied in future studies, not only to reconstruct the region's historical precipitation and analyze drought patterns but also to improve water resource management and support conservation efforts for this endangered species.

## Acknowledgments

We thank the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions, which helped improve this manuscript.

*End of English version*

## References / Referencias

- Arroyo-Morales, S., Astudillo-Sánchez, C. C., Aguirre-Calderón, O. A., Villanueva-Díaz, J., Soria-Díaz, L., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2023). A precipitation reconstruction based on pinyon pine tree rings from the northeastern Mexican subtropic. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1-2), 635–649. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04303-1>
- Bunn, A., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Mérian, P., Qeadan, F., Zang, C., Buras, A., Cecile, A., Mudelsee, M., Schulz, M., Klesse, S., Frank, D., Visser, R., Cook, Ed. & Anchukaitis, K. (2024). *Dendrochronology program library in R*. <https://cran.r-project.org/web/packages/dplR/dplR.pdf>
- Buras, A. (2017). A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia*, 44, 130–132. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.005>
- Carlón, T., Mendoza, M. E., Villanueva, J., & Li, Y. (2018). Climatic response of *Pinus cembroides* Zucc. radial growth in Sierra del

la respuesta a un periodo de precipitación acumulada, las poblaciones analizadas por Santillán-Hernández et al. (2010) muestran sensibilidad a la lluvia estacional de enero del año previo de crecimiento a julio del año actual; es decir, son consistentes con la precipitación de invierno a principios del verano. Por su parte, el piñonero llorón en Tamaulipas muestra ser más receptivo a la precipitación de septiembre del año previo de crecimiento a mayo del año actual; es decir, un periodo otoño-primavera y en zonas de menor altitud (Figura 3a; Cuadro 6).

La respuesta del crecimiento radial de *P. pinceana*, a partir de una precipitación acumulada que inicia en septiembre del año previo, difiere de lo documentado para otros pinos piñoneros como *P. cembroides* y *P. nelsonii*, los cuales usualmente responden a partir de noviembre o diciembre del año previo (Arroyo-Morales et al., 2023; Carlón et al., 2018; Constante et al., 2009). No obstante, la respuesta de *P. pinceana* a la precipitación del año actual (marzo-mayo) es consistente con el comportamiento de *P. cembroides* y *P. nelsonii* en el área de estudio (Arroyo-Morales et al., 2023). De tal manera que, una vez que el suelo tiene humedad disponible (procedente de la precipitación del año anterior) durante marzo, abril y mayo (meses de mayor radiación solar y temperaturas elevadas), una cantidad mínima de lluvia (24 % de la precipitación anual en primavera) es la que potencia el crecimiento de *P. pinceana* (CONAGUA, 2020).

La respuesta de *P. pinceana* a la precipitación del suroeste de Tamaulipas refleja las condiciones de precipitación fuera del periodo de sequía intraestival o sequía de medio verano que se presenta de manera natural entre julio y agosto en el área de estudio (Corrales-Suastegui et al., 2020; Sánchez-Santillán et al., 2018). De esta manera, se demuestra el potencial del piñonero llorón para registrar la variabilidad de la precipitación durante el periodo estacional septiembre del año previo a mayo del año actual. Esta información podría ser de utilidad para estudios posteriores de reconstrucción de precipitación y de las sequías que se han presentado en la región (Stahle et al., 2016); sin embargo, se sugiere incrementar el número de estudios dendroclimáticos que aborden a *P. pinceana* en Tamaulipas, para verificar si se mantiene la misma respuesta a las variables climáticas, una vez que se incorporen más poblaciones a diferente elevación.

## Conclusiones

Este estudio representa el primer trabajo dendroclimático que aborda a *Pinus pinceana* en Tamaulipas y aporta 153 años de información (1867-2019) sobre la variabilidad del crecimiento radial, el cual está determinado tanto por la temperatura máxima

- Cubo, Guanajuato, Mexico. *Trees*, 32(5), 1387 – 1399. <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1720-1>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Organismo de cuenca golfo norte, Tamaulipas (Oficina de gobierno local en Ciudad Victoria, Tamaulipas)*. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/golfo-norte>
- Constante, V., Villanueva, J., Cerano, J., Cornejo, E. H., & Valencia, S. (2009). Dendrochronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17 – 39. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-35862009000200002&lng=es&tlng](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000200002&lng=es&tlng)
- Cook, E. R., & Holmes, R. H. (1999). Program ARSTAN: Chronology development with statistical analysis. <https://sheppard.ltrr.arizona.edu/DISC2019/arstan.txt>
- Corrales-Suastegui, A., Fuentes-Franco, R., & Pavia, E. G. (2020). The mid-summer drought over Mexico and Central America in the 21st century. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1703 – 1715. <https://doi.org/10.1002/joc.6296>
- Cortés-Cortés, O., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Flores-López, C., & Valencia-Manzo, S. (2021). Relationship between climate variability and radial growth of *Pinus montezumae* Lamb. in Coyuca de Catalán, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(1), 109 – 126. <http://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.03.012>
- Favela, S., & Thomas, P. (2013). *Pinus pinceana*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: E.T32629A2822604. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32629A2822604>
- Favela, S., Velazco, C. G., & Alanís, G. J. (2009). *Pinus pinceana* (Pinaceae), nuevo registro para el estado de Nuevo León, México. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas*, 3(2), 771 – 774. <https://www.researchgate.net/publication/289160617>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205 – 221. <http://hdl.handle.net/10150/251654>
- Gutiérrez, E. (2009). La dendrochronología: métodos y aplicaciones. En M. Á. Cau, & F. X. Nieto (Eds.), *Arqueología náutica mediterránea* (pp. 309 – 322). Centre d'Arqueologia Subacuàtica de Catalunya.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69 – 78. <http://hdl.handle.net/10150/261223>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). *Espacio y datos de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espaciodydatos/>
- López, J. I., Marroquín, J. J., & Treviño, E. J. (2018). Modelo de la distribución potencial de *Pinus pinceana* Gord en el noreste de México. *Revista Ciencia UANL*, 21(89), 1 – 15. <https://doi.org/10.29105/cienciauanl21.89-4>
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. B., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313 – 330. <https://www.redalyc.org/pdf/568/56842304.pdf>
- como por la precipitación, esta última en mayor medida. Por lo anterior, se demuestra el potencial dendrocronológico de *P. pinceana* como una fuente alternativa de información climática de largo alcance. Dicho conocimiento puede utilizarse en trabajos futuros, no solo para reconstruir la precipitación histórica de la región y estudiar su patrón de sequías, sino también para hacer un mejor uso del recurso hídrico y contribuir en los planes de conservación de esta especie en peligro de extinción.

## Agradecimientos

Agradecemos a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios y sugerencias que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

## Fin de la versión en español

- Martínez-Ávalos, J. G., Sánchez-Castillo, C., Martínez-Gallegos, R., Sánchez-Ramos, G., Trejo, I., Mora-Olivo, A., & Alanís, E. (2015). Primer registro de *Pinus Pinceana* (Pinaceae) para Tamaulipas: Aspectos ecológicos y estructurales. *Botanical Sciences*, 93(2), 357 – 360. <https://doi.org/10.17129/botsci.87>
- Sánchez-Castillo, C., Wehenkel, C., Golubov, J., Vanoye-Eligio, V., Martínez-Gallegos, R., De la Rosa-Manzano, E., Torres-Castillo, J. A., & Martínez-Ávalos, J. G. (2022). Estructura y composición de los bosques de *Pinus pinceana* Gordon (Pinaceae), en el noreste de México. *Botanical Sciences*, 100(4), 1058 – 1072. <https://doi.org/10.17129/botsci.2946>
- Sánchez-Santillán, N., Binnquíst, G. S., & Garduño, R. (2018). Sequía intraestival en La Reserva de la Biosfera El Cielo y su entorno, Tamaulipas, México. *Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía*, 27(1), 146 – 168. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281854495010>
- Santillán-Hernández, M., Cornejo-Oviedo, E. H., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., & Capó-Arteaga, M. Á. (2010). Potencial dendroclimático de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques*, 16(1), 17 – 30. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1611177>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014). *Inventario Forestal y de suelos-Tamaulipas 2014*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD002876.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). *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*. México: Diario Oficial de la Federación. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4254/semarnat/semarnat.htm>
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. [https://www.researchgate.net/publication/259466472\\_Fundamentals\\_of\\_Tree\\_Ring\\_Research](https://www.researchgate.net/publication/259466472_Fundamentals_of_Tree_Ring_Research)
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin, D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenenson,

- M. C. A., Szejner, P., & Howard, I. M. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34–60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press.
- Velmex Inc. (2023). *Velmex tree ring measuring system (TA)* [Apparatus and software]. [https://www.velmex.com/Products/Pre-configured\\_Systems/Tree\\_Ring\\_Measuring\\_System.html](https://www.velmex.com/Products/Pre-configured_Systems/Tree_Ring_Measuring_System.html)
- Villanueva, J., Vázquez, L., Estrada, J., Martínez, A. R., Cerano, J., Canizales, P. A., Franco, O., & Reyes, F. (2018). Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Revista Mexicana Ciencias Forestales*, 9(49), 165–187. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.128>
- Villanueva-Díaz, J., Castruita-Esparza, L. U., Martínez-Sifuentes, A. R., Loera-Chaparro, R., & Estrada-Ávalos, J. (2020). Variabilidad hidroclimática del suroeste de Chihuahua inferida con anillos de crecimiento de coníferas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(3), 373–389. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.09.071>
- Villarreal, J. Á., Mares, O., Cornejo, E., & Capó, M. A. (2009). Estudio florístico de los piñonares de *Pinus pinceana* Gordon. *Acta Botanica Mexicana*, 89(1), 87–124. <https://abm.ojs.inecol.mx/index.php/abm/article/view/308/478>
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>