



Climatic effects on radial growth of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in the Sierra Madre Occidental, Mexico

Influencia climática en el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en la Sierra Madre Occidental, México

¹Juan Ramírez-Méndez¹; ²Eladio H. Cornejo-Oviedo¹; ³Julián Cerano-Paredes^{2*};

⁴Jorge Méndez-González¹; ⁵Celestino Flores-López¹; ⁶Judith Reyes-Flores¹;

⁷Sergio I. Jiménez-Jiménez²; ⁸Rosalinda Cervantes-Martínez¹; ⁹Víctor H. Cambrón-Sandoval³

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento Forestal. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista. C. P. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA). km 6.5, Margen Derecha del Canal Sacramento. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

³Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales. Avenida de las Ciencias s/n, Delegación Santa Rosa Jáuregui, Juriquilla. C. P. 76230. Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

*Corresponding author: cerano.julian@gmail.com

Abstract

Introduction. Global warming increases vapor pressure deficit (VPD) by raising temperature, a condition that negatively affects the growth of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Objectives. To develop a regional tree-ring chronology of *P. menziesii* and evaluate the influence of climatic variables on radial growth.

Materials and methods. Samples were collected from four sites in Durango and Chihuahua in the Sierra Madre Occidental. They were processed following standard dendrochronological techniques. Crossdating was validated using COFECHA, and ring-width index (RWI) series were generated with the *dplR* package. Climatic variables were obtained from ERA5-Land, and their relationship with RWI was assessed using the *treeclim* package in R. Common growth variability among sites was determined through Pearson correlation analysis and principal component analysis (PCA).

Results and discussion. Four *P. menziesii* chronologies were developed. The PCA identified a common climatic response, and a 369-year regional series (1655-2023) was constructed. This series showed a positive relationship between RWI and precipitation from November of the previous year to May of the current year ($r = 0.76$; $p < 0.05$), and significant negative relationships ($p < 0.05$) between RWI and minimum temperature from March to June of the current year ($r = -0.59$), maximum temperature ($r = -0.82$), and VPD from January to June ($r = -0.84$).

Conclusion. Increases in maximum temperature and VPD intensify atmospheric drought and contribute to reduced radial growth of *P. menziesii* in the Sierra Madre Occidental.

Keywords: vapor pressure deficit, dendrochronology, ring-width index (RWI), precipitation, temperature.

Resumen

Introducción. El calentamiento global incrementa el déficit de presión de vapor (DPV) al elevar la temperatura, situación que afecta negativamente el crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Objetivos. Desarrollar una cronología regional de anillos de *P. menziesii* y evaluar la influencia de variables climáticas en el crecimiento radial.

Materiales y métodos. Las muestras se colectaron en cuatro sitios de Durango y Chihuahua en la Sierra Madre Occidental. Estas se procesaron según técnicas dendrocronológicas estándar. El fechado se validó con COFECHA y se generaron series de índice de ancho de anillo (IAA) con el paquete *dplR*. Las variables climáticas se obtuvieron de ERA5-Land y la relación con el IAA se estableció con el paquete *treeclim* en R. La variabilidad común del crecimiento entre sitios se determinó con análisis de correlación de Pearson y análisis de componentes principales (ACP).

Resultados y discusión. Se generaron cuatro cronologías de *P. menziesii*. El ACP determinó una respuesta climática común y se integró una serie regional de 369 años (1655-2023). Esta mostró relación positiva del IAA con la precipitación de noviembre del año previo a mayo del año actual ($r = 0.76$; $p < 0.05$) y relaciones negativas significativas ($p < 0.05$) del IAA con la temperatura mínima de marzo a junio del año actual ($r = -0.59$), la temperatura máxima ($r = -0.82$) y el DPV de enero a junio ($r = -0.84$).

Conclusión. El aumento de la temperatura máxima y del DPV amplifica la sequía atmosférica e impacta en la reducción del crecimiento radial de *P. menziesii* en la Sierra Madre Occidental.

Palabras clave: déficit de presión de vapor, dendrocronología, índice de ancho de anillo, precipitación, temperatura.

Please cite this article as follows (APA 7): Ramírez-Méndez, J., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Méndez-González, J., Flores-López, C., Reyes-Flores, J., Jiménez-Jiménez, S. I., Cervantes-Martínez, R., & Cambrón-Sandoval, V. H. (2026). Climatic effects on radial growth of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 32, e25024. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2025.06.024>



Introduction

Climate change significantly affects forest ecosystems, primarily through the increase in global temperature, projected to range between 1.4 and 4.4 °C by the end of the century (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). This warming alters vegetation dynamics and structure by reducing tree growth, increasing water stress, and elevating tree mortality (Hammond et al., 2022; Novick et al., 2024).

In temperate regions of Mexico, coniferous forests largely depend on water availability, particularly on winter precipitation that is gradually released as moisture during spring, when trees resume growth (Cerano-Paredes et al., 2023; Cervantes-Martínez et al., 2025; Cortés-Cortés et al., 2021; Villanueva-Díaz et al., 2020). Within this ecosystem, *P. menziesii* is a relict species of cloud forest, confined to ravines with high moisture availability (González-Elizondo et al., 2017). This species is key in dendrochronological studies, because its annual growth rings record and enable the identification of environmental and climatic changes over time (Fritts, 1976; Howard et al., 2021; Morales-Estrada et al., 2025).

Vapor pressure deficit (VPD), defined as the difference between saturation vapor pressure and the actual air vapor pressure, reflects atmospheric dryness and the evaporative demand imposed on plants (Grossiord et al., 2020). Under climate change, VPD is expected to increase as a consequence of rising air temperatures (Breshears et al., 2013). This increase induces stomatal closure as a protective mechanism to limit water loss through transpiration (Jalakas et al., 2021).

Several studies have reported a marked global increase in VPD in recent decades (Barkhordarian et al., 2019; Broz et al., 2021; Grossiord et al., 2020). Recent tree-ring studies have identified rising VPD and temperature as major constraints on tree growth (Babst et al., 2019; Groenendijk et al., 2025; Zuidema et al., 2022).

In Mexico, over the past two decades, research has been dominated by studies focusing on the relationship between tree-ring width and climatic variables (Morales-Estrada et al., 2025); however, relatively few studies have incorporated VPD into growth response analyses. Notable exceptions include the studies by Correa-Díaz et al. (2020) and Pompa-García et al. (2022). More recently, Cerano-Paredes et al. (2024) conducted the first study specifically examining the influence of VPD on the growth of *P. menziesii*.

Given the physiological sensitivity of *P. menziesii* to environmental change, it is essential to understand how variations in water availability and VPD influence radial growth. This study contributes to understanding

Introducción

El cambio climático afecta significativamente a los ecosistemas forestales, principalmente por el aumento de la temperatura global, proyectado entre 1.4 y 4.4 °C hacia finales del siglo (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023). Este incremento térmico impacta la dinámica y estructura de la vegetación al provocar reducción del crecimiento arbóreo, mayor estrés hídrico y aumento en la mortalidad arbórea (Hammond et al., 2022; Novick et al., 2024).

En zonas templadas de México, los bosques de coníferas dependen en gran medida de la disponibilidad de agua, especialmente de la precipitación invernal que se libera gradualmente como humedad durante la primavera, cuando los árboles reanudan su crecimiento (Cerano-Paredes et al., 2023; Cervantes-Martínez et al., 2025; Cortés-Cortés et al., 2021; Villanueva-Díaz et al., 2020). Dentro de este ecosistema, *P. menziesii* representa un elemento relicto de los bosques montañosos, la cual se encuentra restringida a barrancas con disponibilidad alta de humedad (González-Elizondo et al., 2017). Esta especie es clave en estudios dendrocronológicos, ya que sus anillos de crecimiento anual registran y permiten la identificación de cambios ambientales y climáticos a lo largo del tiempo (Fritts, 1976; Howard et al., 2021; Morales-Estrada et al., 2025).

El déficit de presión de vapor (DPV), definido como la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor real del aire, indica el grado de sequedad atmosférica y la presión evaporativa sobre las plantas (Grossiord et al., 2020). Con el cambio climático, el DPV aumenta como resultado de cambios en la temperatura del aire (Breshears et al., 2013). Tal incremento provoca el cierre estomático como mecanismo de defensa ante la reducción de pérdida de agua por transpiración (Jalakas et al., 2021).

Diversos estudios han señalado notable aumento en el DPV a nivel global en las últimas décadas (Barkhordarian et al., 2019; Broz et al., 2021; Grossiord et al., 2020). Estudios recientes con anillos de árboles identifican el aumento del DPV y la temperatura como una limitación importante para el crecimiento de los árboles (Babst et al., 2019; Groenendijk et al., 2025; Zuidema et al., 2022).

En México, en los últimos 20 años, destaca la dominancia de estudios centrados en la relación entre el ancho de los anillos de crecimiento y las variables climáticas (Morales-Estrada et al., 2025), pero son pocas las investigaciones que han considerado el DPV en sus análisis de respuesta del crecimiento. Entre ellos destacan los trabajos de Correa-Díaz et al. (2020) y Pompa-García et al. (2022). Recientemente, Cerano-Paredes et al. (2024) realizaron el primer análisis específico sobre la influencia del DPV en el crecimiento de *P. menziesii*.

the response of *P. menziesii* forest in the Sierra Madre Occidental (SMOc) to increasing temperature and VPD. The objectives were to: (1) develop a regional tree-ring chronology for *P. menziesii*, and (2) assess the influence of climatic variables such as precipitation, minimum and maximum temperatures, and VPD on the radial growth of *P. menziesii*. We hypothesize that VPD constrains the growth of *P. menziesii* more strongly than other commonly analyzed climatic variables, such as maximum and minimum temperatures.

Materials and Methods

Study area

This study was carried out at four sites in the SMOc (Figure 1A): Campo Verde (CAM) located in the ejido El Largo y Anexos, municipality of Madera; Arroyo Laja Prieta (ALP) located in the ejido El Ranchito, municipality of Bocoyna, both sites in the state of Chihuahua; El Tarahumar (TAR) belonging to the community of El Tarahumar y Bajíos del Tarahumar, municipality of Tepehuanes; and El Brillante (BRI) located in the ejido El Brillante, municipality of Pueblo Nuevo, both sites in the state of Durango (Figure 1B).

Dada la sensibilidad fisiológica de *P. menziesii* a los cambios ambientales, es fundamental comprender cómo las variaciones en la disponibilidad hídrica y el DPV influyen en el crecimiento radial. Este estudio contribuye al conocimiento sobre la respuesta de los bosques de *P. menziesii* en la Sierra Madre Occidental (SMOc) frente al aumento de temperatura y el DPV. Los objetivos fueron: (1) desarrollar una cronología regional de anillos de crecimiento de *P. menziesii* y (2) evaluar la influencia de variables climáticas como la precipitación, las temperaturas mínima y máxima y el DPV en el crecimiento radial de *P. menziesii*. Se plantea como hipótesis de investigación que el DPV limita el crecimiento de *P. menziesii* en mayor medida que otras variables climáticas (temperaturas máximas y mínimas) analizadas comúnmente para esta especie.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en cuatro sitios de la SMOc (Figura 1A): Campo Verde (CAM) localizado en el ejido El Largo y Anexos, municipio de Madera; Arroyo Laja Prieta (ALP) ubicado en el ejido El Ranchito, municipio

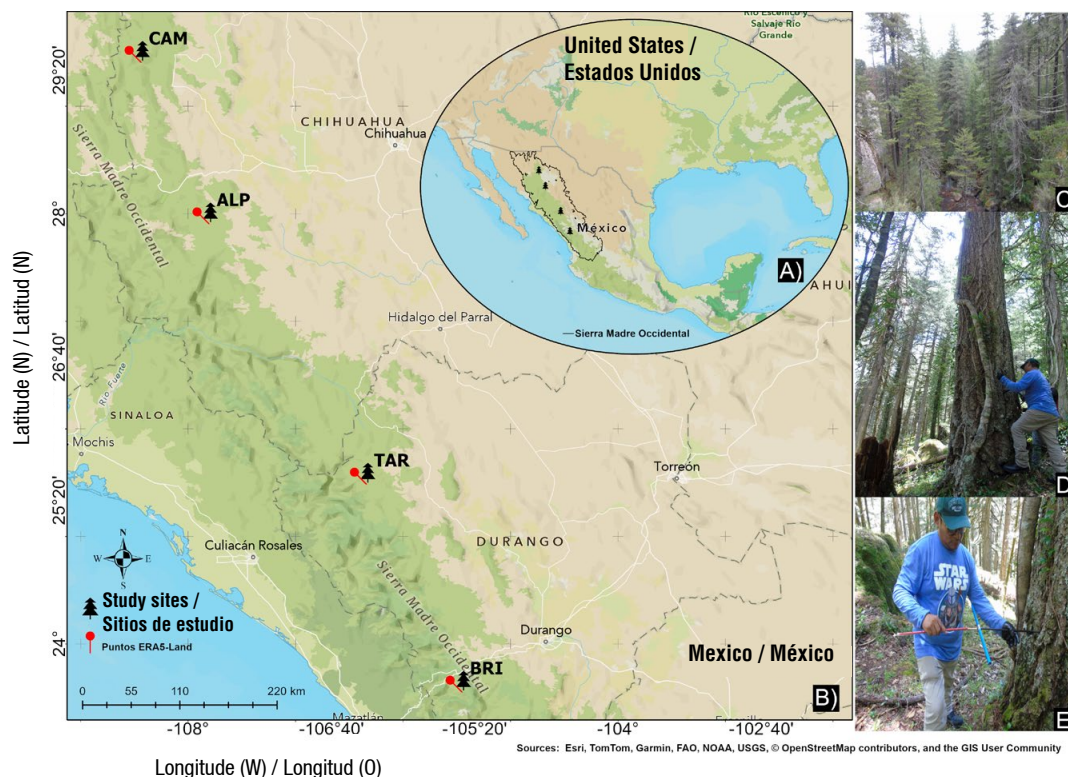


Figure 1. A) Geographic location of the study area in the Sierra Madre Occidental. B) Location of the *Pseudotsuga menziesii* sampling sites: Campo Verde (CAM), Arroyo Laja Prieta (ALP), El Tarahumar (TAR) and El Brillante (BRI); red points indicate the location where observed climatic data were extracted. C, D and E) Collection of *P. menziesii* increment cores.

Figura 1. (A) Localización geográfica del área de estudio en la Sierra Madre Occidental. (B) Ubicación de los sitios de muestreo de *Pseudotsuga menziesii*: Campo Verde (CAM), Arroyo Laja Prieta (ALP), El Tarahumar (TAR) y El Brillante (BRI); en color rojo se muestran los puntos de extracción de la información climática observada. C, D y E) Colecta de núcleos de crecimiento de *P. menziesii*.

The geological substrate of the sites consists of acidic extrusive igneous rocks (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2005) and three soil groups are present: Umbrisols, Regosols, and Leptosols (IUSS Working Group [WRB], 2022). The climate is classified as temperate humid, with a mean temperature of the coldest month ranging from -3 to 18 °C and annual precipitation of 800 to 1200 mm (García, 2004). The vegetation corresponds to a mixed pine-oak forest (Rzedowski, 2006).

Chronology development

Samples were collected in July, August and October 2024. Trees with a long-live appearance were selected based on characteristics such as spiral-shaped stems and thick, dropping branches; whenever possible, trees growing under conditions of shallow soils, steep slopes, and low stand disturbance were chosen (Cerano-Paredes et al., 2022). From a total of 20 trees per site, two to three samples per tree were extracted (Speer, 2010) using Pressler borers (Haglöf Sweden) with an inner diameter of 5.15 mm and variable lengths (Figure 1C-1E).

Samples were prepared following standard dendrochronological procedures. The exact year of ring formation was determined using the crossdating technique (Stokes & Smiley, 1996). The samples were examined under a stereomicroscope at magnifications of 10x a 40x. Each sample was dated by comparing multiple rings, which allowed the identification of growth patterns (Speer, 2010). Ring width was measured using a Velmex system (Robinson & Evans, 1980) with a precision of 0.001 mm, connected to specialized software, MeasureJ2X (VoorTech, 2021), which also recorded earlywood and latewood growth data. Once measurements were completed, crossdating was statistically verified using the COFECHA program (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983).

Individual ring-width series were standardized to remove non-climatic noise, such as age-related trends, competition, and stand disturbance. A negative exponential curve fitting technique was applied following the tree growth model, and dimensionless indices reflecting environmental and climatic influences were obtained (Fritts, 1976). From the standardized series, mean ring-width index (RWI) chronologies were developed using Tukey's biweight robust mean, which is not affected by outliers.

For each site, three types of chronologies were developed: standard, residual and arstan. In this study, the standard chronology was used, representing a robust estimate of the arithmetic mean (Bunn et al., 2025). The chronologies were developed and standardized using the dplR package (Bunn et al., 2025)

de Bocoyna, ambos sitios en el estado de Chihuahua; El Tarahumar (TAR) que pertenece a la comunidad El Tarahumar y Bajíos del Tarahumar, municipio de Tepehuanes; y El Brillante (BRI) situado en el ejido El Brillante, municipio de Pueblo Nuevo, ambos sitios en el estado de Durango (Figura 1B). El sustrato geológico de los sitios está compuesto por rocas ígneas extrusivas de composición ácida (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2005) y registran tres grupos de suelos: Umbrisoles, Regosoles y Leptosoles (IUSS Working Group [WRB], 2022). El clima es templado húmedo con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C y precipitación anual de 800 a 1200 mm (García, 2004). La vegetación corresponde a un bosque mixto de pino-encino (Rzedowski, 2006).

Desarrollo de cronologías

Las muestras se colectaron en julio, agosto y octubre del 2024. Se seleccionaron árboles de apariencia longeva con algunas características como tallo en forma de espiral y ramas gruesas colgantes; en la medida de lo posible, se eligieron árboles que crecían en condiciones de suelos poco profundos con pendientes pronunciadas y perturbación baja del rodal (Cerano-Paredes et al., 2022). De un total de 20 árboles por sitio, se extrajeron de dos a tres muestras por árbol (Speer, 2010) con taladros de Pressler Haglöf Sweden de 5.15 mm de diámetro interno y dimensiones variables (Figura 1C-1E).

Las muestras se prepararon de acuerdo con los procedimientos dendrocronológicos estándar. El año exacto de la formación de los anillos se determinó con la técnica de fechado cruzado (Stokes & Smiley, 1996). Estos se analizaron en un microscopio estereoscópico con aumentos de 10x a 40x. Cada muestra se fechó al comparar varios anillos, lo que permitió la identificación de patrones de crecimiento (Speer, 2010). El ancho de los anillos se midió con un sistema de medición Velmex (Robinson & Evans, 1980) con una precisión de 0.001 mm, conectado a un *software* especializado MeasureJ2X (VoorTech, 2021) que también registró la información del crecimiento de madera temprana y tardía. Una vez realizada la medición, el fechado se validó estadísticamente con el programa COFECHA (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983).

Las series individuales de ancho de anillo se estandarizaron para eliminar el ruido no relacionado con el clima, como la tendencia por edad, competencia y perturbación del rodal. Se aplicó la técnica de ajuste de curva exponencial negativa que sigue el modelo de crecimiento arbóreo y se obtuvieron índices adimensionales que reflejan la influencia ambiental y climática (Fritts, 1976). A partir de las series estandarizadas se desarrollaron cronologías promedio de índice de ancho de anillo (IAA) al utilizar *biweight robust mean* de Tukey, que no se ve afectada por los valores atípicos.

in R (R Core Team, 2024); this software was also used to calculate descriptive statistics for each chronology (Cook & Peterson, 2011). The common growth variability among sites was assessed using Pearson correlation analysis and validated through principal component analysis (PCA) using FactoMineR package in R (Lê et al., 2008).

Climatic data

Climatic information for each site (Table 1) was obtained from the monthly ERA5-Land reanalysis dataset, developed by the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (Muñoz, 2019). This dataset provides monthly estimates of climatic variables with high spatial resolution and temporal consistency.

Monthly data for precipitation (PPT), maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin), and dew point temperature (Tdew) were downloaded through the Google Earth Engine platform for the period 1950–2023 (73 years). From these climatic series (Table 1), monthly VPD was estimated for each site following the methodology proposed by Allen et al. (2006). Subsequently, an annual VPD value was calculated by averaging 12 months each year. Monthly VPD was calculated using the following equations:

$$e_s = \frac{\left(b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1 \cdot T_{\max}}{T_{\max} + b_2}\right) + b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1 \cdot T_{\min}}{T_{\min} + b_2}\right) \right)}{2}$$

$$e_a = b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1 \cdot T_{\text{dew}}}{T_{\text{dew}} + b_2}\right)$$

$$\text{VPD} = e_s - e_a$$

where,

VPD = vapor pressure deficit (kPa)

e_a = actual vapor pressure (kPa)

e_s = saturation vapor pressure (kPa)

$b_0 = 0.6108$

$b_1 = 17.27$

$b_2 = 237.3$

Tmax = maximum temperature (°C)

Tmin = minimum temperature (°C)

Tdew = dew point temperature (°C).

b_0 , b_1 and b_2 = empirical constants

exp = exponential function.

Statistical analysis

The relationship between the ring-width index of *P. menziesii* and climatic variables (PPT, Tmin, Tmax and VPD) was determined using Pearson linear correlation and moving window correlation functions with the treeclim package in R (R Core Team, 2024; Zang

Para cada sitio se obtuvieron tres tipos de cronologías: estándar, residual y arstan. En este estudio se utilizó la cronología estándar, una estimación robusta de la media aritmética (Bunn et al., 2025). Las cronologías se generaron y estandarizaron a través del paquete dplR (Bunn et al., 2025) en R (R Core Team, 2024); asimismo, este *software* se utilizó para el cálculo de las estadísticas descriptivas de cada cronología (Cook & Peterson, 2011). La variabilidad común del crecimiento entre sitios se determinó con un análisis de correlación de Pearson y se validó mediante análisis de componentes principales (ACP) empleando el paquete FactoMineR en R (Lê et al., 2008).

Datos climáticos

La información climática para cada sitio (Cuadro 1) se obtuvo del conjunto de datos mensuales de reanálisis ERA5-Land, desarrollado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (Muñoz, 2019). Este conjunto proporciona estimaciones mensuales de variables climáticas con alta resolución espacial y coherencia temporal.

Se descargaron datos mensuales de precipitación (PPT), temperatura máxima (Tmáx), temperatura mínima (Tmín) y punto de rocío (Tdew) a través de la plataforma Google Earth Engine, correspondientes al periodo 1950–2023 (73 años). A partir de estas series climáticas (Cuadro 1) se estimó el DPV mensual para cada sitio conforme a la metodología propuesta por Allen et al. (2006). Posteriormente, se calculó un valor anual de DPV mediante el promedio de los 12 meses de cada año. El DPV mensual se calculó a partir de las ecuaciones siguientes:

$$e_s = \frac{\left(b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1 \cdot T_{\max}}{T_{\max} + b_2}\right) + b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1 \cdot T_{\min}}{T_{\min} + b_2}\right) \right)}{2}$$

$$e_a = b_0 \cdot \exp\left(\frac{b_1 \cdot T_{\text{dew}}}{T_{\text{dew}} + b_2}\right)$$

$$\text{DPV} = e_s - e_a$$

donde,

DPV = déficit de presión de vapor (kPa)

e_a = presión de vapor real (kPa)

e_s = presión de vapor a saturación (kPa)

$b_0 = 0.6108$

$b_1 = 17.27$

$b_2 = 237.3$

Tmáx = temperatura máxima (°C)

Tmín = temperatura mínima (°C)

Tdew = temperatura de punto de rocío (°C).

b_0 , b_1 y b_2 = constantes empíricas

exp = función exponencial.

Table 1. Geographic characteristics and temporal coverage of the climatic series used in the study in the Sierra Madre Occidental.
Cuadro 1. Características geográficas y longitud temporal de las series climáticas empleadas en el estudio en la Sierra Madre Occidental.

Station/ Estación	Latitude N (°)/ Latitud N (°)	Longitude W (°)/ Longitud O (°)	Elevation (m)/ Elevación (m)	Climatic variables/ Variables climáticas	Scale/ Escala	Period/ Periodo
Campo Verde (Chihuahua)	29.515	-108.423	2530	PPT, Tmin, Tmax, Tdew	Monthly/ Mensual	1950 - 2023
Arroyo Laja Prieta (Chihuahua)	28.014	-107.791	2390	PPT, Tmin, Tmax, Tdew	Monthly/ Mensual	1950 - 2023
El Tarahumar (Durango)	25.593	-106.327	2715	PPT, Tmin, Tmax, Tdew	Monthly/ Mensual	1950 - 2023
El Brillante (Durango)	23.66	-105.437	2730	PPT, Tmin, Tmax, Tdew	Monthly/ Mensual	1950 - 2023

PPT = precipitation (mm), Tmin = minimum temperature (°C) at 2 m, Tmax = maximum temperature (°C) at 2 m, Tdew = dew point temperature (°C) at 2 m.

PPT = precipitación (mm), Tmín = temperatura mínima (°C) a 2 m, Tmáx = temperatura máxima (°C) a 2 m, Tdew = temperatura de punto de rocío (°C) a 2 m.

& Biondi, 2015). The analysis covered 73 years and included 17 months (June-December of the previous year and January-October of the current year) to detect lagged effects. The moving window length was 30 years, with a significance level of $p < 0.05$ and bootstrap resampling (1000 iterations) to enhance robustness (Zang & Biondi, 2015).

Results and Discussion

Chronology development

A total of 92 % (159) of the growth cores (179), corresponding to 79 trees (Table 2) of *P. menziesii*, were successfully dated. Correlation among the series was statistically significant ($p < 0.01$), with coefficients ranging from 0.61 to 0.74. Mean sensitivity of the series ranged from 0.25 to 0.35. The length of the RWI chronologies varied from 243 to 369 years (Table 2).

In Mexico, studies conducted using growth cores of *P. menziesii* report crossdating percentages ranging from 71 to 98 % (Cerano-Paredes et al., 2024; Miranda-Briones et al., 2022). This variation is attributed to issues such as missing tree rings, false rings, and periods of growth suppression (Cerano-Paredes et al., 2022). Accordingly, the crossdating percentage achieved for *P. menziesii* in this study is considered acceptable. This indicates a high sensitivity of growth to environmental changes, which is supported by the interseries correlation coefficients (Table 2) that exceed the minimum threshold established by the COFECHA program ($r \geq 0.3281$; $p < 0.01$) (Holmes, 1983).

In the PCA, the first component (PC1) grouped the four chronologies and explained 63.4 % of the total variance (Figure 2); therefore, a regional RWI chronology of

Análisis estadístico

Se determinó la relación entre el índice de anillo de *P. menziesii* y las variables climáticas (PPT, Tmín, Tmáx y DPV) mediante correlación lineal de Pearson y función de correlación con ventana móvil con el paquete *treeclim* en R (R Core Team, 2024; Zang & Biondi, 2015). El análisis comprendió 73 años y se consideraron 17 meses (junio-diciembre del año previo y de enero-octubre del año actual) para detectar efectos rezagados. La ventana móvil fue de 30 años con un nivel de significancia de $p < 0.05$ y remuestreo *bootstrap* (1000 repeticiones) para reforzar la robustez (Zang & Biondi, 2015).

Resultados y discusión

Desarrollo de cronologías

Se logró fechar 92 % (159) del total de núcleos de crecimiento (179) correspondientes a 79 árboles (Cuadro 2) de *P. menziesii*. La correlación fue estadísticamente significativa ($p < 0.01$) entre las series, con coeficientes entre 0.61 y 0.74. La sensibilidad media de las series oscila entre 0.25 a 0.35. La extensión de las cronologías de IAA varió de 243 a 369 años (Cuadro 2).

En México, los estudios realizados con núcleos de crecimiento de *P. menziesii* reportan porcentajes de fechado que varían de 71 a 98 % (Cerano-Paredes et al., 2024; Miranda-Briones et al., 2022). Esta variación se atribuye a problemas como anillos ausentes, anillos falsos y periodo de supresión en el crecimiento (Cerano-Paredes et al., 2022). De acuerdo con lo anterior, el porcentaje de fechado logrado en *P. menziesii* para este estudio es aceptable. Esto indica alta sensibilidad del crecimiento a los cambios ambientales, lo cual se valida con los

Table 2. Descriptive statistics of individual chronologies and the regional chronology of *Pseudotsuga menziesii* in the Sierra Madre Occidental.**Cuadro 2. Estadísticas descriptivas de las cronologías individuales y la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* en la Sierra Madre Occidental.**

Site/Sitio	Latitude N (°)/ Latitud N (°)	Longitude W (°)/ Longitud O (°)	Elevation (m)/ Elevación (m)	Dendrochronological statistics/ Estadísticas dendrocronológicas					
				n	Period	IS	MS/SM	Rbar	EPS ≥ 0.85
Campo Verde (Chihuahua)	29.515	-108.423	2 530	33	1655-2023	0.66	0.27	0.21	1659-2023
Arroyo Laja Prieta (Chihuahua)	28.014	-107.791	2 390	43	1776-2023	0.69	0.27	0.36	1849-2023
El Tarahumar (Durango)	25.593	-106.327	2 715	42	1770-2023	0.74	0.35	0.41	1799-2023
El Brillante (Durango)	23.660	-105.437	2 730	41	1781-2023	0.61	0.25	0.41	1824-2023
Regional	--	--	--	159	1655-2023	0.58	0.29	0.24	1699-2023

Sample size (n), interseries correlation (IS), mean sensitivity (MS), mean interseries correlation (Rbar) and expressed population signal (EPS).

Tamaño de muestra (n), intercorrelación entre series (IS), sensibilidad media (SM), correlación media entre series (Rbar) y señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés).

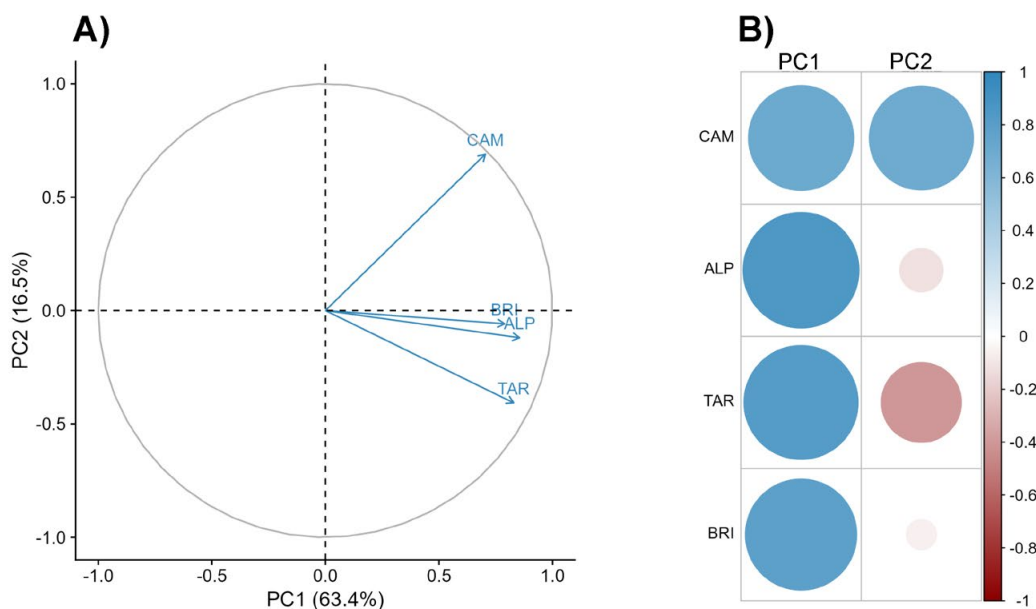


Figure 2. A) Principal component analysis of ring-width chronologies from the four *Pseudotsuga menziesii* sites in the Sierra Madre Occidental. B) Contribution of each chronology to the first components. Sampling sites: Campo Verde (CAM), Arroyo Laja Prieta (ALP) in Chihuahua and El Tarahumar (TAR) and El Brillante (BRI) in Durango.

Figura 2. A) Análisis de componentes principales para las cronologías de ancho de anillo de los cuatro sitios de *Pseudotsuga menziesii* de la Sierra Madre Occidental. B) Contribución de cada cronología al primer componente. Sitios de muestreo: Campo Verde (CAM), Arroyo Laja Prieta (ALP) en Chihuahua y El Tarahumar (TAR) y El Brillante (BRI) en Durango.

P. menziesii was developed. The chronology spans the period 1655-2023 (369 years), with a sample size of 159 series (Table 2, Figure 3A) and statistically significant interseries correlation ($r = 0.58$, $p < 0.01$). The regional series recorded expressed population signal (EPS) values > 0.85 for the period 1699-2023 (Table 2). A 324-year period was identified as statistically well supported based on sample size (Figure 3B).

coeficientes de intercorrelación entre series (Cuadro 2) que superan el mínimo establecido por el programa COFECHA ($r \geq 0.3281$; $p < 0.01$) (Holmes, 1983).

En el ACP, el primer componente (PC1) agrupó las cuatro cronologías y explicó 63.4 % de la varianza total (Figura 2), por lo que se integró una cronología regional de IAA de *P. menziesii*. La cronología comprende

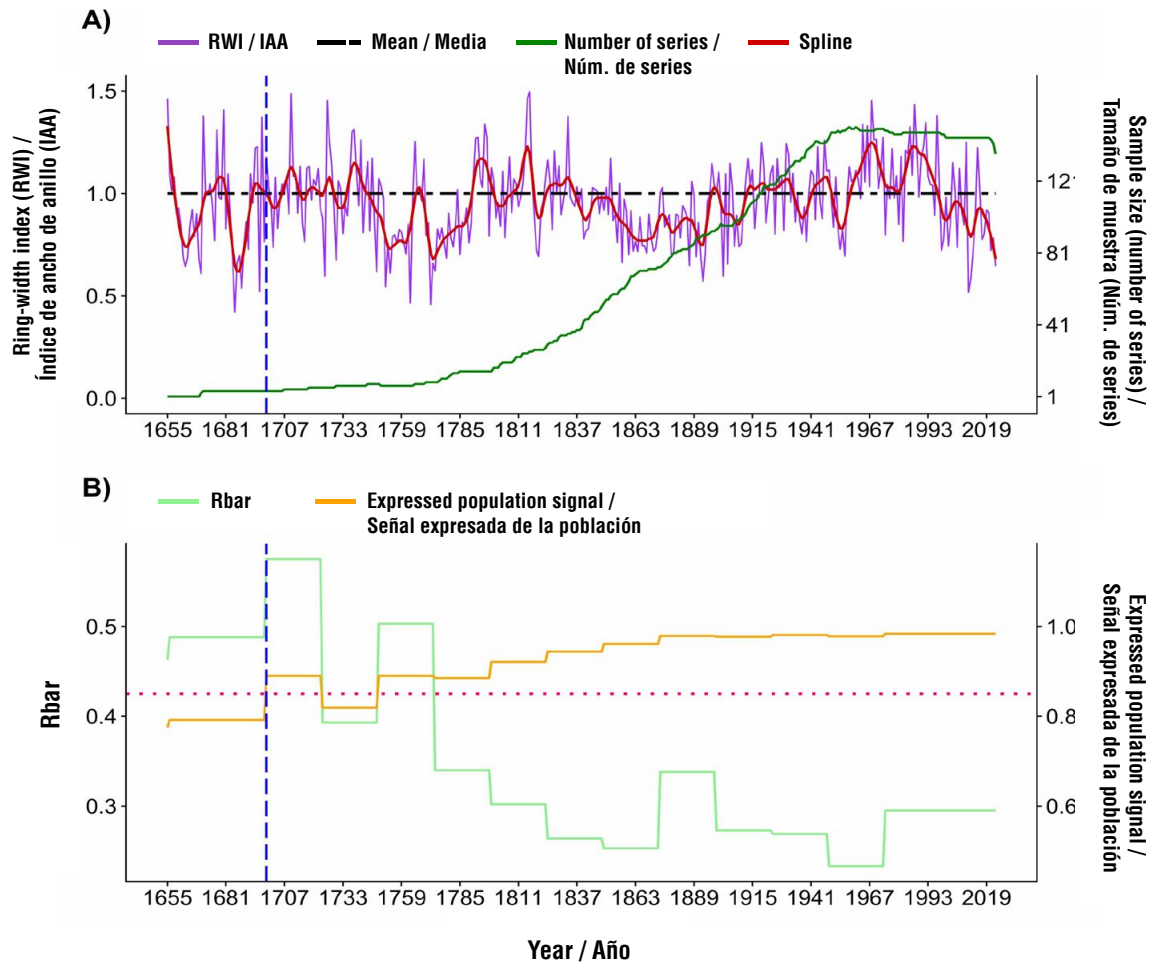


Figure 3. (A) Regional ring-width index (RWI) chronology of *Pseudotsuga menziesii* (purple line). The dashed black line represents the mean; the red line, a 10-year spline; and the green line, the sample size (number of series). B) In the lower panel, the orange line shows the expressed population signal (EPS); the green line, the mean interseries correlation (Rbar); and the dashed blue line intersects RWI, EPS, and mean interseries correlation (Rbar) in the year 1699, where $EPS > 0.85$. The horizontal dashed pink line indicates $EPS \geq 0.85$ and shows that the chronology is statistically supported by the sample size.

Figura 3. (A) Cronología regional de índice de ancho de anillo (IAA) de *Pseudotsuga menziesii* (línea morada). La línea negra punteada representa la media; la roja, un *spline* de 10 años; la verde, el tamaño de muestra (número de series). B) En el gráfico inferior, la línea naranja muestra la señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés); la verde, la correlación promedio entre series (Rbar); y la azul discontinua intercepta IAA, EPS y la correlación media entre series (Rbar) en el año 1699, donde $EPS > 0.85$. La línea punteada horizontal en color rosa indica $EPS \geq 0.85$ y muestra que la cronología está sustentada estadísticamente por el tamaño de muestra.

The PCA identified common RWI variability among the four series, which is attributed to a similar climatic forcing. In Mexico, PCA has been used to integrate dendrochronological series that exhibit similar growth variability (Cerano-Paredes et al., 2024; Chávez-Gándara et al., 2017; Villanueva-Díaz et al., 2022). In dendrochronology, the use of dimensionality reduction techniques, such as PCA, allows for the understanding of climatic variability over large areas (Duchesne et al., 2017).

The interseries correlation (Rbar) of the regional chronology (Figure 3B) decreases after 1720, whereas $EPS \geq 0.85$ is reached in 1699. This coincides with

el periodo de 1655-2023 (369 años) con un tamaño de muestra de 159 series (Cuadro 2, Figura 3A) e intercorrelación estadísticamente significativa ($r = 0.58$, $p < 0.01$). La serie regional registró valores de señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés) > 0.85 para el periodo de 1699-2023 (Cuadro 2). Se determinó un periodo de 324 años estadísticamente bien sustentado como tamaño de muestra (Figura 3B).

El ACP determinó variación común del IAA para las cuatro series, lo cual se atribuye a un forzamiento climático similar. En México, el ACP se ha empleado para la integración de series dendrocronológicas que presentan una misma variación en su crecimiento

lower sample depth and greater variability in Rbar. According to Briffa and Jones (1990), EPS depends on sample depth; therefore, the regional chronology has an adequate sample size for the period 1699-2023.

Influence of climatic variables on radial growth

The correlation analysis between RWI and PPT indicated a positive and significant relationship ($p < 0.05$) from November of the previous year to May of the current year (Figure 4A); December showed the strongest correlation ($r = 0.54$; $p < 0.05$). For cumulative precipitation, the period from November to May had the strongest significant positive correlation ($r = 0.76$, $p < 0.05$; Figure 4A). This is consistent with several paleoclimatic studies of *P. menziesii* and other conifers in the SMOc (Chávez-Gándara et al., 2017; Irby et al., 2013; Miranda-Briones et al., 2022; Villanueva-Díaz et al., 2020). Some studies in the Sierra Madre Oriental have also shown a positive growth response of *P. menziesii* to

(Cerano-Paredes et al., 2024; Chávez-Gándara et al., 2017; Villanueva-Díaz et al., 2022). En dendrocronología, el uso de técnicas de reducción de dimensionalidad, como ACP, permite comprender la variabilidad climática en áreas extensas (Duchesne et al., 2017).

La correlación entre series (Rbar) de la cronología regional (Figura 3B) disminuye a partir de 1720, mientras que el $EPS \geq 0.85$ se alcanza en 1699. Esto coincide con la menor profundidad de muestra y mayor variabilidad en Rbar. De acuerdo con Briffa y Jones (1990), el EPS depende de la profundidad de muestra; por lo tanto, la cronología regional presenta un tamaño de muestra adecuado para el periodo 1699-2023.

Influencia de las variables climáticas en el crecimiento radial

El análisis de correlación entre el IAA y la PPT indicó relación positiva y significativa ($p < 0.05$) con los meses

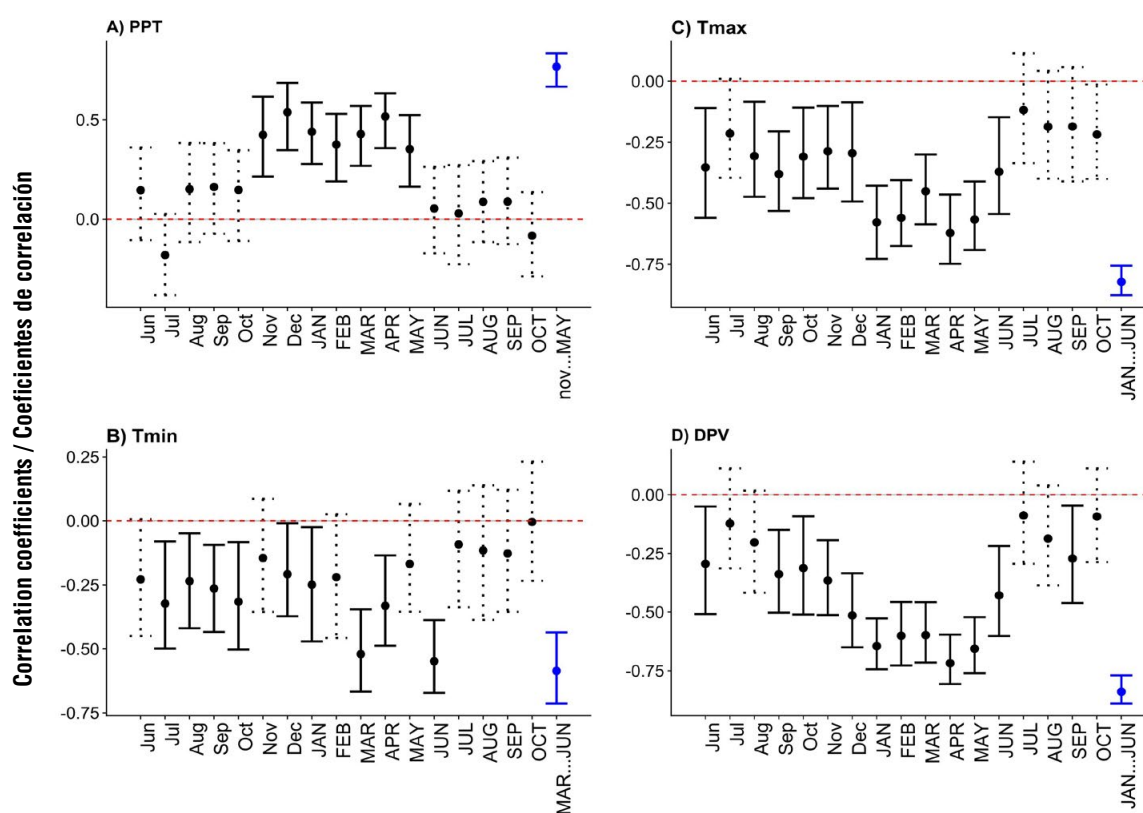


Figure 4. Bootstrap linear correlation coefficients between the regional chronology of *Pseudotsuga menziesii* and the climatic variables precipitation (PPT), minimum temperature (Tmin), maximum temperature (Tmax) and vapor pressure deficit (VPD). On the X-axis, months in lowercase correspond to the previous year, and months in uppercase correspond to the current year. Solid black lines indicate confidence intervals ($p < 0.05$). The solid blue line represents the cumulative variable.

Figura 4. Coeficientes de correlación lineal con *bootstrap* entre la cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* y las variables climáticas de precipitación (PPT), temperatura mínima (Tmín), temperatura máxima (Tmáx) y déficit de presión de vapor (DPV). En el eje X, los meses en minúsculas corresponde al año previo y los meses en mayúsculas al año actual. Las líneas continuas negras muestran los intervalos de confianza ($p < 0.05$). La línea azul continua representa la variable acumulada.

PPT during the winter-spring period (Cerano-Paredes et al., 2024; Pohl et al., 2003; Villanueva-Díaz et al., 2007).

This study confirms that winter PPT, although it represents only 14.6 % of the annual total, is key to the radial growth of *P. menziesii*. The low correlation with summer precipitation is explained by the occurrence of torrential rainfall during these months, when radial growth is already well advanced or has ceased, preventing the tree from recording this signal in its growth. Similar results have been documented by Arroyo-Morales et al. (2023) and Contreras-Mata et al. (2024). From an ecophysiological perspective, soil moisture regulates essential processes such as transpiration, photosynthesis, and cambial activity that promote the formation of woody tissue (Kozłowski & Pallardy, 2002).

A negative correlation was found between T_{min} and RWI (Figure 4B). The months from July to December of the previous year and January, March, April, and June of the current year showed significant correlations ($p < 0.05$). June of the current year had the strongest significant negative correlation ($r = -0.55$; $p < 0.05$). The cumulative T_{min} from March to June of the current year showed a significant negative correlation ($r = -0.59$; $p < 0.05$) (Figure 4B).

In dendroclimatic studies in the SMOc, González-Elizondo et al. (2005) found no correlation between T_{min} and the radial growth of *P. menziesii*, whereas Cerano-Paredes et al. (2023) reported a significant positive association, but only for August of the current year. In the present study, T_{min} limits the radial growth of *P. menziesii* by influencing metabolic activity and the onset of cambial growth (Turner & Mitchell, 2003). For *P. menziesii* and other conifers, post-dormancy begins in mid-February and ends in early April (Lavender & Hermann, 2014). The low correlation between T_{min} and annual ring formation could be explained by external factors such as soil temperature, site microclimate, and thermal variation associated with topography (Kashian et al., 2023; Rupp et al., 2020).

The correlation between RWI of *P. menziesii* and T_{max} showed significant negative values ($p < 0.05$) from June of the previous year to June of the current year (Figure 4C); April of the current year had the strongest significant negative correlation ($r = -0.62$; $p < 0.05$). For cumulative T_{max} , the highest correlation (Figure 4C) was observed for the period from January to June of the current year ($r = -0.82$; $p < 0.05$). T_{max} is another variable that shows a significant negative relationship with the RWI of *P. menziesii* during the months of January-June of the current year. This negative association is consistent with paleoclimatic studies of *P. menziesii* and other conifers in the SMOc (Chávez-

de noviembre del año previo a mayo del año actual (Figura 4A); el mes de diciembre presentó la mejor correlación ($r = 0.54$; $p < 0.05$). Para la lluvia acumulada se determinó que el periodo de noviembre a mayo registra la mejor correlación positiva significativa ($r = 0.76$, $p < 0.05$; Figura 4A). Esto coincide con diversos estudios paleoclimáticos de *P. menziesii* y otras coníferas en la SMOc (Chávez-Gándara et al., 2017; Irby et al., 2013; Miranda-Briones et al., 2022; Villanueva-Díaz et al., 2020). Algunos estudios en la Sierra Madre Oriental también han mostrado respuesta positiva del crecimiento de *P. menziesii* a la PPT del periodo invierno-primavera (Cerano-Paredes et al., 2024; Pohl et al., 2003; Villanueva-Díaz et al., 2007).

Este estudio confirma que la PPT invernal, aunque representa solo 14.6 % del total anual, es clave para el crecimiento radial de *P. menziesii*. La baja correlación con las lluvias de verano se explica porque durante estos meses se registran lluvias torrenciales y el crecimiento radial para este periodo está muy avanzado o ha finalizado, lo cual no permite que el árbol lo registre en su crecimiento. Resultados similares se han documentado por Arroyo-Morales et al. (2023) y Contreras-Mata et al. (2024). Ecofisiológicamente, la humedad del suelo regula procesos esenciales como la transpiración, la fotosíntesis y la actividad cambial que favorecen la formación de tejido leñoso (Kozłowski & Pallardy, 2002).

Se determinó correlación negativa entre la $T_{mín}$ y el IAA (Figura 4B). Los meses de julio a diciembre del año previo y enero, marzo, abril y junio del año actual presentaron correlaciones significativas ($p < 0.05$). El mes de junio del año actual presentó la mejor relación negativa significativa ($r = -0.55$; $p < 0.05$). La $T_{mín}$ acumulada de los meses de marzo a junio del año actual mostró correlación negativa significativa ($r = -0.59$; $p < 0.05$) (Figura 4B).

En estudios dendroclimáticos en la SMOc, González-Elizondo et al. (2005) no encontraron correlación entre la $T_{mín}$ y el crecimiento radial de *P. menziesii*, mientras que Cerano-Paredes et al. (2023) sí reportan asociación positiva significativa, pero únicamente con el mes de agosto del año actual. En el presente estudio, la $T_{mín}$ limita el crecimiento radial de *P. menziesii* al influir en la actividad metabólica y en el inicio del crecimiento cambial (Turner & Mitchell, 2003). Para *P. menziesii* y otras coníferas, la quiescencia posletargo comienza a mediados de febrero y termina a principios de abril (Lavender & Hermann, 2014). La baja correlación entre la $T_{mín}$ y la formación de anillos anuales podría explicarse por factores externos como la temperatura del suelo, el microclima del sitio y la variación térmica asociada a la topografía (Kashian et al., 2023; Rupp et al., 2020).

La correlación entre el IAA de *P. menziesii* y la $T_{máx}$ mostró valores negativos significativos ($p < 0.05$) desde junio del año previo a junio del año actual (Figura 4C);

Gándara et al., 2017; González-Elizondo et al., 2005; Pompa-García & Hadad, 2016).

The negative response of *P. menziesii* to T_{max} can be explained by environmental water stress that affects radial growth (Pallardy, 2008). In temperate climates, soil water deficits tend to occur in mid-growing season, when high air temperatures are recorded and soil water availability from winter snowmelt and spring precipitation is no longer present (Kashian et al., 2023). High temperatures influence the dynamics of water transport along the soil-plant-atmosphere continuum (Tyree & Zimmermann, 2002).

Similar to the temperature variables, VPD had a negative influence on RWI (Figure 4D). Correlation analysis revealed significant negative associations ($p < 0.05$) for June, September, October, November and December of the previous year, as well as January, February, March, April, May, June and September of the current year. The strongest correlation was observed for April of the current year ($r = -0.71$; $p < 0.05$). The highest correlation for cumulative VPD (Figure 4D) was observed for the period from January to June of the current year ($r = -0.84$; $p < 0.05$).

In Mexico, paleoclimatic studies incorporating VPD as a variable in their analyses are scarce (Morales-Estrada et al., 2025). Recently, Cerano-Paredes et al. (2024) identified a strong negative relationship between VPD and the growth of *P. menziesii* from January to June. In several conifer species, a negative correlation has also been reported (Pompa-García et al., 2022).

The moving-window correlation analysis between RWI and climatic variables (Figure 5) for the period 1950-2023 showed positive, stable, and significant correlation ($p < 0.05$) with PPT from November of the previous year to May of the current year (Figure 5A). Regarding T_{min} (Figure 5B), correlations were negative and temporally variable; in March and June of the current year, they remained stable, whereas in April and May of the current year they became significant ($p < 0.05$) starting in 1970 and 1980, respectively. T_{max} showed stable negative correlations from January to June (Figure 5C), with two notable periods: 1950-1969 ($r = -0.75$; $p < 0.05$) and 1970-2023 ($r = -0.83$; $p < 0.05$).

The influence of VPD on RWI showed temporal stability for the months from January to May of the current year, with significant negative associations ($p < 0.05$) (Figure 5D). Over this 73-year analysis window, significant negative correlations ($p < 0.05$) were observed, with values increasing in magnitude from $r = -0.72$ in the 1950s to $r = -0.88$ in the late 20th century and early 21st century (1950-1959 [$r = -0.72$], 1960-1969 [$r = -0.71$], 1970-1979 [$r = -0.81$], 1980-1989 [$r = -0.87$] and 1990-2023 [$r = -0.88$]).

el mes de abril del año actual presentó la correlación negativa significativa más alta ($r = -0.62$; $p < 0.05$). Para la $T_{máx}$ acumulada, la correlación más alta (Figura 4C) se determinó en el periodo de enero a junio del año actual ($r = -0.82$; $p < 0.05$). La $T_{máx}$ es otra de las variables que responde de manera negativa y significativa con el IAA de *P. menziesii* en los meses de enero-junio del año actual. La asociación negativa es similar con estudios paleoclimáticos de *P. menziesii* y otras coníferas en la SMOc (Chávez-Gándara et al., 2017; González-Elizondo et al., 2005; Pompa-García & Hadad, 2016).

La respuesta negativa de *P. menziesii* a la $T_{máx}$ puede ser explicada por el estrés hídrico ambiental que afecta el crecimiento en diámetro (Pallardy, 2008). En climas templados, los déficits de agua en el suelo tienden a ocurrir a mitad de la temporada de crecimiento, cuando se registran temperaturas altas del aire y el agua disponible del suelo por el derretimiento de la nieve en invierno y las lluvias de primavera ya no está presente (Kashian et al., 2023). Las temperaturas altas influyen en la dinámica del transporte hídrico a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera (Tyree & Zimmermann, 2002).

Al igual que las variables de temperatura, el DPV mostró influencia negativa sobre el IAA (Figura 4D). El análisis de correlación reveló asociaciones negativas significativas ($p < 0.05$) para junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre del año previo, y enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y septiembre del año actual. La mejor correlación se observó para el mes de abril del año actual ($r = -0.71$; $p < 0.05$). La correlación más alta para el DPV acumulado (Figura 4D) se observó para el periodo de enero a junio del año actual ($r = -0.84$; $p < 0.05$).

En México, los estudios paleoclimáticos que incorporan la variable DPV en sus análisis son escasos (Morales-Estrada et al., 2025). Recientemente, Cerano-Paredes et al. (2024) identificaron fuerte relación negativa entre el DPV y el crecimiento de *P. menziesii* de enero-junio. En varias coníferas también se reporta correlación negativa (Pompa-García et al., 2022).

El análisis de correlación con ventana móvil entre el IAA y las variables climáticas (Figura 5), para el periodo 1950-2023, mostró correlaciones positivas, estables y significativas ($p < 0.05$) con la PPT de noviembre del año anterior a mayo del año actual (Figura 5A). Respecto a la $T_{mín}$ (Figura 5B), las correlaciones fueron negativas y variables en el tiempo; en marzo y junio del año actual mostraron estabilidad, mientras que en abril y mayo del año actual se volvieron significativos ($p < 0.05$) a partir de 1970 y 1980, respectivamente. Asimismo, para la $T_{máx}$ se presentaron correlaciones negativas estables de enero a junio (Figura 5C) con dos periodos destacados: 1950-1969 ($r = -0.75$; $p < 0.05$) y 1970-2023 ($r = -0.83$; $p < 0.05$).

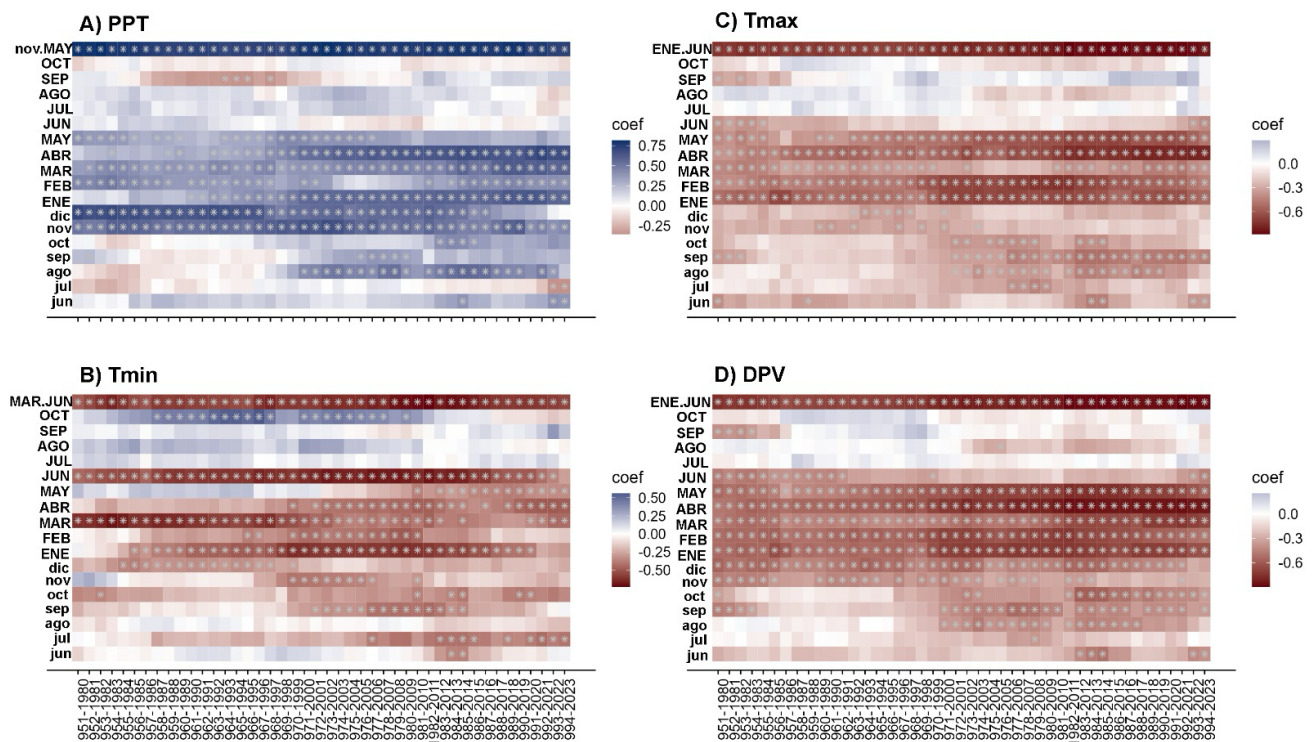


Figure 5. Moving-window correlations between the regional tree-ring width index (RWI) of *Pseudotsuga menziesii* and climatic variables, including total precipitation (PPT), minimum temperature (Tmin) and maximum temperature (Tmax), and vapor pressure deficit (VPD). On the Y-axis, months in lowercase indicate conditions from the previous year, whereas months in uppercase represent the current year. The X-axis shows the analysis period (1950-2023) using a 30-year moving window. Color intensity indicates temporal changes in correlation strength. Asterisks denote statistically significant correlations ($p < 0.05$).

Figura 5. Correlación con ventana móvil entre el índice de ancho de anillo (IAA) regional de *Pseudotsuga menziesii* y las variables climáticas precipitación total (PPT), temperatura mínima (Tmín) y temperatura máxima (Tmáx) y déficit de presión de vapor (DPV). En el eje Y, los meses en minúsculas indican condiciones del año previo y los meses en mayúsculas del año actual. El eje X indica el periodo de análisis (1950-2023) en una ventana móvil de 30 años. La intensidad del color indica los cambios en las correlaciones a lo largo del tiempo. Los asteriscos indican correlaciones significativas ($p < 0.05$).

The study shows that increasing VPD has reduced the radial growth of *P. menziesii* in the SMOc, with a more strongly negative effect in recent decades (Figure 5D). Between 1950 and 2023, high VPD values were recorded (Figure 6), exceeding 1.9 kPa in years such as 1951, 1960, 1980, 1998, 2011 and 2023, years characterized by extreme drought across most of the country, consistent with the findings of Cerano-Paredes et al. (2024). Similarly, Correa-Díaz et al. (2020) reported a significant decrease in $\Delta^{13}\text{C}$ (stable isotopes) in tree rings during the 2011 drought, coinciding with the highest VPD value recorded (Figure 6). A VPD above 2.0 kPa is associated with reduced photosynthesis and stomatal conductance in conifers such as *Pinus rubens* Sarg. (Day, 2000); likewise, it reduces shoot transpiration in *P. menziesii* when temperatures exceed 24 °C (Leverenz, 1981).

Since the 1990s, VPD has exhibited an increasing trend and is projected to continue rising (Yuan et al., 2019). This indicator is associated with multiple stress

La influencia del DPV sobre el IAA mostró estabilidad a lo largo del tiempo para los meses de enero a mayo del año actual, con asociaciones negativas y significativas ($p < 0.05$) (Figura 5D). Para esta ventana de análisis de 73 años, se registraron correlaciones negativas y significativas ($p < 0.05$) con aumentos que pasaron de $r = -0.72$ en la década de 1950 a $r = -0.88$ para finales del siglo XX e inicios del siglo XXI (1950-1959 [$r = -0.72$], 1960-1969 [$r = -0.71$], 1970-1979 [$r = -0.81$], 1980-1989 [$r = -0.87$] y 1990-2023 [$r = -0.88$]).

El estudio evidencia que el aumento del DPV ha reducido el crecimiento radial de *P. menziesii* en la SMOc, con un efecto negativo más marcado en las últimas décadas (Figura 5D). Entre 1950-2023 se registraron valores elevados de DPV (Figura 6) que superan los 1.9 kPa en años como 1951, 1960, 1980, 1998, 2011 y 2023, años de sequía extrema en la mayor parte del país, valores que coinciden con lo reportado por Cerano-Paredes et al. (2024). Asimismo, Correa-Díaz et al. (2020) reportaron disminución significativa de $\Delta^{13}\text{C}$

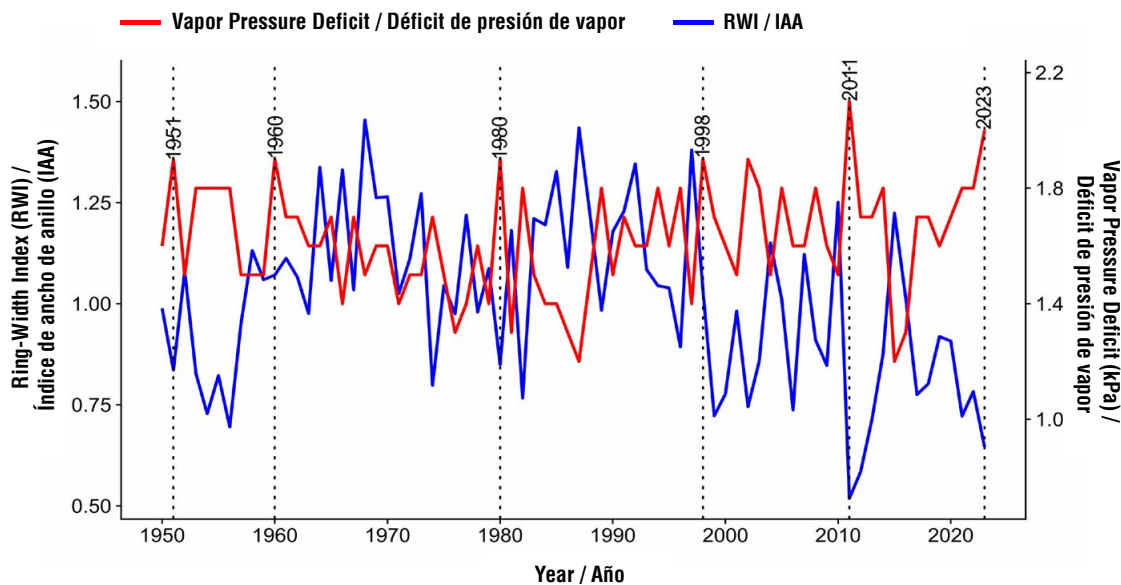


Figure 6. Vapor pressure deficit and regional ring-width index chronology of *Pseudotsuga menziesii* in the period 1950-2023 in the Sierra Madre Occidental

Figura 6. Déficit de presión de vapor y cronología regional de índice de ancho de anillo de *Pseudotsuga menziesii* en el periodo 1950-2023 en la Sierra Madre Occidental.

factors affecting forest ecosystems, including soil and atmospheric droughts, wildfires, insect outbreaks, and the spread of invasive organisms (Grossiord et al., 2020; Guo et al., 2023; Seidl et al., 2017). VPD represents a significant challenge for forest restoration and conservation, even within forest-based climate solutions (Cook-Patton et al., 2021). As temperatures continue to increase in the coming decades, stress related to water deficit is expected to intensify, and consequently, the growth of *P. menziesii* is likely to decline across its distribution range (Restaino et al., 2016).

For the period 1950-2023, atmospheric drought associated with T_{max} and VPD showed negative correlations with radial growth, which became progressively stronger from 1950 to the early decades of the 21st century. In this context, it is important to consider future climate scenarios that project increasing temperatures and declining precipitation. Particularly in northern Mexico, where arid and semi-arid ecosystems predominate, the species will face warmer and drier conditions that are expected to reduce cambial activity and decrease annual growth.

Conclusions

This study provides new evidence on the impact of climate on the radial growth of *Pseudotsuga menziesii* in the Sierra Madre Occidental (SMOc), highlighting the negative effects of T_{min} , T_{max} , and vapor pressure deficit (VPD), and the positive influence of precipitation. This research represents the first

(isótopos estables) en los anillos de crecimiento durante la sequía de 2011, en coincidencia con el valor más alto de DPV registrado (Figura 6). Un DPV superior a 2.0 kPa se asocia con la reducción en la fotosíntesis y la conductancia estomática en coníferas como *Pinus rubens* Sarg. (Day, 2000); asimismo, reduce la transpiración de brotes de *P. menziesii* cuando la temperatura supera los 24 °C (Leverenz, 1981).

Desde la década de 1990, el DPV ha mostrado tendencia ascendente y se prevé que continúe (Yuan et al., 2019). Este indicador se relaciona con múltiples factores de estrés para los ecosistemas forestales como las sequías edáficas y atmosféricas, incendios, brotes de insectos y propagación de organismos invasores (Grossiord et al., 2020; Guo et al., 2023; Seidl et al., 2017). El DPV representa un desafío para la restauración y conservación forestal, incluso en soluciones climáticas basadas en bosques (Cook-Patton et al., 2021). A medida que la temperatura siga aumentando en las próximas décadas, podemos esperar que el estrés relacionado con el déficit hídrico aumente y, en consecuencia, que el crecimiento de *P. menziesii* disminuya en toda su área de distribución (Restaino et al., 2016).

Para el periodo de 1950-2023, la sequía atmosférica asociada a la $T_{máx}$ y DPV registró correlaciones negativas con el crecimiento radial, las cuales fueron cada vez más altas de 1950 a las primeras décadas del siglo XXI. En este sentido, es importante tener en cuenta los escenarios climáticos futuros que prevén incremento de la temperatura y reducción de la

analysis evaluating the response of *P. menziesii* to VPD in the SMOc, a variable that significantly and more strongly limits the growth of the species; therefore, the research hypothesis is accepted. Considering future climate change in Mexico's forests, it is important to conduct studies across different latitudes to develop a network of dendrochronological series of *P. menziesii*, as well as other commercially important species, to better understand the effect of VPD on tree growth.

Acknowledgments

We thank SECIHTI for the scholarship granted to the first author. We also thank the UAAAN for the funding support through the project “Cambio Climático y crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* en la Sierra Madre Occidental, México” (Project number: 38111-425103001-2216) and the INIFAP through the project “Reconstrucción de regímenes históricos de incendios forestales en México: Ecología del fuego para el manejo forestal sustentable” (SIGI No. 1123336382). Fieldwork assistance provided by Jorge Adrián Ochoa Chacón, Enrique Rascón Camuñez and José Manuel Zúñiga Vásquez is gratefully acknowledged.

Conflict of Interest Declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest or known personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

Declaration of Artificial Intelligence (AI) Use

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technology was used in the preparation of this manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- 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), 635-649. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04303-1>
- Babst, F., Bouriaud, O., Poulter, B., Trouet, V., Girardin, M. P., & Frank, D. C. (2019). Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances*, 5(1), eaat4313. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>

precipitación. Particularmente, en el norte del país donde predominan ecosistemas áridos y semiáridos, la especie enfrentará condiciones más cálidas y secas que se traducirán en reducción de la actividad cambial y disminución en el crecimiento anual.

Conclusiones

Este estudio aporta evidencia novedosa sobre el impacto del clima en el crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* en la Sierra Madre Occidental (SMOc), destacando los efectos negativos de la Tmín, Tmáx y el déficit de presión de vapor (DPV), y la influencia positiva de la precipitación. La presente investigación es el primer análisis que evalúa la respuesta de *P. menziesii* al DPV en la SMOc, variable que limita en mayor grado y de manera significativa el crecimiento de la especie; por lo tanto, se acepta la hipótesis de investigación. Con base en el cambio futuro del clima en los bosques de México es importante el desarrollo de trabajos en diferentes latitudes con el objetivo de que integren una red de series dendrocronológicas de *P. menziesii*, y de otras especies de interés comercial, para comprender el efecto del DPV en el crecimiento.

Agradecimientos

Se agradece a la SECIHTI por la beca otorgada al primer autor. Al financiamiento de la UAAAN a través del proyecto “Cambio Climático y crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* en la Sierra Madre Occidental, México” con clave: 38111-425103001-2216 y al INIFAP con el proyecto “Reconstrucción de regímenes históricos de incendios forestales en México: Ecología del fuego para el manejo forestal sustentable” con número de SIGI: 1123336382. Se reconoce el apoyo en campo a Jorge Adrián Ochoa Chacón, Enrique Rascón Camuñez y José Manuel Zúñiga Vásquez.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración del uso de inteligencia artificial (IA)

Los autores declaramos no haber utilizado IA generativa o tecnologías asistidas por IA para el desarrollo del presente manuscrito.

Fin de la versión en español

- Barkhordarian, A., Saatchi, S. S., Behrangi, A., Loikith, P. C., & Mechoso, C. R. (2019). A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America. *Scientific Reports*, 9(1), 15331. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51857-8>
- Breshears, D. D., Adams, H. D., Eamus, D., McDowell, N., Law, D. J., Will, R. E., Williams, A. P., & Zou, C. B. (2013). The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off. *Frontiers in Plant Science*, 4, 266. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00266>
- Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1990). Basic chronology statistics and assessment. In E. R. Cook & L. A. Kairiukstis (Eds.), *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences* (pp. 137–152). Kluwer Academic Publishers. <https://www.springer.com/gb/book/9780792305866>
- Broz, A., Retallack, G. J., Maxwell, T. M., & Silva, L. C. R. (2021). A record of vapour pressure deficit preserved in wood and soil across biomes. *Scientific Reports*, 11(1), 662. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80006-9>
- Bunn, A., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Klesse, S., Mérian, P., Qeadan, F., & Zang, C. (2025). *dplR: Dendrochronology program library in R* (versión 1.7.8) [R package]. <https://CRAN.R-project.org/package=dplR>
- Cerano-Paredes, J., Avendaño-González, A., Muñoz-Villalobos, J. A., Cervantes-Martínez, R., Jiménez-Jiménez, S., & Cornejo-Oviedo, E. H. (2024). Influencia del déficit de presión de vapor en el crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii*. *Agrofaz – Journal of Environmental and Agroecological Sciences*, 6(2), 44–52. <https://www.agrofaz.net/index.php/agrofaz/issue/view/13>
- Cerano-Paredes, J., Martínez-Sifuentes, A. R., & Cervantes Martínez, R. (2023). Sensibilidad del crecimiento radial de *Pseudotsuga menziesii* a variables climáticas en el occidente del estado de Chihuahua, México. *Agrofaz – Journal of Environmental and Agroecological Sciences*, 5(1), 53–60. <https://agrofaz.net/index.php/agrofaz/issue/view/10>
- Cerano-Paredes, J., Szejner, P., Gutiérrez-García, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Villanueva-Díaz, J., Estrada-Arellano, J. R., Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., & Castruita-Esparza, L. U. (2022). How to extract climate variability from tree-rings. *Journal of Visualized Experiments*, 181, e63414. <https://doi.org/10.3791/63414>
- Cervantes-Martínez, R., Cerano-Paredes, J., Iniguez, J. M., Cambrón-Sandoval, V. H., Esquivel-Arriaga, G., & Villanueva-Díaz, J. (2025). Dendrochronological reconstruction of January–September precipitation variability (1647–2015A. D) using *Pinus arizonica* in Southwestern Chihuahua, Mexico. *Forests*, 16(11), 1639. <https://doi.org/10.3390/f16111639>
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Cruz-Cobos, F., & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 38, 387–399. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>
- 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>
- Cook, E. R., & Peterson, N. (2011). Uncertainty, emergence, and statistics in dendrochronology. In M. K. Hughes, T. W. Swetnam, & H. F. Diaz (Eds.), *Dendroclimatology: Progress and prospects* (pp. 99–116). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5725-0_4
- Cook-Patton, S. C., Drever, C. R., Griscom, B. W., Hamrick, K., Hardman, H., Kroeger, T., Pacheco, P., Raghav, S., Stevenson, M., Webb, C., Yeo, S., & Ellis, P. W. (2021). Protect, manage and then restore lands for climate mitigation. *Nature Climate Change*, 11(12), 1027–1034. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01198-0>
- Correa-Díaz, A., Silva, L. C. R., Horwath, W. R., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Villanueva-Díaz, J., Suárez-Espinoza, J., & Velázquez-Martínez, A. (2020). From trees to ecosystems: Spatiotemporal scaling of climatic impacts on montane landscapes using dendrochronological, isotopic, and remotely sensed data. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(3), e2019GB006325. <https://doi.org/10.1029/2019GB006325>
- 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*, 27(1). <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.03.012>
- Day, M. E. (2000). Influence of temperature and leaf-to-air vapor pressure deficit on net photosynthesis and stomatal conductance in red spruce (*Picea rubens*). *Tree Physiology*, 20(1), 57–63. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.1.57>
- Duchesne, L., D'Orangeville, L., Ouimet, R., Houle, D., & Kneeshaw, D. (2017). Extracting coherent tree-ring climatic signals across spatial scales from extensive forest inventory data. *PLoS ONE*, 12(12), e0189444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189444>
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780122684500/tree-rings-and-climate>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/1372>
- González-Elizondo, M., González-Elizondo, M. S., López-Enríquez, I. L., & Tena-Flores, J. A. (2017). Flora vascular. En Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Ed.), *La biodiversidad en Durango: Estudio de estado* (pp. 301–318). Author. <https://www.cbd.int/doc/nbsap/study/mx-study-durango-es.pdf>
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Nívar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O., & Jiménez, J. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681–2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213(1), 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.012>
- 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>

- Groenendijk, P., Babst, F., Trouet, V., Fan, Z.-X., Granato-Souza, D., Locosselli, G. M., Mokria, M., Panthi, S., Pumijumnong, N., Abiyu, A., Acuña-Soto, R., Adenesky-Filho, E., Alfaro-Sánchez, R., Anholetto Junior, C. R., Aragão, J. R. V., Assis-Pereira, G., Astudillo-Sánchez, C. C., Carolina Barbosa, A., Barreto, N. de O., ... Zuidema, P. A. (2025). The importance of tropical tree-ring chronologies for global change research. *Quaternary Science Reviews*, 355, 109233. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109233>
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550–1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Guo, Q., Potter, K. M., Ren, H., & Zhang, P. (2023). Impacts of exotic pests on forest ecosystems: An update. *Forests*, 14(3), 605. <https://doi.org/10.3390/f14030605>
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., Sáenz-Romero, C., Hartmann, H., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1), 1761. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- 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>
- Howard, I. M., Stahle, D. W., Torbenson, M. C., & Griffin, D. (2021). The summer precipitation response of latewood tree-ring chronologies in the southwestern United States. *International Journal of Climatology*, 41(5), 2913-2933. <https://doi.org/10.1002/joc.6997>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2005). Guía para la interpretación de cartografía geológica. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825231767>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Author. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & Villanueva Díaz, J. (2013). Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques*, 19(1), 93-105. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61727444007>
- IUSS Working Group (WRB). (2022). *World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (4th ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS). <https://wrb.isric.org/documents/>
- Jalakas, P., Takahashi, Y., Waadt, R., Schroeder, J. I., & Merilo, E. (2021). Molecular mechanisms of stomatal closure in response to rising vapour pressure deficit. *New Phytologist*, 232(2), 468–475. <https://doi.org/10.1111/nph.17592>
- Kashian, D. M., Zak, D. R., Barnes, B. V., & Spurr, S. H. (2022). *Forest ecology* (5th ed.). <https://www.wiley.com/en-be/Forest+Ecology%2C+5th+Edition-p-9781119476146#download-product-flyer>
- Kozłowski, T. T., & Pallardy, S. G. (2002). Acclimation and adaptive responses of woody plants to environmental stresses. *Botanical Review*, 68, 270–334. [https://doi.org/10.1663/0006-8101\(2002\)068\[0270:AAAROW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0006-8101(2002)068[0270:AAAROW]2.0.CO;2)
- Lavender, D. P., & Hermann, R. K. (2014). *Douglas-fir: the genus Pseudotsuga*. Oregon State University. <https://ir.library.oregonstate.edu/concern/defaults/sf268560k>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Leverenz, J. W. (1981). Photosynthesis and transpiration in large forest-grown Douglas-fir: Interactions with apical control. *Canadian Journal of Botany*, 59(12), 2568–2576. <https://doi.org/10.1139/b81-308>
- Miranda-Briones, R., Cerano-Paredes, J., Esquivel-Arriaga, G., Morató-Farreras, J., Cervantes-Martínez, R., Sánchez-Cohen, I., & Gómez-Nisino, A. (2022). Variabilidad de la precipitación (1660–2018) para el oeste de Chihuahua inferida con anillos de árboles. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(3), 349–366. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2021.08.052>
- Morales-Estrada, R., Correa-Díaz, A., Villanueva-Díaz, J., Villanueva-Morales, A., & Monterroso-Rivas, A. I. (2025). La dendrocronología en los últimos setenta años en México. *Current Topics in Agronomic Science*, 5. <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2024.05.01>
- Muñoz, S. J. (2019). *ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>
- Novick, K. A., Ficklin, D. L., Grossiord, C., Konings, A. G., Martínez-Vilalta, J., Sadok, W., Trugman, A. T., Williams, A. P., Wright, A. J., Abatzoglou, J. T., Dannenberg, M. P., Gentine, P., Guan, K., Johnston, M. R., Lowman, L. E. L., Moore, D. J. P., & McDowell, N. G. (2024). The impacts of rising vapour pressure deficit in natural and managed ecosystems. *Plant, Cell & Environment*, 47(9), 3561–3589. <https://doi.org/10.1111/pce.14846>
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of woody plants* (3rd ed.). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780120887651/physiology-of-woody-plants>
- Pohl, K., Therrell, M. D., Blay, J. S., Ayotte, N., Hernandez, J. J. C., Castro, S. D., Oviedo, E. C., Elvir, J. A., Elizondo, M. G., Opland, D., Park, J., Pederson, G., Salazar, S. B., Selem, L. V., Diaz, J. V., & Stahle, D. W. (2003). A cool-season precipitation reconstruction for Saltillo, Mexico. *Tree-Ring Research*, 59(1), 11–19. <http://hdl.handle.net/10150/262547>
- Pompa-García, M., & Hadad, M. A. (2016). Sensitivity of pines in Mexico to temperature varies with age. *Atmósfera*, 29(3), 209–219. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.03.03>
- Pompa-García, M., Camarero, J. J., Valeriano, C., & Vivar-Vivar, E. D. (2022). Climate sensitivity of seasonal radial growth in young stands of Mexican conifers. *International Journal of Biometeorology*, 66(8), 1711–1723. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02312-3>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Restaino, C. M., Peterson, D. L., & Littell, J. (2016). Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US

- forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(34), 9557-9562. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602384113>
- Robinson, W. J., & Evans, R. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59–64. <https://www.treeringsociety.org/TRBTRR/TRBTRR.htm#Vol40>
- Rupp, D. E., Shafer, S. L., Daly, C., Jones, J. A., & Frey, S. J. K. (2020). Temperature gradients and inversions in a forested Cascade Range basin: Synoptic- to local-scale controls. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(23), e2020JD032686. <https://doi.org/10.1029/2020JD032686>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ra ed.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A., & Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6), 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. <https://search.worldcat.org/es/title/460061751>
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press.
- Turner, J., & Mitchell, S. J. (2003). The effect of short day treatments on containerized Douglas-fir morphology, physiology and phenology. *New Forests*, 26(3), 279–295. <https://doi.org/10.1023/A:1024406704381>
- Tyree, M. T., & Zimmermann, M. H. (2002). The cohesion-tension theory of sap ascent. In *Xylem structure and the ascent of sap* (pp. 135–171). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04931-0_3
- 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>
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1), 117–131. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Poulos, H. M., Therrell, M. D., Howard, I., Martínez-Sifuentes, A. R., Hermosillo-Rojas, D., Cerano-Paredes, J., & Estrada-Ávalos, J. (2022). Climate and the radial growth of conifers in borderland natural areas of Texas and Northern Mexico. *Atmosphere*, 13(8), 1326. <https://doi.org/10.3390/atmos13081326>
- VoorTech. (2021). *Measure J2X software: The tree ring measuring program project J2X*. VoorTech. <https://www.voortech.com/projectj2x/release/index.html>
- Yuan, W., Zheng, Y., Piao, S., Ciais, P., Lombardozzi, D., Wang, Y., Ryu, Y., Chen, G., Dong, W., Hu, Z., Jain, A. K., Jiang, C., Kato, E., Li, S., Lienert, S., Liu, S., Nabel, J. E. M. S., Qin, Z., Quine, T., ... Yang, S. (2019). Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 5(8), eaax1396. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1396>
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38, 431–436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>
- Zuidema, P. A., Babst, F., Groenendijk, P., Trouet, V., Abiyu, A., Acuña-Soto, R., Adenesky-Filho, E., Alfaro-Sánchez, R., Aragão, J. R. V., Assis-Pereira, G., Bai, X., Barbosa, A. C., Battipaglia, G., Beeckman, H., Botosso, P. C., Bradley, T., Bräuning, A., Brienen, R., Buckley, B. M., ... Zhou, Z.-K. (2022). Tropical tree growth driven by dry-season climate variability. *Nature Geoscience*, 15(4), 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00911-8>