



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS
FORESTALES**

**DENDROCRONOLOGÍA EN *Pinus
montezumae* Lamb., ANÁLISIS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESTACIÓN
FORESTAL EXPERIMENTAL
ZOQUIAPAN**

TESIS

**Que como requisito para obtener
el grado de:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

Presenta:

MIGUEL ÁNGEL ORTEGA CERVANTES

Bajo la supervisión de: DR. ALEJANDRO CORONA AMBRÍZ



**Maestría en Ciencias
en Ciencias Forestales**



Chapingo, Estado de México, abril de 2025



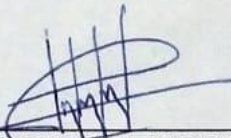
**DENDROCRONOLOGÍA EN *Pinus montezumae* Lamb., ANÁLISIS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESTACIÓN FORESTAL EXPERIMENTAL
ZOQUIAPAN**

Tesis realizada por **MIGUEL ÁNGEL ORTEGA CERVANTES** bajo la supervisión
del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR: 
DR. ALEJANDRO CORONA AMBRÍZ

CODIRECTOR: 
DRA. LILIANA CUAPIO HERNÁNDEZ

ASESOR: 
DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS CAPÍTULO 3	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS CAPÍTULO 3	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
DATOS BIOGRÁFICOS	VII
RESUMEN GENERAL	VIII
ABSTRACT	IX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Planteamiento del problema	3
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos particulares	5
1.5 Hipótesis	5
1.6 Contenido capitular del documento de titulación	6
1.7 Estructura capitular del documento de titulación	6
1.8 Literatura citada	7
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.	9
2.1 Cambio climático	9
2.2 Sequía	11
2.3 Dendrocronología	13
2.4 <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	23
2.5 Literatura citada	29
CAPÍTULO 3. INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO RADIAL DE <i>Pinus montezumae</i> Lamb. EN EL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL – POPOCATÉPETL	39
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	74

ÍNDICE DE CUADROS CAPÍTULO 3

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de las series de anillos de crecimiento de <i>P. montezumae</i>	48
Tabla 2. Estadísticas descriptivas de las cronologías estandarizada y residual de <i>P. montezumae</i>	49
Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson de la relación entre Índices de ancho de anillo y Temperatura.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la tesis.	6
--	---

ÍNDICE DE FIGURAS CAPÍTULO 3

Figura 1. Localización del área de estudio Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ).	43
Figura 2. Climograma de la región EFEZ.	46
Figura 3. Cronología de índices de ancho de anillo de <i>P. montezumae</i>	51
Figura 4. Vinculación de índice de ancho de anillo con eventos de sequía.	52
Figura 5. Coeficientes de correlación de precipitación e índices de ancho de anillo, A. estándar, B. residual.	53
Figura 6. Coeficientes de correlación de temperatura e índices de ancho de anillo. A. Relación temperatura máxima – cronología estándar. B. Relación temperatura máxima – cronología residual. C. Relación temperatura mínima – cronología estándar. D. Relación temperatura mínima – cronología residual. E. Relación temperatura media – cronología estándar. F. Relación temperatura media – cronología residual.	56

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme salud, conocimientos y fortaleza para seguir adelante, superar cada obstáculo y alcanzar mis metas.

A mi madre, su sacrificio y dedicación han sido la luz que ilumina mi camino. Desde las primeras raíces de mi educación hasta este momento de cosecha académica, su amor ha sido el combustible que me impulsa a alcanzar nuevas alturas.

A la memoria de mi padre, quien, aunque ya no está físicamente, continúa iluminando mi camino. Su amor sigue siendo la fuerza que me impulsa a superar cada desafío. Gracias papá, por ser mi guía y mi inspiración eterna.

A mis hermanos, ustedes han sido mis compañeros de travesía, compartiendo risas, lágrimas y éxitos. Juntos hemos superado obstáculos, y su presencia ha hecho que este viaje sea mucho más memorable.

A mi familia, abuelos, tíos, primos, y demás seres queridos, su apoyo ha sido un tejido invisible pero sólido que ha sostenido mi camino. Cada palabra de aliento, cada gesto de amor ha sido un recordatorio constante de que no estoy solo en esta travesía.

A mis amigos, ustedes son las hojas que dan color y vitalidad a mi árbol de la vida. Su amistad ha sido un regalo precioso, brindándome momentos de alegría y alivio en los tiempos más desafiantes.

A ti, por acompañarme en cada paso y apoyarme en cada desafío. Gracias por tu paciencia, tu fe en mí y por llenar este camino de felicidad.

A cada uno de ustedes, quiero expresar mi agradecimiento por su comprensión, paciencia y aliento constante durante los años de estudio.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por su apoyo financiero, el cual ha sido fundamental para continuar con mi formación académica y llevar a cabo esta investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo, mi sincero agradecimiento por proporcionar un entorno académico propicio para el crecimiento intelectual y de investigación.

A la División de Ciencias Forestales por la accesibilidad al uso de las instalaciones y el apoyo de su personal académico y administrativo.

A mi director el Dr. Alejandro, quien desempeñó el papel fundamental de director de mi investigación. Su orientación experta, dedicación y sabiduría han sido una fuente invaluable de inspiración. Cada consejo brindado ha sido como un faro que ilumina mi camino académico, guiándome hacia la excelencia.

A la Dra. Liliana por su compromiso y guía como asesora de mi investigación. Su experiencia y perspicacia fueron esenciales para dar forma a mi trabajo y enriquecer mi comprensión del campo de la dendrocronología. Su apoyo constante ha sido un factor clave en el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Alejandro Ismael por su participación como asesor, enriqueciendo significativamente mi experiencia académica, proporcionando una variedad de perspectivas y conocimientos que han ampliado mi visión sobre el cambio climático.

Agradezco sinceramente a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera significativa a la realización y culminación de mi Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo. Este logro no habría sido posible sin el generoso apoyo de aquellos que han compartido su conocimiento, experiencia y recursos a lo largo de este emocionante viaje académico.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Miguel Ángel Ortega Cervantes

Fecha de nacimiento: 05 de abril de 1995

Lugar de nacimiento: Xalapa de Enríquez, Veracruz

CURP: OECM950405HVZRRG04

Profesión: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

Cedula profesional: 14528319

Desarrollo académico

Bachillerato: 2010-2013 Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario N. 131, Juchique de Ferrer, Veracruz.

Licenciatura: 2014-2018 Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Enseñanza e Investigación en Suelos, Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Texcoco, Estado de México.

RESUMEN GENERAL

DENDROCRONOLOGÍA EN *Pinus montezumae* Lamb., ANÁLISIS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ESTACIÓN FORESTAL EXPERIMENTAL ZOQUIAPAN

La dendrocronología, a través de los anillos de crecimiento de los árboles, permite una comprensión profunda de la interacción entre los bosques y el clima. El objetivo del presente estudio fue analizar la influencia de la precipitación y temperatura, incluyendo eventos climáticos extremos, en el crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb., mediante métodos dendrocronológicos, con el fin de evidenciar patrones asociados al cambio climático en la región. Se extrajeron 51 núcleos de crecimiento, aplicando métodos dendrocronológicos para construir las cronologías de anillo total, madera temprana y madera tardía, y correlacionarlas con los datos climáticos locales de precipitación y temperatura. Los resultados indican que *P. montezumae* es apta para realizar estudios dendrocronológicos, evidenciando una relación directa entre el crecimiento del árbol y las variaciones climáticas, principalmente con la precipitación. El crecimiento radial se asocia con condiciones propias del clima, las temperaturas máximas prolongadas durante los periodos sin lluvia afectan negativamente el crecimiento, pero el aumento en la precipitación lo favorece; en el mes más lluvioso, la saturación hídrica lo limita, aunque mayores temperaturas máximas lo benefician. Estos hallazgos resaltan su sensibilidad a sequías y lluvias torrenciales, manifestaciones cada vez más frecuentes bajo el contexto de cambio climático. Este estudio destaca a *P. montezumae* como indicador del cambio climático, aportando información para entender y prever su impacto en los ecosistemas forestales.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, crecimiento radial, variabilidad climática, sensibilidad climática.

¹Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Miguel Ángel Ortega Cervantes

Director de tesis: Dr. Alejandro Corona Ambríz

ABSTRACT
DENDROCHRONOLOGY IN *Pinus montezumae* Lamb, CLIMATE
CHANGE ANALYSIS AT THE ZOQUIAPAN FOREST
EXPERIMENTAL STATION

Dendrochronology, through tree growth rings, allows a deep understanding of the interaction between forests and climate. The objective of this study was to analyze the influence of precipitation and temperature, including extreme climatic events, on the growth of *Pinus montezumae* Lamb, using dendrochronological methods, to demonstrate patterns associated with climate change in the region. Fifty-one growth cores were extracted, applying dendrochronological methods to construct chronologies of the total rings, earlywood, and latewood, and correlate them with local climatic data on precipitation and temperature. The results indicate that *P. montezumae* is suitable for dendrochronological studies, showing a direct relationship between tree growth and climatic variations, mainly precipitation. Radial growth is associated with climatic conditions: the prolonged maximum temperatures during periods without rain negatively affect growth, but increased precipitation favors it; in the rainiest month, water saturation limits it, although higher maximum temperatures benefit it. These findings highlight its sensitivity to droughts and torrential rains, which are increasingly frequent manifestations under the context of climate change. This study highlights *P. montezumae* as an indicator of climate change, providing information to understand and predict its impact on forest ecosystems.

Keywords: Growth rings, radial growth, climate variability, climate sensitivity.

¹Master's Thesis in Forest Sciences, Chapingo Autonomous University

Author: Miguel Ángel Ortega Cervantes

Thesis Advisor: Dr. Alejandro Corona Ambriz.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.

1.1 Antecedentes

El cambio climático representa una amenaza para los ecosistemas forestales, ya que las proyecciones para México anticipan una disminución en la precipitación y un aumento de temperatura hacia mediados de siglo, lo que podría afectar negativamente a los bosques de alta montaña (PECC, 2014; Manzanilla-Quiñones et al., 2018). Sin embargo, estudios recientes sugieren que, en algunos casos, el aumento en la temperatura podría favorecer el crecimiento de ciertas especies de alta montaña (Astudillo-Sánchez et al., 2019). En este contexto, resulta esencial aplicar métodos dendrocronológicos para evaluar cómo factores como la sequía y el cambio climático afectan el crecimiento de los árboles y, en particular, su respuesta a eventos climáticos extremos.

La dendrocronología es una ciencia moderna que permite estudiar el impacto de factores climáticos y ecológicos en el crecimiento de los árboles a través del análisis de sus anillos de crecimiento, los cuales registran variaciones en su grosor en respuesta a condiciones ambientales, edáficas, topográficas y ecológicas específicas de su entorno (Fritts, 1976; Stahle et al., 2011). En México, el conocimiento de las condiciones climáticas del pasado es limitado debido a la corta duración de los registros meteorológicos, que en su mayoría tienen menos de 70 años, esto convierte a los anillos de crecimiento en una fuente indirecta, pero confiable, para comprender la relación histórica entre el clima y el crecimiento de los árboles a lo largo de su vida, que puede alcanzar varios siglos (Villanueva et al., 2010).

Las especies de coníferas, que producen anillos de crecimiento anuales bien definidos, permiten establecer una correlación entre el grosor de estos anillos y las condiciones climáticas durante su formación. Así, los anillos más gruesos tienden a indicar condiciones favorables para el crecimiento, mientras que los anillos más delgados sugieren limitaciones en su desarrollo (Fritts, 1976). De esta manera, es

posible identificar la presencia y efectos de sequías o periodos húmedos en el sitio donde se desarrollan los árboles (Stahle et al., 2011; 2016).

Este tipo de análisis es particularmente útil en los ecosistemas forestales de México, donde se ha observado que la precipitación es un factor limitante para el crecimiento de los árboles, especialmente en las zonas del norte y centro del país (Cerano-Paredes et al., 2013; Constante-García et al., 2010).

Este estudio tiene como objetivo principal analizar la sensibilidad de *Pinus montezumae* Lamb. a efectos del cambio climático en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, evaluando cómo el incremento anual de los anillos de crecimiento responde a variaciones climáticas y a la ocurrencia de sequías. Con este análisis, se aportarán datos significativos sobre el impacto del cambio climático en los bosques de alta montaña, así como sobre la resiliencia y adaptabilidad de estas especies ante eventos climáticos extremos.

1.2 Justificación

La comprensión de cómo el clima y sus variaciones extremas impactan el crecimiento de los árboles es crucial, especialmente en un contexto de cambio climático que plantea desafíos significativos para los ecosistemas forestales. En México, los bosques de alta montaña representan áreas de gran importancia ecológica debido a su biodiversidad y a los servicios ecosistémicos que proveen, como la regulación del agua y la captura de carbono. Sin embargo, estos ecosistemas también son particularmente vulnerables a las variaciones climáticas y a fenómenos extremos, como las sequías, que pueden afectar la salud y supervivencia de las especies arbóreas que allí crecen.

La Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), área de estudio de este proyecto, se encuentra dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, una región de importante relevancia ecológica y socioambiental y clave para la provisión de agua al valle de México, con funciones fundamentales como la regulación climática y la captura de carbono. Además, es un corredor biológico prioritario con alta diversidad ecosistémica y presencia de especies endémicas y amenazadas (CONANP, 2021). El hecho de que la EFEZ esté ubicada en este contexto refuerza

la importancia de estudiar cómo las especies arbóreas como *P. montezumae*, responden a los efectos del cambio climático, ya que los resultados pueden tener implicaciones directas en la conservación de los ecosistemas del Parque y en la gestión de los servicios ecosistémicos que provee.

Aunque la dendrocronología ha avanzado significativamente en el país, y se cuenta con una considerable cantidad de cronologías para estudiar los efectos del clima en los árboles, la información específica sobre los ecosistemas de alta montaña mexicanos sigue siendo limitada (Astudillo-Sánchez et al., 2019; Gutiérrez-García y Ricker, 2019; Villanueva-Díaz, Cerano-Paredes et al., 2015). La falta de estudios en esta región es una limitante para entender a fondo cómo el cambio climático y sus efectos interactúan con el crecimiento de especies de alta montaña, como *P. montezumae*, en zonas particularmente sensibles y vulnerables al aumento de temperatura y a las variaciones en la precipitación.

Este estudio busca generar conocimiento mediante el análisis de la relación entre el clima, los fenómenos climáticos extremos y el crecimiento de los árboles en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan. Al evaluar la respuesta de *P. montezumae* a los cambios en las condiciones climáticas, este trabajo contribuirá a un entendimiento más profundo de la sensibilidad y la resiliencia de los bosques de alta montaña frente a eventos climáticos extremos, y proveerá datos clave para la gestión y conservación de estos ecosistemas en un contexto de cambio climático.

1.3 Planteamiento del problema

El cambio climático, impulsado principalmente por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y las emisiones industriales, representa una de las mayores amenazas para los ecosistemas forestales en la actualidad. Este fenómeno ha provocado un aumento sostenido de las temperaturas globales, una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos y cambios en los patrones de precipitación, alteraciones que están transformando la dinámica y el equilibrio de los bosques.

En los ecosistemas de alta montaña, donde se encuentran poblaciones clave de *P. montezumae*, los efectos del cambio climático son especialmente evidentes. Estas

áreas, debido a su sensibilidad a las variaciones climáticas, han experimentado una disminución en el crecimiento radial de los árboles, evidenciada a través de los anillos de crecimiento. Estos anillos, que reflejan la historia de las condiciones ambientales, muestran cómo factores como las sequías recurrentes, el aumento de las temperaturas estacionales y la reducción en la disponibilidad de agua afectan negativamente el desarrollo y la productividad de esta especie.

Además, las condiciones ambientales cambiantes favorecen la proliferación de especies competidoras que presentan una mayor tolerancia al estrés hídrico y a temperaturas elevadas. Estas especies pueden desplazar a *P. montezumae*, limitando su presencia en áreas donde previamente era dominante. Este fenómeno de desplazamiento competitivo, combinado con el declive en el crecimiento radial, reduce el número de individuos de *P. montezumae* en su rango actual de distribución, alterando la estructura y funcionalidad de los bosques de alta montaña. Como resultado, se pone en riesgo la biodiversidad local y la provisión de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación hídrica, la conservación del suelo y la captura de carbono, críticos para mitigar el impacto del cambio climático.

A pesar de su importancia ecológica y económica, la información específica sobre cómo las variaciones climáticas afectan al crecimiento y supervivencia de *P. montezumae* sigue siendo limitada, ya que los estudios dendrocronológicos, que permiten analizar la relación entre las condiciones climáticas y el desarrollo de los anillos de crecimiento, son escasos en la región de estudio. Esto impide desarrollar estrategias de manejo adecuadas para preservar su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proveen, en un contexto de condiciones climáticas cambiantes.

Frente a esta problemática, resulta fundamental analizar la relación entre el crecimiento radial de especies como *P. montezumae*, y las variables climáticas en zonas específicas de alta montaña. Este estudio busca abordar esta necesidad al evaluar cómo el clima, el cambio climático y los fenómenos extremos impactan el crecimiento de la especie en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, aportando así información clave para la conservación, adaptación y manejo de los bosques en esta región.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar la relación entre la variabilidad de precipitación y temperatura, incluyendo eventos climáticos extremos, y el crecimiento de *Pinus montezumae* en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan mediante métodos dendrocronológicos, con el fin de evidenciar patrones asociados al cambio climático en la región.

1.4.2 Objetivos particulares

Realizar la colecta de muestras de *Pinus montezumae* en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan y aplicar métodos dendrocronológicos para generar una cronología de anillos de crecimiento que refleje la variabilidad anual.

Recopilar y analizar datos históricos de temperatura y precipitación de la región de estudio, para detectar tendencias climáticas significativas que puedan impactar el crecimiento de *Pinus montezumae*.

Relacionar las cronologías de crecimiento de *Pinus montezumae* con las series históricas de temperatura y precipitación, para determinar correlaciones que permitan identificar señales de cambio climático y la sensibilidad de la especie a variaciones ambientales.

1.5 Hipótesis

El incremento anual de los anillos de crecimiento de *P. montezumae* está significativamente correlacionado con las variaciones anuales de precipitación y temperatura, donde mayores niveles de precipitación y temperaturas moderadas favorecen el crecimiento radial.

Las sequías y otros fenómenos climáticos extremos afectan negativamente el crecimiento de la especie, generando anillos más delgados en los años en que se presentan estos eventos.

Las proyecciones de cambio climático, con aumentos en la temperatura y disminuciones en la precipitación, resultará en una reducción general en el crecimiento de *P. montezumae* en los próximos años.

1.6 Contenido capitular del documento de titulación

El documento de titulación contiene el contenido siguiente: portada, hoja de aprobación con firmas del comité asesor, tabla de contenido, lista de cuadros, lista de figuras, dedicatoria, agradecimientos, datos biográficos del autor, resumen general y abstract. También se desglosa el capítulo uno que corresponde a la Introducción general, en la cual se describen los antecedentes y la importancia del problema de estudio, preguntas de investigación, justificación, objetivos e hipótesis de la investigación. En el capítulo dos se incluye la revisión de literatura sobre la información existente del tema de estudio. El capítulo tres aborda los resultados obtenidos en la investigación, el cual se encuentra en formato de Artículo científico. Finalmente, en el capítulo cuatro se incluyen las conclusiones generales obtenidas de la investigación.

1.7 Estructura capitular del documento de titulación

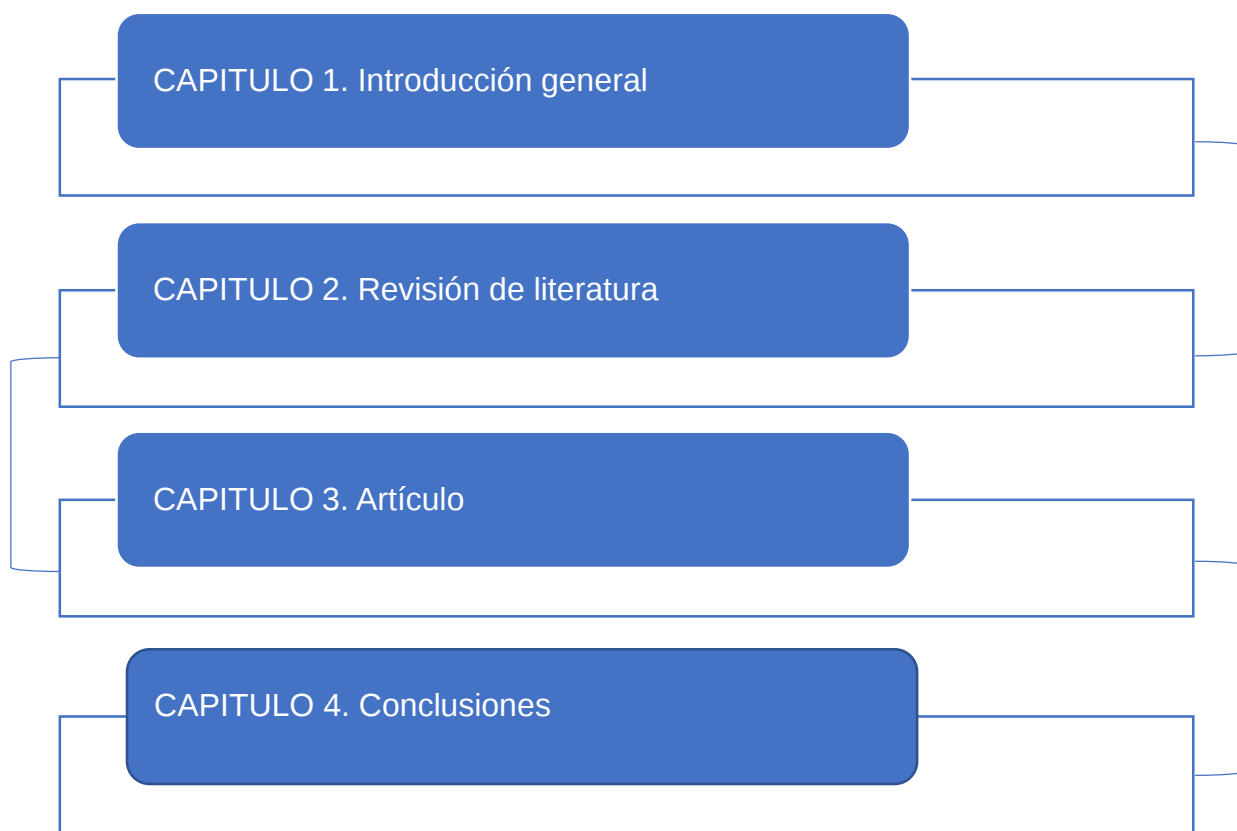


Figura 1. Estructura de la tesis.

1.8 Literatura citada

- Astudillo-Sánchez, C. C., Fowler, M. S., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R. y Soria-Díaz, L. (2019). Recruitment and facilitation in *Pinus hartwegii*, a Mexican alpine treeline ecotone, with potential responses to climate warning. *Trees*, 33, 1087–1100 <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01844-3>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Trucios-Caciano, R. y Guerrero-Soto, J. (2013). Reconstrucción de sequías fuertes en el Parque Nacional “Pico de Tancítaro”, Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12, 57–62. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2012.06.026>
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J. y Estrada-Ávalos, J. (2010). Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto técnico número 19. Gómez Palacio, Durango: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. London: Academic Press.
- Gutiérrez-García, G. y Ricker, M. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902676. <http://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>
- Manzanilla-Quiñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., JiménezPérez, J., Treviño-Garza, E. J. y Yerena-Yamallel, J. I. (2018). Escenarios de cambio climático (CMIP-5) para tres áreas naturales protegidas en el Eje Neovolcánico Transversal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9, 515–537. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.255>
- Programa Especial de Cambio Climático (PECC). (2014). Programa especial de cambio climático 2014-2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), México.

- Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Burnette, J., Cerano, P. J., Heim, R. R., Jr., Fye, F. K. et al. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38, 1–4. <https://doi.org/10.1029/2010gl046472>
- Stahle, D.W., Cook, E.R., Burnette, D.J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J.N., Griffin, D., Cook, B.I., Acuña-Soto, R., Torbenson, 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.
- Villanueva, J., Cerano, J., Stahle, D.W., Constante, V., Vázquez, L., Estrada, J., & Benavides, J. de Dios. (2010). Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 7-30.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Vázquez-Selem, L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L. et al. (2015). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 86, 5–14. <https://doi.org/10.14350/rig.42003>

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1 Cambio climático.

El cambio climático se define como una alteración significativa y duradera de los patrones climáticos globales o regionales, atribuida en gran medida a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, que incrementan la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2020), este fenómeno se manifiesta en un aumento de las temperaturas globales, cambios en los patrones de precipitación, el derretimiento de glaciares y el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos.

De acuerdo con la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2023) el cambio climático se manifiesta a través de fenómenos como el aumento de las temperaturas globales, la variabilidad en los patrones de precipitación y la ocurrencia de eventos climáticos extremos. Estas alteraciones tienen efectos directos e indirectos en los ecosistemas forestales, modificando la distribución de especies, la disponibilidad de recursos hídricos y la frecuencia de incendios forestales.

En la actualidad, este fenómeno ha adquirido relevancia debido a su impacto en nuestro planeta, especialmente en los ecosistemas forestales, donde ha generado efectos significativos a nivel global, y México no es la excepción, el Inventario Estatal Forestal y de Suelos del Estado de México 2022 indica que este problema está afectando las comunidades forestales del Estado, provocando una notable disminución en las poblaciones de ciertas especies de pinos, incluida *P. montezumae* (Probosque, 2022). Los efectos de este fenómeno se manifiestan a través de alteraciones en la temperatura, los patrones de precipitación y la frecuencia de fenómenos climáticos extremos, lo que pone en riesgo la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas forestales (González Hernández et al., 2015).

El aumento en la temperatura y las variaciones en las precipitaciones influyen directamente en la productividad forestal. Estudios han revelado que el crecimiento de los árboles puede reducirse notablemente en respuesta a los cambios climáticos,

lo que afecta tanto la estructura como el funcionamiento de los ecosistemas forestales (Gómez-Guerrero, et al., 2021). En particular, se ha observado una disminución en la productividad de los bosques de coníferas en el centro de México, una de las zonas más vulnerables al cambio climático debido a su elevada sensibilidad a los cambios en la temperatura y las precipitaciones (Probosque, 2022).

Los ecosistemas forestales, en especial los bosques templados, son particularmente sensibles a los efectos del cambio climático. Esta vulnerabilidad se ve exacerbada en aquellos ecosistemas fragmentados o que ya han sido afectados por actividades humanas, como la tala o la expansión agrícola (Gómez-Guerrero et al., 2021).

En un estudio realizado en la Sierra Madre Oriental, los anillos de crecimiento de coníferas revelaron una respuesta negativa significativa a los episodios de altas temperaturas y sequías prolongadas. Este fenómeno refleja cómo el cambio climático puede exacerbar el estrés hídrico y reducir la capacidad de los árboles para realizar procesos vitales como la fotosíntesis, afectando su productividad y supervivencia. Por tanto, la conservación de estos ecosistemas requiere estrategias de manejo adaptativo que incluyan la restauración forestal y la gestión de recursos hídricos (Villanueva-Díaz et al., 2022).

En específico, el género *Pinus*, ampliamente distribuido en diferentes zonas climáticas, muestra una alta sensibilidad a las condiciones ambientales cambiantes. En el caso de *Pinus tabulaeformis* Carr. en China, estudios recientes identificaron una correlación negativa entre las temperaturas de mayo-junio y el crecimiento radial, y una relación positiva con la precipitación de mayo. Estas dinámicas resaltan la vulnerabilidad de esta especie a los escenarios de calentamiento global, que proyectan aumentos de temperatura y cambios mínimos en la precipitación. Este patrón podría resultar en una disminución generalizada del crecimiento de los pinos bajo condiciones climáticas futuras (Wang et al., 2024) .

De manera similar, en los bosques mediterráneos donde coexisten especies nativas como *Pinus pinaster* Aiton. y *Pinus nigra* J.F.Arnold., junto con especies exóticas

como *Cupressus arizonica* Greene., se ha observado que los pinos nativos presentan una mayor susceptibilidad al estrés hídrico inducido por sequías extremas. Esto se traduce en una menor capacidad de resiliencia comparada con especies exóticas, lo que podría alterar la dominancia relativa en estas comunidades forestales. Estas observaciones subrayan la necesidad de integrar estudios de crecimiento y mortalidad para predecir los impactos del cambio climático en la dinámica poblacional de los pinos nativos (Medina-Villar et al., 2024).

2.2 Sequía.

La sequía es uno de los fenómenos naturales más complejos a nivel global, lo que ha dificultado la formulación de una definición precisa y universalmente aceptada. No obstante, hacia el año 2000, Wilhite (2000) propuso una conceptualización ampliamente reconocida, definiéndola como un período en el cual la precipitación registrada es significativamente inferior a la esperada, resultando insuficiente para sostener las actividades humanas y generando impactos sociales, económicos y ambientales.

La clasificación de la sequía, basada en los impactos que ocasiona, distingue cuatro tipos principales: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica (Wilhite & Glantz, 1985).

La sequía meteorológica se fundamenta en datos climáticos y se describe como una desviación negativa de la precipitación respecto a la media histórica durante un período determinado. Se la define como un intervalo de tiempo, usualmente de meses o años, en el que la humedad aportada se encuentra consistentemente por debajo de los valores climatológicos esperados (Marcos Valiente, 2001).

La sequía agrícola está directamente vinculada a la meteorológica, pero considera las necesidades biológicas de los cultivos y las propiedades del suelo. No siempre coincide con la sequía meteorológica, ya que esta última no necesariamente implica niveles de humedad insuficientes en el subsuelo para sostener el crecimiento de cultivos durante su duración (Marcos Valiente, 2001).

Por su parte, la sequía hidrológica se refiere a la reducción en los caudales de ríos y en los niveles de cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Este tipo de sequía evidencia un desfase temporal entre la falta de lluvias y la disminución de la disponibilidad de agua, lo que complica el uso de mediciones hidrológicas como indicador del inicio de la sequía, aunque sí permiten evaluar su intensidad (Marcos Valiente, 2001).

Finalmente, la sequía socioeconómica ocurre cuando la escasez de agua afecta la economía y el bienestar de la población. Es frecuente en contextos donde la sequía agrícola tiene un impacto directo en sectores económicos vulnerables, como en regiones menos desarrolladas. En estas áreas, la dependencia de actividades agrícolas incrementa la incidencia inmediata de la sequía socioeconómica (Marcos Valiente, 2001).

En cuanto a su relación con el cambio climático, diversos estudios destacan que la intensificación de las sequías está estrechamente vinculada al aumento de la temperatura global y a las alteraciones en los patrones de precipitación, derivadas de la creciente concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2021). Las proyecciones indican que en las próximas décadas la frecuencia y severidad de las sequías aumentarán, exacerbando sus impactos negativos en ecosistemas y comunidades humanas (WMO, 2020).

En el contexto de México, la sequía representa un grave desafío. Según el Monitor de Sequía de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), al 31 de marzo de 2023, el 24 % del territorio nacional sufría de sequía moderada, mientras que un 23 % experimentaba sequías severas. Investigaciones como las de Magaña et al. (2012) han utilizado datos climáticos y modelos estadísticos para proyectar una disminución de la precipitación y un aumento en la temperatura, lo que podría intensificar las sequías y los eventos climáticos extremos, afectando negativamente a sectores como la agricultura, la silvicultura y el medio ambiente.

En el norte del país, Ravelo et al. (2014) señalaron que, en las últimas décadas, la región de la Cuenca del Pacífico Norte ha enfrentado sequías recurrentes y prolongadas. Durante los períodos de 1995-1996, 2001-2002, 2009-2010 y 2011-

2012, estas sequías tuvieron impactos significativos en la disponibilidad de agua, particularmente para actividades agrícolas y económicas. Por su parte, Neri y Magaña (2016) identificaron que la vulnerabilidad y el riesgo de sequía varían considerablemente en el territorio mexicano, siendo más altos en regiones con combinaciones desfavorables de factores físicos, económicos y sociales.

Los ecosistemas forestales son particularmente sensibles a la sequía. Dimitrakopoulos y Bemmerzouk (2003) demostraron que la falta de humedad en el suelo superficial limita el crecimiento de la vegetación herbácea en los sotobosques de diversas especies de pino, reduciendo su período de crecimiento y aumentando el riesgo de incendios forestales. Por otro lado, Saleska et al. (2007) estudiaron el impacto de la sequía en la Amazonia, evidenciando que la reducción en la disponibilidad de agua afecta la fotosíntesis y la transpiración, disminuyendo la biomasa y aumentando la mortalidad de plantas.

Este análisis ha sido ampliado en estudios como el de Anderson et al. (2018), indicando que las sequías recurrentes han incrementado la vulnerabilidad de los bosques amazónicos en el siglo XXI, afectando la fotosíntesis, la productividad primaria neta y la resiliencia de estos ecosistemas. Asimismo, Wei et al. (2022) analizaron cómo las sequías influyen en la dinámica de la vegetación y el equilibrio de los ecosistemas terrestres, observando que la falta de agua reduce la capacidad de las plantas para regular el intercambio de gases y agua con la atmósfera, afectando la biodiversidad y la estabilidad ecológica.

La sequía no solo representa un fenómeno climático complejo, sino también un desafío creciente en un mundo afectado por el cambio climático. Sus impactos abarcan dimensiones sociales, económicas y ambientales, lo que exige una gestión integral y la implementación de políticas para mitigar sus efectos, particularmente en regiones vulnerables como México y en ecosistemas sensibles como los forestales.

2.3 Dendrocronología.

La dendrocronología es una disciplina científica que se enfoca en el estudio de los anillos de crecimiento anuales de árboles y arbustos leñosos, facilitando así la

comprensión de las variaciones en su desarrollo anual (Coulthard & Smith, 2013). Mediante esta técnica, es posible analizar cómo las variaciones climáticas y ambientales afectan el desarrollo anual de los árboles, ya que los anillos reflejan las condiciones de su entorno. Desde el siglo XVIII, a través de la identificación de estos anillos, es posible determinar la edad de los árboles y, en casos más avanzados, reconstruir el clima y otros factores ecológicos de épocas pasadas. En 1737, Duhamel y De Buffon observaron anillos prominentes en árboles afectados por heladas, estableciendo una relación entre los patrones de crecimiento y los factores climáticos de aquel periodo (Studhalter, 1956; Schweingruber, 1988, como se citó en J.A.G. Jiménez, 2011). Cuando los árboles están sujetos a un factor limitante común, como condiciones climáticas adversas, sus anillos reflejan patrones similares; esta sincronía permite realizar dataciones cruzadas, generando un registro detallado y preciso de las tendencias de crecimiento anual en una región (Coulthard & Smith, 2013; Fritts, 1976).

Un principio fundamental en dendrocronología es el de la datación exacta, que asegura que cada anillo de crecimiento corresponde a un año específico, permitiendo la construcción de cronologías precisas (Giraldo, 2011). Para lograr una datación exacta, es necesario seguir principios clave como el uniformitarismo, que sostiene que los procesos que afectaron a los árboles en el pasado son los mismos que afectan en la actualidad, y la limitación, que establece que el crecimiento del árbol depende principalmente de los factores ambientales más restrictivos (Fritts, 1976). Además, el principio de repetibilidad juega un papel importante, ya que el patrón de crecimiento observado en los anillos de diferentes árboles de una misma especie en una región específica deben ser similares (Giraldo, 2011). Esto permite la creación de cronologías más amplias y robustas (Díaz-Ramírez, et al., 2016), lo que facilita el análisis de cambios ambientales. La sincronización cruzada, mediante la comparación y alineación de secuencias de anillos de árboles en una misma región, es otra técnica crucial, ya que permite corregir errores de datación y crear cronologías confiables (Manríquez & Fernández, 1995).

La dendrocronología se diversifica en múltiples subdisciplinas, cada una especializada en aspectos específicos de los anillos de crecimiento de los árboles. Estas subdisciplinas derivan su nombre de la palabra griega "dendro", que significa árbol, junto con un sufijo que indica su área de estudio (Speer, 2009). La dendroecología, por ejemplo, se enfoca en los procesos ecológicos dentro de los ecosistemas forestales, utilizando los anillos para analizar la dinámica de crecimiento bajo condiciones naturales o por el impacto del manejo forestal (Schweingruber, 1996; Rojas et al., 2020); esta subdisciplina incluye áreas como la dendroentomología, que estudia los brotes de insectos; la dendropirocronología, que analiza los incendios forestales; y la dendromastecología, que investiga la producción de conos en ciertas especies y el análisis del desplazamiento de especies arbóreas invasoras (Speer, 2009). La dendroarqueología es otra subdisciplina clave, que utiliza los anillos de crecimiento en estructuras de madera antigua para datar y correlacionar eventos históricos (Speer, 2009), mientras que la dendroclimatología permite reconstruir las condiciones climáticas del pasado, evaluando la frecuencia de eventos extremos como sequías y lluvias intensas, basándose en la relación entre el crecimiento arbóreo y las variaciones climáticas (Stahle et al., 2011, 2016, 2020; Zhang, 2015). Otras ramas, como la dendroquímica, investigan los elementos inorgánicos presentes en los anillos de los árboles, lo que ayuda a analizar factores ambientales como la contaminación o variaciones en los isótopos estables (Correa-Díaz, 2023), mientras que la dendrohidrología utiliza el análisis de anillos de crecimiento para reconstruir el historial hidrológico de una región, como los niveles de agua o los flujos de ríos. Un ejemplo notable es la reconstrucción del flujo del río Colorado a lo largo de 450 años realizada por Stockton y Jacoby (1976). Además, existen otras que se enfocan en eventos geológicos, la dendrogeomorfología investiga los movimientos de tierra, como deslizamientos y flujos de lodo, mediante la observación de alteraciones en los anillos de crecimiento causadas por disturbios en el terreno, y la dendrovulcanología, por su parte, analiza cambios en la estructura de los anillos para detectar la presencia de actividad volcánica (Speer, 2009). Finalmente, la dendrocronología continúa evolucionando y ampliándose, entre las aplicaciones

recientes se encuentra la integración de datos satelitales, como los índices de vegetación, que permiten correlacionar los patrones espacio-temporales observados desde el espacio con los ritmos de crecimiento registrados en los anillos de los árboles (Correa-Díaz et al., 2019).

En cuanto a los métodos utilizados en dendrocronología, el proceso comienza con la recolección de muestras en campo que provienen de árboles vivos o muertos, las cuales pueden ser obtenidas de diversas formas, tales como rodajas, que son cortes transversales de los árboles, muestras históricas, obtenidas de barcos, puertas de madera y muebles o núcleos de crecimiento, que se extraen mediante una barrena de incremento, lo que permite obtener muestras sin causar daño significativo al árbol (Speer, 2010). Las muestras se toman a una altura estándar, generalmente a 1.3 m sobre el nivel del suelo, para evitar las variaciones en el crecimiento causadas por factores locales (Fritts, 1976). Una vez recolectadas, las muestras son sometidas a un proceso de preparación que incluye lijado y limpieza para resaltar los anillos de crecimiento. Este proceso se realiza con papel de grano fino y progresivamente más fino para obtener una superficie lisa, paso esencial para asegurar que los anillos sean visualmente claros y para evitar errores en la identificación de anillos falsos o ausentes (Stokes & Smiley, 1968; Speer, 2010). Tras la preparación, se lleva a cabo el prefchado, que permite identificar posibles errores de datación, como los anillos falsos o la falta de anillos en ciertos años, los cuales pueden surgir por factores como sequías extremas o años de escaso crecimiento (Fritts, 1976), etapa crítica para minimizar errores en la datación, facilitar el proceso de sincronización cruzada y asegurar la precisión del análisis. Estas mediciones se realizan con herramientas de alta precisión, como el sistema LINTAB acoplado al software TSAP-Win o el software WinDendro, lo que garantiza una medición exacta a nivel de micrómetro (Schweingruber, 1988). Además, se emplean otros equipos especializados que permiten obtener datos confiables y de alta calidad para estudios dendrocronológicos y climáticos, como el sistema Velmex, que utiliza un carro de medición y un microscopio de alta resolución para registrar con exactitud las dimensiones de los anillos; el medidor de incrementos Carl Zeiss, diseñado para observaciones detalladas de muestras delgadas.

La datación cruzada es un paso clave en la creación de cronologías, que corresponde al estándar utilizado para alinear los patrones de ancho de anillos de crecimiento entre múltiples árboles, asegurando que cada anillo corresponda al año en que se formó (Stokes y Smiley, 1968). Mediante esta técnica, se utilizan herramientas como COFECHA o el paquete dplR del software R para verificar el fechado, asegurar la exactitud temporal de los anillos y reducir los errores de fechado (Holmes, 1983; Bunn, 2008), otras herramientas incluyen el software ARSTAN, que ayuda a evaluar series cronológicas mediante la extracción de tendencias de crecimiento, y programas como Tellervo, diseñados específicamente para gestionar datos dendrocronológicos y realizar verificaciones de datación. Posteriormente, se procede a la elaboración de cronologías, utilizando métodos estadísticos como la estandarización de series, que eliminan factores no climáticos, como el crecimiento relacionado con la edad del árbol, la competencia, presencia de incendios, etc. Las cronologías generadas pueden ser de varios tipos, como la cronología estándar, la cronología residual o la cronología ARSTAN, las cuales destacan las señales climáticas mediante la eliminación de ruidos provenientes de factores no climáticos (Cook, 1985) y pueden generarse mediante ARSTAN, una de las herramientas más utilizadas para este propósito, o por medio de librerías como dplR y dendroclim del software R, que también permiten la creación de cronologías ajustadas con spline para suprimir tendencias de bajo y medio nivel y así acentuar las señales anuales correspondientes al clima (Bunn, 2008). Además, librerías como treeclim facilitan el análisis y modelado de las relaciones entre variables climáticas y series dendrocronológicas, permitiendo evaluar de manera detallada las respuestas de los árboles a variaciones climáticas específicas (Zang & Biondi, 2014), por otro lado, herramientas como TRADER ayudan a analizar dinámicas de respuesta de los árboles a eventos de estrés climático, proporcionando un enfoque para interpretar cambios en patrones de crecimiento asociados con perturbaciones (Altman et al., 2014) y el software Tellervo, permite no solo la creación de cronologías sino también la gestión y visualización de los datos de manera eficiente, complementando el uso de software y librerías avanzadas (Brewer et al., 2014), estas herramientas en conjunto maximizan la precisión y la calidad de las

cronologías dendrocronológicas. La cronología estándar captura la señal común de todos los árboles de una región, la cronología residual elimina las influencias a largo plazo y se enfoca en la variabilidad climática anual, mientras que la cronología ARSTAN retiene elementos de autocorrelación que permiten estudiar patrones de crecimiento a largo plazo (Cook, 1985; Villanueva-Díaz et al., 2010).

Finalmente, una vez obtenidas las cronologías de crecimiento, estas se correlacionan con datos climáticos históricos para evaluar la sensibilidad de los árboles a factores como la precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media. Este análisis es crucial para comprender cómo las condiciones ambientales han influido en el crecimiento arbóreo a lo largo del tiempo e identificar el impacto de eventos extremos, como sequías prolongadas o picos de temperatura. Los modelos de respuesta climática, que asocian los índices de crecimiento con los registros climáticos, son herramientas fundamentales en esta etapa, ya que permiten cuantificar la relación entre la variabilidad climática y el crecimiento de los anillos (Fritts, 1976; Lara et al., 2019). La dendrocronología, mediante sus métodos rigurosos y sus aplicaciones interdisciplinarias, sigue siendo una herramienta fundamental para entender el impacto de la variabilidad climática, proporcionando perspectivas cruciales para enfrentar los desafíos del cambio climático en el futuro.

Estos métodos han sido ampliamente aplicados a nivel internacional, donde diversos estudios han demostrado cómo las cronologías de crecimiento arbóreo pueden revelar patrones clave de respuesta al cambio climático en distintas regiones del mundo. Los estudios aportan una comprensión detallada de la interacción entre factores climáticos, como la disponibilidad de agua y la temperatura, y el crecimiento radial de los árboles, siendo esenciales para prever el impacto del cambio climático en los bosques a escala global.

En Asia, se han realizado múltiples estudios en especies forestales con el fin de entender la respuesta de los árboles a los cambios climáticos, con particular énfasis en China. En el noroeste de este país, estudios en *Picea crassifolia* Kom. han identificado una fuerte relación entre el crecimiento radial y la disponibilidad de agua en ambientes áridos, resaltando la vulnerabilidad de estos bosques frente a la

desertificación. Este hallazgo subraya la importancia de la humedad del suelo para la supervivencia de especies sensibles a la sequía (Liang et al., 2021). Posteriormente, en la región semiárida del noreste de China, se exploró cómo el *Pinus sylvestris* L. reacciona a las sequías extremas, observándose que los árboles jóvenes muestran una reducción en resistencia y resiliencia ante eventos climáticos extremos consecutivos, lo cual destaca la relevancia de la edad de los bosques en la recuperación frente a condiciones adversas (Liu et al., 2023). En el suroeste de China, el crecimiento del *Pinus yunnanensis* Franch. se correlaciona negativamente con la temperatura de mayo y positivamente con la precipitación en junio, sugiriendo que este patrón podría guiar prácticas de manejo sostenible en áreas montañosas frente al cambio climático (Xie et al., 2024).

En Europa, especialmente en la región mediterránea, los estudios han abordado el impacto del cambio climático y la sequía sobre el crecimiento de diversas especies. En Turquía, se ha identificado que el crecimiento del *Pinus nigra* depende críticamente de las precipitaciones en primavera y verano, mientras que las bajas temperaturas invernales lo afectan negativamente. Este hallazgo resalta la importancia de enfoques de manejo forestal que tengan en cuenta tanto las necesidades hídricas como las condiciones climáticas locales, para mejorar la resiliencia de los bosques mediterráneos (Yaman et al., 2024). En España, investigaciones en rodales mixtos de *Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris* han revelado que la combinación de ambas especies mejora el uso eficiente del agua y aumenta la resistencia al estrés térmico, en comparación con rodales puros, lo que subraya el valor de la diversidad de especies como medida de adaptación al cambio climático (Askarieh et al., 2024).

En América del Norte, particularmente en México, investigaciones en coníferas como *Pinus arizonica* Engelm. y *Abies durangensis* Martínez. han mostrado una alta sensibilidad a factores climáticos, donde las precipitaciones invernales y las temperaturas primaverales son determinantes para el crecimiento radial. Esto sugiere que las alteraciones en los patrones estacionales de temperatura y precipitación pueden disminuir la capacidad de adaptación de estas especies en un

contexto de cambio climático (Villanueva-Díaz, 2022). Estos estudios en ecosistemas templados y subtropicales resultan esenciales para entender cómo el cambio climático afectará la capacidad de los bosques para almacenar carbono y contribuir al equilibrio climático global.

En las regiones tropicales, investigaciones en África, América del Sur y el sudeste asiático han examinado el crecimiento de la biomasa leñosa durante la estación seca, evidenciando su dependencia de las variaciones climáticas. En estos ecosistemas, un aumento en la precipitación estacional mejora la productividad leñosa, mientras que las temperaturas máximas elevadas la reducen, particularmente en zonas más cálidas y secas. Este patrón sugiere que el calentamiento global podría intensificar las disminuciones de biomasa en periodos de sequía en los trópicos, afectando la capacidad de estos bosques para capturar carbono a nivel global (Zuidema et al., 2022).

En conjunto, estos estudios internacionales en dendrocronología demuestran una amplia variabilidad en la respuesta de los árboles al cambio climático, en función de la especie y el ecosistema. El análisis de los patrones de crecimiento radial no solo permite medir la productividad y salud de los bosques, sino que también se convierte en una herramienta predictiva para comprender cómo el cambio climático podría impactar la estructura y función de los bosques en el futuro.

De manera similar, en México, los estudios dendrocronológicos han sido fundamentales para entender la relación entre el crecimiento radial de los árboles y las condiciones climáticas, lo cual permite reconstruir la variabilidad climática histórica y proyectar respuestas futuras en un contexto de cambio climático. Estas investigaciones se han centrado principalmente en especies de coníferas como *Pinus* y *Pseudotsuga*, así como en algunas especies de angiospermas como *Quercus* y *Taxodium*. La variedad de especies y regiones estudiadas en México resalta la importancia de la dendrocronología en la comprensión de los impactos del clima en diferentes ecosistemas forestales del país.

Un ejemplo destacado es el trabajo realizado en el noroeste de México en la cuenca del Río Mayo, donde se utilizó el análisis de anillos de *Pinus arizonica* para

reconstruir la precipitación y la escorrentía desde el año 1750. Esta reconstrucción mostró una correlación significativa entre el crecimiento radial y eventos climáticos extremos, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). La fase cálida de El Niño se asocia con aumentos en la precipitación invernal, mientras que La Niña contribuye a condiciones de sequía en la región. Esta relación climática es crucial para la planificación y gestión de los recursos hídricos, especialmente en contextos agrícolas donde la disponibilidad de agua es esencial para la producción (Martínez-Sifuentes et al., 2020).

En la Sierra Madre Occidental, el *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. ha demostrado ser un indicador confiable para estudiar la variabilidad hidroclimática de la cuenca del río Piaxtla, en Sinaloa. Utilizando la anchura de anillos de crecimiento de madera temprana, se logró reconstruir la precipitación de noviembre a abril y el caudal de noviembre a agosto. Esta reconstrucción reveló que los fenómenos de El Niño y la Oscilación Decadal del Pacífico influyen significativamente en la variabilidad climática regional. Este estudio no solo enfatiza la sensibilidad climática de *P. menziesii*, sino que también subraya el valor de los anillos de crecimiento para prever cambios en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca (Villanueva-Díaz et al., 2020).

En el noreste de México, se ha encontrado en el *Taxodium mucronatum* Ten., o ciprés mexicano, una especie con gran potencial para la reconstrucción climática a largo plazo. En la cuenca del Río Sabinas, el análisis de anillos de crecimiento de este ciprés permitió reconstruir la variabilidad de la precipitación y la temperatura máximas estacionales desde el año 1808. Los resultados indican que los períodos de sequía se correlacionan con índices como el Índice de Sequía de Palmer (PDSI) y el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI), además de eventos climáticos como el ENSO. Estas reconstrucciones ofrecen una perspectiva integral sobre la influencia de fenómenos de gran escala en la hidrología y la ecología de esta cuenca, mostrando la utilidad del *T. mucronatum* para gestionar los recursos hídricos frente a eventos climáticos extremos (Villanueva-Díaz et al., 2021).

La investigación en el estado de Durango, que abarca tanto coníferas como latifoliadas, ha sido particularmente productiva. En el caso del *Pinus duranguensis*, las cronologías de anillos de crecimiento se han utilizado para reconstruir el índice de precipitación-evapotranspiración estandarizado (SPEI) de los últimos 300 años en el oeste del estado. Este estudio mostró un aumento en la frecuencia de sequías desde finales del siglo XIX, en paralelo con un incremento de temperaturas debido al calentamiento global. La capacidad de esta especie para reflejar variaciones climáticas hace que sea un recurso crucial para entender la historia climática de la región y proyectar la disponibilidad de agua en el contexto del cambio climático (Cabral-Alemán et al., 2022).

Asimismo, estudios con *Quercus crassifolia* Bonpl. en Durango han mostrado que, a diferencia de muchas coníferas, esta especie de roble exhibe una alta sensibilidad a la precipitación invernal y primaveral. La respuesta de los anillos de crecimiento al clima sugiere que esta especie podría ser particularmente útil para entender las fluctuaciones de humedad en el ambiente, mostrando un crecimiento radial más alto en años con mayores precipitaciones y una respuesta negativa ante incrementos en la temperatura estacional. Este hallazgo resalta el potencial de las especies de latifoliadas para complementar los estudios de coníferas en México, proporcionando una imagen más completa de la respuesta forestal a las condiciones climáticas (Villanueva-Díaz et al., 2020).

En el noreste de México, el encino rojo (*Quercus sideroxylla* Bonpl.) ha mostrado un alto potencial dendroclimático, aunque las latifoliadas no suelen ser el foco en estudios de este tipo. Este estudio, realizado en el estado de Nuevo León, evidenció que la especie responde significativamente a la precipitación de invierno y primavera, lo cual es similar a la respuesta observada en muchas coníferas que cohabitan en su mismo ecosistema. Este hallazgo sugiere que *Q. sideroxylla* puede complementar los estudios dendrocronológicos en regiones donde la presencia de coníferas es limitada, expandiendo las aplicaciones de la dendrocronología en áreas forestales mexicanas con alta diversidad de especies (Ortega-Arroyo et al., 2021).

El *Abies jaliscana* Martínez., un abeto endémico de las montañas occidentales de Jalisco, también ha sido objeto de estudios dendroclimatológicos. Debido a su distribución restringida y alta sensibilidad a las condiciones climáticas, esta especie ha proporcionado datos valiosos sobre la respuesta de los bosques montanos a la variabilidad climática. Los estudios han demostrado que el crecimiento de *A. jaliscana* está estrechamente relacionado con la precipitación de invierno y principios de primavera, mientras que temperaturas más altas en invierno afectan negativamente el crecimiento. Este abeto demuestra cómo las especies endémicas y relictas pueden ser clave para entender la vulnerabilidad de los ecosistemas nublados ante el cambio climático (Guerrero-Hernández et al., 2022).

Por último, en el río Conchos, en Chihuahua, las cronologías de *Pinus cembroides* Zucc. y otras coníferas han permitido reconstruir la variabilidad en el volumen de escorrentía y correlacionarlo con índices de sequía y fenómenos como el ENSO. El análisis muestra que los períodos de escasez hídrica en esta cuenca coinciden con fases de La Niña, lo que genera sequías prolongadas que afectan la disponibilidad de agua para actividades agrícolas. Esta reconstrucción es particularmente útil para anticipar y gestionar la disponibilidad de agua en una región crítica para la agricultura en el norte del país (Martínez-Sifuentes et al., 2022).

La dendrocronología en México proporciona una base sólida para estudiar la variabilidad climática histórica y proyectar la respuesta de los ecosistemas forestales ante cambios futuros. La diversidad de especies y la variabilidad geográfica en los estudios destacan la importancia de esta ciencia en la gestión sostenible de los recursos hídricos y forestales, en especial bajo los efectos del cambio climático

2.4 *Pinus montezumae* Lamb.

Pinus montezumae Lamb. es una especie endémica de México que se encuentra distribuida principalmente en zonas montañosas de la región central del país. Se encuentra dentro de la clase Pinopsida, orden Pinales, familia Pinaceae y género *Pinus* (IBUNAM, 2019); y comúnmente puede llegar a conocerse como pino montezuma, pino real, ocote y chalmaite blanco (Gutiérrez-Hernández, 2007).

Su tronco es recto y puede alcanzar alturas de hasta 40 metros, su eje de crecimiento es monopodial, con fuste que oscila entre los 50 y 80 centímetros de diámetro; ramas largas y horizontales, que tienden a formar copas pequeñas y anuladas (Lira González, 2020). La distribución de la copa recae fuertemente en el tercio superior del árbol, pero puede notarse que, en sitios de baja densidad poblacional, la copa tiende a marcarse de manera más amplia a partir del segundo tercio del fuste (Herrera-Hernández & Escobar-Alonso, 2021).

Su corteza es gruesa, escamosa y de color marrón oscuro a rojizo, característica que le proporciona protección ante incendios de baja intensidad. La misma, tiende a romperse en escamas, que pueden extenderse a placas irregulares, cuya división está marcada por surcos someros o profundos, de coloración café-oscuro o grisácea (Estrada Castellón et al., 2014). Las acículas son lisas y presentan un tono que varía entre verde claro y verde oscuro, tienen una longitud de entre 20 y 28 cm, organizadas en grupos de 5, aunque ocasionalmente se encuentran 4 por fascículo; la vaina, de un color café claro, es persistente y mide entre 2.0 y 2.5 cm de largo (Herrera, 2021).

Los conos son ovoides y pueden medir entre 8 y 15 centímetros de longitud. Éstos tardan hasta dos años en madurar y liberar sus semillas, las cuales son pequeñas de entre 5-7 mm de longitud, color café-claro y ala articulada que facilita su dispersión por el viento (Lira González, 2020). Los conos femeninos se expresan en solitario o en verticilos de entre 3 a 6, corto pedunculados; con pedúnculo de 1 a 2 cm de largo, de forma ovoide a cilíndrica; simétricos o ligeramente curvados en la base; escamas agrupadas entre 80-150, y raras veces hasta 250, con forma de cuña. Las mismas se abren de forma gradual, lignificadas, rígidas y con apófisis levantadas, especialmente en las escamas basales (Estrada Castellón et al., 2014).

En cuanto a su ubicación, el *P. montezumae*, es una especie endémica de México, ampliamente distribuida en regiones montañosas del centro y sur del país. En particular, en el Estado de México, esta conífera se encuentra predominantemente en áreas de mayor altitud, como la Sierra Nevada y el Nevado de Toluca, en elevaciones que van desde los 2,000 hasta los 3,500 metros sobre el nivel del mar.

Se desarrolla bajo un régimen de precipitación anual que fluctúa entre los 800 a 1200 mm y temperaturas medias de 22°C en el mes más cálido, y -5°C en el mes más frío (Rodríguez Franco, 1997).

Según el Inventario Estatal Forestal y de Suelos del Estado de México 2022, la superficie forestal en el Estado de México abarca aproximadamente 1,080,374.9 hectáreas, lo que representa el 49% del territorio estatal. Los tipos de vegetación forestal más extensos incluyen el bosque de encino, el bosque mixto de pino-encino, la selva baja caducifolia y el bosque de pino, que juntos suman 672,668 hectáreas, equivalente al 62% del área forestal. En particular, el bosque de pino ocupa 134,254 hectáreas, lo que representa un 12% de la superficie forestal, siendo las especies predominantes *Pinus hartwegii* Lindl., *P. herrerae* Martínez., *P. leiophylla* Schltdl. & Cham., *P. devoniana* Lindl., *P. montezumae* Lamb., *P. ocarpa* Schltdl., *P. pringlei* Shaw., *P. pseudostrobus* Lindl., *P. rudis* Endl. y *P. teocote* Cham & Schltdl. (Probosque, 2022).

El inventario también señala que los municipios con mayor superficie forestal son Tlatlaya, Luvianos, Amalepec, Tejupilco, Sultepec, Temascaltepec, Ocuilan, Valle de Bravo, Zacualpan, Texcoco, Villa del Carbón, Ixtapaluca, San José del Rincón, Chapa de Mota y Zumpahuacán, con un total de 543,795 hectáreas, es decir, el 50% de la superficie forestal del Estado de México. En particular, el municipio de Ixtapaluca, que incluye la zona de estudio, posee 14,323.79 hectáreas de bosque primario y 4,179.78 hectáreas de bosque secundario; de estas, 11,315.92 hectáreas corresponden a coníferas primarias y 33.7 hectáreas a coníferas secundarias (Probosque, 2022).

Esta extensa superficie forestal, que incluye áreas como las de Ixtapaluca con predominancia de coníferas primarias, resalta el papel crucial del *P. montezumae* en la dinámica ecológica de los bosques montañosos del Estado de México. Su presencia favorece la retención de suelos, lo que contribuye a la prevención de la erosión, especialmente en áreas de alta pendiente. Asimismo, actúa como una especie clave en la regulación del ciclo hidrológico, capturando y almacenando

agua, lo que resulta fundamental en regiones con alta variabilidad climática (Rodríguez Franco, 2020).

La capacidad de adaptación de esta especie a diversas condiciones climáticas, también tiene implicaciones significativas para la conservación de los ecosistemas en el contexto del cambio climático. De acuerdo con estudios recientes, las fluctuaciones en las condiciones de temperatura y precipitación han tenido efectos notables en su crecimiento radial, lo que a su vez afecta la estructura y composición de los bosques en los que habita (Cortés-Cortés, et al., 2020).

El *P. montezumae* también tiene un valor considerable desde el punto de vista económico. Es una de las especies de coníferas más explotadas en el Estado de México para la producción de madera, resina y leña, lo que genera ingresos significativos para las comunidades locales. Las comunidades indígenas y rurales en el Estado de México también reconocen al *P. montezumae* como una fuente esencial de recursos para la medicina tradicional y otros usos culturales, lo que refuerza su relevancia no sólo ecológica, sino también cultural (Moctezuma et al., 2020).

A nivel científico, el *P. montezumae* ha sido objeto de estudios dendrocronológicos, debido a su longevidad y sensibilidad climática, lo que lo convierte en una especie ideal para analizar patrones de crecimiento y reconstrucción climática. Estos estudios han proporcionado información valiosa sobre las fluctuaciones climáticas históricas, como eventos de sequía y períodos de alta precipitación, permitiendo una mejor comprensión del impacto del cambio climático en los ecosistemas forestales de la región (Gómez-Guerrero et al., 2021).

Un análisis realizado mostró que las cronologías basadas en los anillos de crecimiento tardío (latewood) y de ancho total de *P. montezumae* reflejan correlaciones significativas con la precipitación de primavera (abril-junio) en el sur de México, además de estar relacionadas con el inicio del monzón norteamericano. Esto sugiere que los patrones de crecimiento de esta especie están fuertemente influenciados por las dinámicas del monzón, permitiendo reconstrucciones

detalladas de la variabilidad climática regional a lo largo del tiempo (Therrell et al., 2002) .

Otra investigación evaluó el impacto de las erupciones del volcán Popocatepetl en los anillos de crecimiento de *P. montezumae*. Este estudio demostró que los eventos volcánicos afectan directamente las concentraciones elementales en los anillos, particularmente de elementos como azufre y potasio, mientras que otros, como el hierro y el cobre, no presentaron cambios significativos. Los resultados sugieren que las emisiones volcánicas gaseosas tienen mayor impacto en la composición química de los anillos que las emisiones de cenizas. Esto refuerza la utilidad de los análisis dendroquímicos en esta especie para evaluar cambios ambientales tanto naturales como antropogénicos en zonas volcánicas activas (Cruz-Muñoz et al., 2008) .

Un estudio evaluó la sensibilidad del crecimiento radial de *P. montezumae* a los parámetros climáticos y al estrés por sequía en diversas regiones de México. El crecimiento de la especie estaba fuertemente correlacionado con las precipitaciones del invierno y la primavera, ya que estas lluvias mejoran la disponibilidad de agua en el suelo durante la temporada de crecimiento. En años con sequías prolongadas, los anillos de crecimiento fueron considerablemente más delgados, lo que indicó que la falta de agua limita la expansión del diámetro del tronco. El *P. montezumae* muestra un crecimiento más robusto cuando las condiciones climáticas son favorables, con lluvias estacionales que aseguran la hidratación del árbol y facilitan su desarrollo. En cambio, cuando las precipitaciones son escasas o las temperaturas son demasiado altas, la especie experimenta un crecimiento restringido, lo que sugiere una sensibilidad alta a las variaciones climáticas (Pompa-García et al., 2022).

Por último, un enfoque estadístico novedoso, el modelo PL-GMANOVA, fue aplicado al análisis de crecimiento de *P. montezumae* en diferentes sitios volcánicos de México. Este modelo permitió identificar variaciones en las tasas de crecimiento radial, mostrando cómo factores locales y regionales influyen en el desarrollo de esta especie. El estudio reveló que el sitio en el volcán Popocatepetl presentó las

mayores tasas iniciales de crecimiento, mientras que otros sitios mostraron tasas significativamente menores. Este tipo de análisis no solo profundiza en la comprensión del crecimiento de los árboles, sino que también facilita comparaciones entre regiones bajo distintas condiciones ambientales (Ricker et al., 2014) .

La combinación de estos enfoques ha consolidado a *P. montezumae* como una herramienta valiosa para la investigación dendrocronológica en México, permitiendo estudiar fenómenos climáticos, impactos ambientales y variabilidad ecológica en un contexto histórico.

2.5 Literatura citada

- Altman, J., Fibich, P., Dolezal, J., & Aakala, T. (2014). TRADER: a package for tree ring analysis of disturbance events in R. *dendrochronologia*, 32(2), 107-112. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.01.004>
- Anderson, L. O., Neto, G. R., Cunha, A. P., Fonseca, M. G., De Moura, Y. M., Dalagnol, R., Wagner, F. H., & De Aragão, L. E. O. E. C. (2018). Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1760). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2017.0411>
- Askarieh, A., Del Río, M., Aldea, J., Riofrío, J., & Bravo, F. (2024). Radial increment dynamics of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in pure and mixed stands with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under changing environmental conditions. *European Journal Of Forest Research*, 143(2), 671-686. <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01650-0>
- Brewer, P. W. (2014). Data management in dendroarchaeology using tellervo. *Radiocarbon*, 56(4), S79-S83. https://doi.org/10.2458/azu_rc.56.18320
- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Cabral-alemán, C., Villanueva-Díaz, J., Quiñonez-Barraza, G., Gómez-Guerrero, A., & Arreola-Ávila, J. G. (2022). Reconstruction of the standardized precipitation-evapotranspiration index for the western region of Durango state, Mexico. *Forests*, 13(8), 1233. <https://doi.org/10.3390/f13081233>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2021). Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan. Recuperado el 2 de diciembre de 2024, de <https://conanp.gob.mx>
- Comisión Nacional Forestal (2023). Bosques y otros ecosistemas ante el cambio climático. México. 88 p. Recuperado de

<https://www.gob.mx/conafor/documentos/bosques-y-otros-ecosistemas-ante-el-cambio-climatico>

CONAGUA (2023). Informe sobre la sequía en México. Comisión Nacional del Agua.

Cook, E.R. 1985. A time-series analysis approach to tree-ring standardization. Ph. D. Dissertation. Department of Geosciences, University of Arizona. Tucson, Az.

Correa-Díaz, A., Gutiérrez-García, J. V. & Villanueva-Díaz, J. (2023). Resiliencia de los bosques a partir de análisis dendrocronológicos. Folleto Técnico Núm. 36. Ciudad de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales.

Correa-Díaz, A., Silva, L. C. R., Horwath, W. R., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Villanueva-Díaz, J., Velázquez-Martínez, A., & Suárez-Espinoza, J. (2019). Linking remote sensing and dendrochronology to quantify climate-induced shifts in high-elevation forests over space and time. *Journal Of Geophysical Research Biogeosciences*, 124(1), 166-183. <https://doi.org/10.1029/2018jg004687>

Cortés-Cortés, O., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Flores-López, C., & Valencia-Manzo, S. (2020). Relación entre la variabilidad climática y el crecimiento radial de *Pinus montezumae* Lamb. en Coyuca de Catalán, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 27(1), 109–126. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.03.012>

Cruz-Muñoz, A. R., Rodríguez-Fernández, L., Calva-Vázquez, G., & Ruvalcaba-Sil, J. L. (2008). Effects due to Popocatepetl volcano eruptions on the elemental concentrations in tree growth rings. *X-Ray Spectrometry*, 37(2), 163-168. <https://doi.org/10.1002/xrs.1057>

Departamento de Botánica del Instituto de Biología (IBUNAM). (2019). *Pinus montezumae* Lamb., ejemplar de: *Herbario Nacional de México (MEXU)*.

- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera Y Bosques*, 22(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221480>
- Dimitrakopoulos, A. P., & Bemmerzouk, A. M. (2003). Predicting live herbaceous moisture content from a seasonal drought index. *International Journal of Biometeorology*, 47(2), 73–79. <https://doi.org/10.1007/S00484-002-0151-1>
- Estrada Castellón, A. E., Villarreal Quintanilla, J. Á., Salinas Rodríguez, M. M., Cantú Ayala, C. M., González Rodríguez, H., & Jiménez Pérez, J. (2014). *Coníferas de Nuevo León, México* (1st ed.). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree rings and climate*. academic press. London. 567 p.
- Giraldo Jiménez, J. A. (2011). Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales. *Colombia forestal*, 14(1), 97–111. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a08>
- Gómez-Guerrero, A., Correa-Díaz, A., & Castruita-Esparza, L. U. (2021). Cambio climático y dinámica de los ecosistemas forestales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(4), 673. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.673>
- González Hernández, Antonio, Pérez Miranda, Ramiro, Moreno Sánchez, Francisco, Ramírez Ojeda, Gabriela, Rosales Mata, Sergio, Cano Pineda, Antonio, Guerra de la Cruz, Vidal, & Torres Esquivel, María del Carmen. (2015). Variabilidad de la temperatura local en bosques de coníferas por efectos de la deforestación. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 22-39. Recuperado en 16 de noviembre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000500003&lng=es&tlng=es.

- Guerrero-Hernández, R., Muñiz-Castro, M. Á., Villanueva-Díaz, J., Hernández-Vera, G., Vázquez-García, J. A., & Ruiz-Corral, J. A. (2022). Tree-ring patterns and growth response of *abies jaliscana* to climate along elevational gradients in the mountains of western Jalisco, Mexico. *Forests*, 13(7), 981. <https://doi.org/10.3390/f13070981>
- Herrera-Hernández, R., & Escobar-Alonso, S. (2021). *Pinus montezumae* Lambert. (Pinaceae). In Rodríguez-Trejo, D.A (Coord). Semillas de especies forestales (1st ed., pp. 261–265). División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.camafu.org.mx/semillas-de-especies-forestales/>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*. <https://arizona.openrepository.com/handle/10150/261223>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., et al. (Eds.)]. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jiménez, J. A. G. (2011). Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales. *Colombia Forestal*, 14(1), 97. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a08>
- Lara, A., Villalba, R., Urrutia-Jalabert, R., González-Reyes, A., Aravena, J., Luckman, B., Cuq, E., Rodríguez, C., & Wolodarsky-Franke, A. (2019). +A 5680-year tree-ring temperature record for southern South America. *Quaternary Science Reviews*, 228, 106087. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106087>
- Liang, H., Jiang, S., Muhammad, A., Kang, J., Zhu, H., Li, X., Chen, L., Zhu, L., & Huang, J. (2021). Radial growth response of *Picea crassifolia* to climatic

- conditions in a dryland forest ecosystem in northwest China. *Forests*, 12(10), 1382. <https://doi.org/10.3390/f12101382>
- Lira González, D. E. (2020). Guía básica de pinos mexicanos. In Bozkia.
- Liu, P., Hu, S., Wei, H., He, W., Zhou, Y., & Wang, Y. (2023). Response of radial growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* of different stand ages to climate and extreme drought events in the semi-arid region of western Liaoning, Northeast China. *Frontiers In Forests And Global Change*, 6. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1272477>
- Magaña, V., Zermeño, D., & Neri, C. (2012). Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*, 51(2), 171– 184. <https://doi.org/10.3354/CR01080>
- Manríquez-Menéndez, E., Fernández Cancio, A. (1995) El papel de la dendroclimatología en el estudio del cambio climático actual. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, ISSN 1575-2410, ISSN-e 2386-8368, Nº. 2, 1995 (Ejemplar dedicado a: Seminario sobre deterioro de los montes y cambio climático), págs. 21-34
- Martínez Sifuentes 2022 Martínez-Sifuentes, A. R., Villanueva-Díaz, J., Correa-Díaz, A., Estrada-Ávalos, J., Trucíos-Caciano, R., Estrada-Arellano, J. R., Cardoza-Martínez, G. F., & Garza-Martínez, M. Á. (2022). Dendroclimatic reconstruction of precipitation and temperature for the Mayo River basin in northwestern Mexico. *Trees*, 36(2), 835-847. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02253-1>
- Martínez-Sifuentes, A., Villanueva-Díaz, J., & Estrada-Ávalos, J. (2020). Runoff reconstruction and climatic influence with tree rings, in the Mayo river basin, Sonora, Mexico. *iForest - Biogeosciences And Forestry*, 13(1), 98-106. <https://doi.org/10.3832/ifor3190-013>
- Medina-Villar, S., Pérez-Corona, M. E., Herrero, A., Cruz-Alonso, V., Carro-Martínez, N., & Andivia, E. (2024). The alien *conifer Cupressus arizonica* can

- outcompete native pines in Mediterranean mixed forests under climate change. *NeoBiota*, 92, 211-231. <https://doi.org/10.3897/neobiota.92.116634>
- Moctezuma López, G., & Flores, A. (2020). Importancia económica del pino (*Pinus spp.*) como recurso natural en México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 11(60). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i60.720>
- Neri, C., & Magaña, V. (2016). Estimation of vulnerability and risk to meteorological drought in Mexico. *Weather, Climate, and Society*, 8(2), 95–110. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0005.1>
- Ortega-Arroyo, E. J., Jiménez-Pérez, J., Villanueva-Díaz, J., Yerena-Yamallel, J. I., Alanís-Rodríguez, E., & Aguirre-Calderón, O. A. (2021). Potencial dendroclimático del encino rojo, *Quercus sideroxyla* (Fagaceae) en México. *Revista de Biología Tropical*, 69(3), 888-897. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i3.44082>
- 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>
- Probosque. (2022). Inventario estatal forestal y de suelos del Estado de México. Recuperado el 2 de diciembre de 2024, de https://probosque.edomex.gob.mx/inventario_forestal
- Ravelo, A. C., Sanz Ramos, R., & Douriet Cárdenas, J. C. (2014). Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *AgriScientia*, 31(1), 11–24. <https://doi.org/10.31047/1668.298X.V31.N1.9836>
- Ricker, M., Ramírez, V. M. P., & Von Rosen, D. (2014). A new method to compare statistical tree growth curves: the PL-GMANOVA model and its application with dendrochronological data. *PLoS ONE*, 9(11), e112396. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112396>

- Rodríguez Franco, C. (1997). La Silvicultura de *Pinus montezumae* en la región central de México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 22(81), 91–115.
<http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/978>
- Rodríguez Franco, C. (2020). La silvicultura de *Pinus montezumae* Lamb. en la Región Central de México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 22(81), 91–115. Recuperado a partir de <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/978>
- Rojas, G. F., Gómez, G. A., Gutiérrez, G. G., Ángeles, P. G., Reyes, H. V. J., & De Jong, B. H. J. (2020). Aplicaciones de la dendroecología en el manejo forestal: una revisión. *Madera y Bosques*, 26(3), 1–19.
<https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632116>
- Saleska, S. R., Didan, K., Huete, A. R., & Da Rocha, H. R. (2007). Amazon forests green-up during 2005 drought. *Science (New York, N.Y.)*, 318(5850), 612.
<https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1146663>
- Schweingruber, F. H. (1988). Tree rings: basics and applications of dendrochronology. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA03618739>
- Schweingruber, F. H. (1996). Tree rings and environment dendroecology. Switzerland: Haupt. <https://doi.org/10.2307/1224418>
- Speer, J. H. (2009). Fundamentals of tree-ring research. The University of Arizona Press. <https://doi.org/10.1002/gea.20357>
- Speer, J. H. (2010). Fundamentals of tree-ring research. *Choice Reviews Online*, 48(03), 48-1462. <https://doi.org/10.5860/choice.48-1462>
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Griffin, D., Villanueva, D. J., Cook, B. I., Williams, A. P., Watson, E., Sauchyn, D. J., Pederson, N., Woodhouse, C. A., Pederson, G. T., Meko, D., Coulthard, B., & Crawford, C. J. (2020). Dynamics, variability, and change in seasonal

- precipitation reconstructions for North America. *Journal of Climate*, 33(8), 3173–3195. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0270.1>
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Burns, J. N., Griffin, D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenson, 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>
- Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Burnette, D. J., Cerano, P. J., Heim Jr, R. R., Fye, F. K., Acuna, S. R., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38(5), 4. <https://doi.org/10.1029/2010GL046472>
- Stockton, C. W., & Jacoby, G. C. (1976). Long-term surface water supply and streamflow levels in the upper Colorado River basin. *Lake powell research project. bulletin*, 18, 70. <https://www.clorado.edu/sites/default/files>
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Villanueva-Diaz, J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal Of Geophysical Research Atmospheres*, 107(D14). <https://doi.org/10.1029/2001jd000851>
- Marcos Valiente, Óscar. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, (26), 59–80. <https://doi.org/10.14198/INGEO2001.26.06>.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Stahle, D. W., Constante García, V., & Estrada Ávalos, J. (2010). *Estandarización y desarrollo de series dendrocronológicas en México*. Gómez Palacio, Durango: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA).

- Villanueva-Díaz, J., Guerrero, A. G., Ávalos, J. E., & Sifuentes, A. R. M. (2020b). Reconstrucción de la precipitación y caudal medio del río Piaxtla mediante anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Madera y Bosques*, 26(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631653>
- Villanueva-Díaz, J., Martínez-Sifuentes, A. R., Del Rocío Reyes-Camarillo, F., & Estrada-Ávalos, J. (2021). Reconstrucción de precipitación y temperatura con anillos de crecimiento anual del ciprés *Taxodium mucronatum* (Taxodiaceae) en Coahuila, México. *Revista de Biología Tropical*, 69(1). <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i1.43249>
- 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>
- Wang, H., Zhang, J., Wei, B., Qiao, Q., Zhang, W., Ning, Y., & Liu, C. (2024). The effects of climate change on *Pinus tabulaeformis* radial growth in the Xiaowutai Mountains, northern China. *Journal Of Forestry Research*, 35(1). <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01791-x>
- Wei, X., Huang, S., Huang, Q., Liu, D., Leng, G., Yang, H., Duan, W., Li, J., Bai, Q., & Peng, J. (2022). Analysis of vegetation vulnerability dynamics and driving forces to multiple drought stresses in a changing environment. *Remote Sensing*, 14(17), 4231. <https://doi.org/10.3390/rs14174231>
- Wilhite, D. (2000). Chapter 1 drought as a natural hazard: concepts and definitions. Drought mitigation center faculty publications. <https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/69>
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>

- World Meteorological Organization. (2020). State of the global climate 2020. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21700
- Xie, S., Yan, T., Sun, X., Chen, H., Sun, M., & Zhang, Y. (2024). Radial growth response of *Pinus Yunnanensis* to climate in high mountain forests of northwestern Yunnan, southwestern China. *Frontiers In Forests And Global Change*, 7. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1343730>
- Yaman, B., Pulat, E., Daşdemir, İ., & Yeşilbaş, Y. (2024). Utjecaj klime i vlažnosti tla u zoni korijena na radijalni prirast crnog bora (*Pinus nigra* Arnold subsp. *pallasiana*) u Aritu (Bartın) u Zapadnoj crnomorskoj regiji u Turskoj. *Šumarski List*, 148(1-2), 39-47. <https://doi.org/10.31298/sl.148.1-2.4>
- Zang, C., & Biondi, F. (2014). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431-436. <https://doi.org/10.1111/ecog.01335>
- Zhang, Z. (2015). Tree-rings, a key ecological indicator of environment and climate change. *Ecological Indicators*, 51, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.042>
- 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., Brien, R., Buckley, B. M., Zhou, Z. (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>

CAPÍTULO 3. INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO RADIAL DE *Pinus montezumae* Lamb. EN EL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL – POPOCATÉPETL

Influence of climatic variation on the radial growth of *Pinus montezumae* in Iztaccihuatl - Popocatepetl National Park

Miguel Ángel Ortega Cervantes^a, Liliana Cuapio Hernández^a, Alejandro Ismael Monterroso Rivas^a, Alejandro Corona Ambríz^{a*}

^a Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, 56230 Chapingo, México.

* Autor para correspondencia: acoronaa@chapingo.mx (A. Corona Ambriz)

Resumen

La variabilidad climática, intensificada por el cambio climático, influye en los patrones de crecimiento de los árboles, afectando su desarrollo y respuesta a condiciones ambientales extremas, el objetivo fue identificar patrones asociados al cambio climático en la región. Se recolectaron y fecharon núcleos de crecimiento, se efectuó la datación cruzada para verificar el fechado y se generaron las cronologías, se utilizaron datos climáticos de reanálisis para identificar los periodos de respuesta clima-crecimiento radial y calcular las correlaciones entre las cronologías y las variables climáticas. Los resultados mostraron un potencial dendrocronológico de intermedio a alto del *Pinus montezumae*, e indican que la especie responde a la precipitación de primavera y verano ya que favorecen el incremento

anual del crecimiento radial. La temperatura máxima de otoño contribuye el desarrollo de madera temprana a al final del ciclo de crecimiento, mientras que la temperatura media y mínima de invierno propicia la generación de madera tardía. Además, se observó que la especie es sensible a eventos de sequía al disminuir el crecimiento radial como se observó en la última década. Estos hallazgos resaltan la importancia de *P. montezumae* como un indicador del impacto de la variabilidad climática en los bosques de la región.

Palabras clave: Anillos de crecimiento, Anillos de árbol, Bosque de coníferas, Dendrocronología, Respuesta climática.

Abstract

Climate variability, intensified by climate change, influences tree growth patterns, affecting their development and response to extreme environmental conditions. This study aimed to identify patterns associated with climate change in the region. Growth cores were collected and dated, cross-dating was performed to verify accuracy, and chronologies were developed. A reanalysis of climate data was used to identify climate-growth response periods and calculate correlations between the chronologies and climate variables.

The results showed a moderate to high dendrochronological potential for *Pinus montezumae* and indicated that the species responds to spring and summer precipitation, which favors annual radial growth. Maximum autumn temperatures contribute to the development of earlywood at the end of the growth cycle, while mean and minimum winter temperatures promote latewood formation. Additionally, the species was sensitive to drought events, as evidenced by reduced radial growth over the past decade. These findings highlight the importance of *P. montezumae* as an indicator of the impact of climate variability on regional forests.

Keywords: Growth rings, Tree ring, Conifer forest, Dendrochronology, Climate response

Introducción

El cambio climático es el resultado de las alteraciones de la variabilidad climática natural, atribuida principalmente a actividades humanas, y tiene importantes repercusiones en los ecosistemas terrestres (Cassman y Wood, 2005). De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) desde aproximadamente 1950 se han registrado cambios significativos en diversos eventos climáticos extremos (IPCC, 2014). Entre estos cambios se incluyen la reducción de temperaturas frías extremas, el aumento de temperaturas cálidas extremas, el incremento de los niveles extremos del mar y el aumento en la frecuencia de precipitaciones intensas en varias regiones, fenómenos que han sido vinculados con la influencia humana.

El cambio climático afecta a los árboles de múltiples maneras, impactando su crecimiento, reproducción y supervivencia. El aumento de la temperatura y la alteración de los patrones de generador generan estrés hídrico, reduciendo la disponibilidad de agua y afectando la capacidad fotosintética de los árboles. Además, la mayor frecuencia de fenómenos extremos, como sequías e incendios forestales, incrementa la mortalidad de los bosques. Estos cambios también influyen en los ciclos fenológicos, como el inicio del crecimiento anual, y disminuyen la resiliencia de los árboles frente a plagas y enfermedades (Aber et al., 2001; IPCC, 2021).

Ante estos desafíos, surge la necesidad de comprender la influencia de la variabilidad climática en los ecosistemas. La dendrocronología, disciplina que estudia los anillos de crecimiento de los árboles, permite reconstruir eventos climáticos pasados y analizar sus efectos en los bosques (Benito, 2014; Stokes y Smiley, 1996). En particular,

una estrategia clave en el estudio del crecimiento estacional de las coníferas es el análisis de los cambios intraanuales en el crecimiento radial, centrado en la producción de madera temprana y madera tardía (Meko y Baisan, 2001). La formación de madera temprana está asociada con las condiciones climáticas de invierno y primavera, reflejando el período de mayor tasa de crecimiento (Vaganov et al., 2006), mientras que la producción de madera tardía está influenciada por la disponibilidad de humedad durante el verano y el otoño en regiones con estaciones secas (Howard et al., 2021). La combinación de ambas fases determina el ancho total del anillo de crecimiento.

El crecimiento radial y la formación de anillos han sido ampliamente estudiados en el género *Pinus* mediante técnicas dendrocronológicas para comprender la respuesta de los bosques a las variaciones climáticas. A nivel mundial, los pinos son reconocidos por formar anillos anuales bien definidos, lo que los convierte en modelos ideales para la reconstrucción climática y el análisis de eventos históricos, como sequías prolongadas y fluctuaciones de temperatura (Fritts, 1976; Osorio-Osorio et al., 2020; Schweingruber, 1988). En este contexto, *Pinus montezumae* Lamb. es una especie de gran importancia ecológica, ya que forma parte de los bosques templados que actúan como reservorios de biodiversidad y reguladores del ciclo hidrológico (Farjon et al., 1997). Sin embargo, a pesar de su relevancia, su estudio en la región central de México, particularmente en el Estado de México, ha sido limitado. Esta falta de información destaca la necesidad de profundizar en su análisis, lo que permitirá una mejor comprensión de sus respuestas.

El objetivo principal de esta investigación fue analizar la relación entre la variabilidad de precipitación y temperatura, incluyendo eventos climáticos extremos, y el crecimiento de *P. montezumae* en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan mediante métodos dendrocronológicos, con el fin de evidenciar patrones asociados al cambio climático

en la región. Este análisis no solo contribuye a un mejor entendimiento de la biología de *P. montezumae*, sino que también aporta información valiosa sobre la respuesta de esta especie a cambios climáticos en su entorno.

Materiales y métodos

Área de estudio. El sitio de estudio se localiza en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) ubicada en la porción norte del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl en los límites de Puebla y el Estado de México, México (19° 12' 30" y 19° 20' 00" N, 98° 30' 00" y 98° 42' 30" O) (fig. 1), forma parte del sistema orográfico de la Sierra Nevada, región centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, la altitud es de 3,080 a 3,690 m. El clima predominante en la región es templado subhúmedo C (w"2) (w) (b') ig con lluvias en verano, la temperatura promedio anual oscila entre 12°C y 18°C, en los meses cálidos puede superar los 20°C y en invierno desciende a menos de 5°C. (CONANP, 2013). La vegetación está constituida por comunidades de pinos (*Pinus hartwegii* Lindl.; *P. montezumae* Lamb.; *P. leiophylla* Schltdl. & Cham.; *P. pseudostrobus* Lindl.; *P. rudis* Endl.; *P. teocote* Cham & Schltdl.), Abies (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.), Alnus (*Alnus firmifolia* Fernald; *A. jorullensis* Kunth) y encino (*Quercus laurina* Bonpl.; *Q. rugosa* Née.; *Q. peduncularis* Née.; *Q. crassipes* Bonpl.), el sotobosque está integrado por especies de pasto tipo zacatal de los géneros *Festuca* L.; *Muhlenbergia* Schreb. y *Agrostis* L. (Rzedowski, 2006).

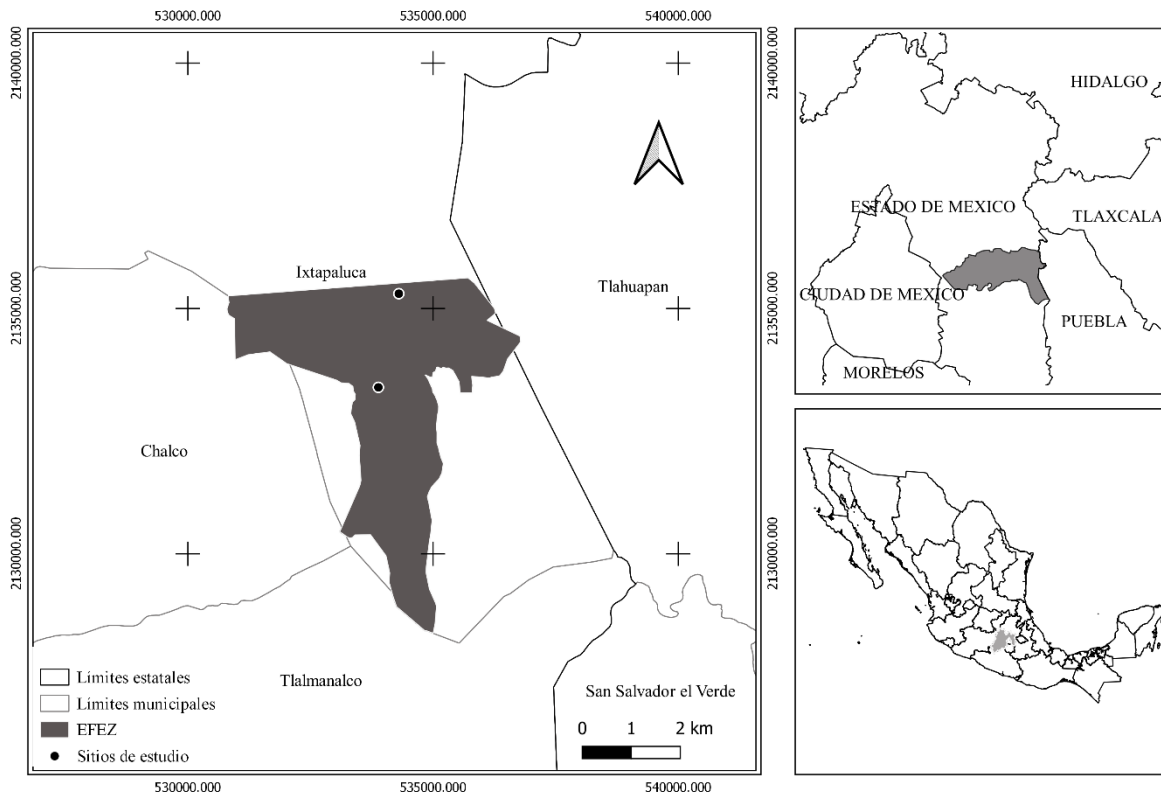


Figura 1. Localización del área de estudio Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ).

Colecta de muestras. La colecta se realizó en los sitios Chicamula y El Charco debido a la dominancia de *Pinus montezumae*, se eligieron 26 pinos longevos de fuste rectos sin evidencia de disturbio, a la altura de 1.30 m. del árbol se extrajeron núcleos de crecimiento con taladro pressler con un diámetro interno de broca de 5.1 mm, en total se obtuvieron 51 muestras.

Preparación de las muestras. Los núcleos de crecimiento fueron colocados en pajillas de plástico perforadas, estas se dejaron secar a temperatura ambiente durante ocho días; después se fijaron con pegamento en molduras de madera acanaladas y se pulieron con lijas de grano grueso (240) a fino (1200) para facilitar la visibilidad de anillos de crecimiento.

Análisis de dendrocronológico. Los análisis se llevaron a cabo en Laboratorio de Anatomía y Tecnología de la Madera de la División de Ciencias Forestales. El fechado de los anillos de crecimiento se realizó con técnicas de dendrocronología convencionales (Stokes y Smiley, 1996) el conteo de los anillos se efectuó a partir de la corteza hacia la medula utilizando un estereoscopio Leica Zoom 2000, durante este proceso se detectaron microanillos y anillos falsos. A continuación, se procedió a la medición del ancho total del anillo, madera temprana y tardía empleando un medidor de incrementos Carl Zeiss.

Concluida la medición de los anillos de crecimiento se verificó la calidad del fechado utilizando la librería dplR (dendrochronology program library in R) (Bunn, 2008), del software RStudio versión 2024.04.2 Build 764 (Posit team, 2024). El análisis consistió en correlacionar las series individuales obtenidas de las muestras con la cronología maestra en segmentos de 50 años con traslapes de 25 años, con este procedimiento se logró identificar y corregir errores en el fechado (Bunn, 2010). Una vez verificado el fechado, utilizando las librerías dplR y tidyverse se generaron las cronologías estándar y residual de anillo total, madera temprana y tardía a éstas se les aplicó una curva de ajuste (Spline a 10 años) para descartar la varianza a causa de factores asociados a edad y condiciones del sitio (Cook y Kairiukstis, 1990). También se estimaron los parámetros estadísticos de las cronologías (correlación entre series, desviación estándar, autocorrelación de primer orden, sensibilidad media, señal ruido y señal poblacional expresada) (Fritts, 1976).

Datos climáticos. En la región cercana a la zona de estudio se ubicaron seis estaciones meteorológicas, sin embargo, los registros comprenden el periodo de 1961 al 2010, siendo insuficientes para analizar el periodo de interés que se extiende hasta el año 2023. Por lo tanto, se obtuvieron de la NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (NASA POWER) (NASA POWER, 2023) datos de precipitación y temperatura, estos

fueron sometidos a un proceso de correlación utilizando el coeficiente de Pearson para compararlos con los de estaciones meteorológicas y con ello confirmar la similitud y confiabilidad de los datos de reanálisis de NASA POWER (fig. 2).

La vinculación de los eventos de sequía en el Estado de México con el índice de ancho de anillo total de *P. montezumae* se realizó con indicadores del Tzolkin Monitor de Sequía de Mesoamérica desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (IMTA, 2020).

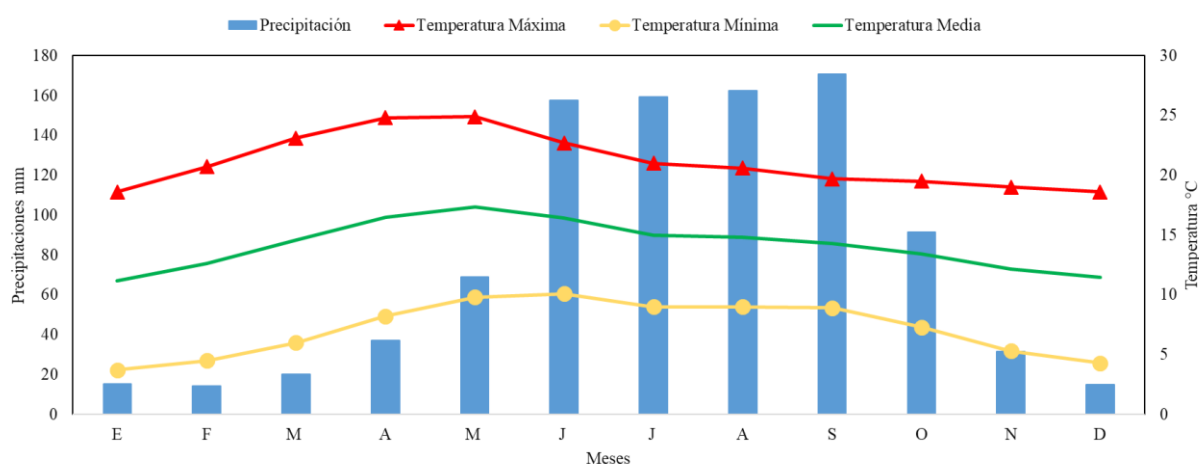


Figura 2. Climograma de la región EFEZ.

Relación clima-crecimiento radial. Para analizar la influencia del clima en el crecimiento radial se empleó un análisis de función de respuesta en el que se relacionaron las variables climáticas (Precipitación total mensual, temperatura máxima, media y mínima) con los índices de las cronologías estandarizadas y residuales de anillo total, madera temprana y tardía, en el periodo de 1982-2023 mediante los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, previamente se verificó que los datos provenían de una distribución normal (test Shapiro-Wilk), con esto se determinó el efecto de la variabilidad climática influye en el incremento radial del árbol.

Resultados

Se evaluó la relación entre la variabilidad climática y el crecimiento radial de *Pinus montezumae* en la Estación Forestal Experimental Zoquiapan. Para ello, se analizaron las correlaciones entre las cronologías estandarizadas y residuales del anillo total, madera temprana y tardía con las variables climáticas de temperatura (promedio, máxima y mínima) y precipitación mensual.

Los 26 árboles de *Pinus montezumae* tenían un diámetro entre 14 y 120 cm., la edad osciló de 34 a 123 años, de los 51 núcleos de crecimiento colectados, solo 45 (88%) fueron fechados con éxito; mientras que, el resto se excluyó debido a la presencia de anillos falsos y ausentes.

Las series cronológicas de ancho de anillo total (AT), madera temprana (MTe) y madera tardía (MTa) abarcan un periodo común de 123 años que corresponden de 1901 a 2023, siendo de 1901 la muestra más longeva y de 1981 la más joven. La correlación entre cada serie de anillos de crecimiento por segmentos de 50 años con traslapes de 25 indican que la calidad de fechado y la datación cruzada es correcta, considerando un nivel de significancia del 0.05 y se obtuvo un $p_valor < 0.01$, superando la correlación mínima $r=0.3281$ (tabla 1) establecida por Holmes (1983). Además, los parámetros estadísticos de las series de anillos de crecimiento (tabla 1) indican que *P. montezumae* presenta un buen potencial dendroclimático para analizar su respuesta a las variaciones climáticas.

Tabla 1

Estadísticos descriptivos de las series de anillos de crecimiento de *P. montezumae*.

Parámetro estadístico	Anillo total	Madera temprana	Madera tardía
Intercorrelación entre series	0.657	0.601	0.673
Sensibilidad media	0.281	0.324	0.278
Desviación estándar	0.875	0.758	0.223
Autocorrelación de primer orden	0.529	0.518	0.520
Relación señal-ruido	14.621	11.159	19.533

Para identificar la función de respuesta del crecimiento radial a las variaciones climáticas, se generaron dos cronologías: Estándar y Residual para el índice ancho de anillo total, madera temprana y tardía, estas indican que el crecimiento promedio anual de ancho de anillo fue de 1.03 mm (tabla 2) y muestran tendencias de crecimiento en periodos húmedos y de sequía.

Tabla 2

Estadísticas descriptivas de las cronologías estandarizada y residual de *P. montezumae*.

Parámetros estadísticos	Cronologías					
	Estándar			Residual		
	Anillo total	Madera temprana	Madera tardía	Anillo total	Madera temprana	Madera tardía
Ancho de anillo mm (media)	1.03	1.00	0.991	0.992	0.987	0.991
Sensibilidad media	0.279	0.138	0.135	0.166	0.179	0.179
Desviación estándar	0.196	0.212	0.220	0.183	0.199	0.226
Coeficiente de Gini	0.110	0.120	0.124	0.104	0.113	0.124
Autocorrelación de 1 ^{er} orden	0.125	0.092	0.196	-0.162	-0.180	-0.100
Relación señal-ruido	21.308	15.353	26.199	27.802	20.144	34.543
Señal Expresada de la Población (EPS)	0.950	0.934	0.958	0.965	0.953	0.972

La cronología estándar fue la que de terminó mejor la respuesta de *P. montezumae* a las fluctuaciones del clima, de acuerdo con la media del ancho de anillo (AT= 1.03, MTe= 1.0, MTa= 0.991), sensibilidad media (AT= 0.279, MTe= 0.138, MTa= 0.135), señal ruido (AT= 21.308, MTe= 15.353, MTa= 26.199).

Las cronologías de índice de ancho de anillo total (IAA), madera temprana tardía estándar (St) y residual (Rs) de *P. montezumae* comprenden un periodo 123 años,

ambas series de índice de ancho de anillo destacaron periodos de tiempo en donde el crecimiento radial fue superior a la media (fig.3A) y corresponden a los años 1901 – 1910, 1913 – 1917, 1942 – 1946, 1970 – 1972. Mientras que, en los periodos de 1923 – 1931, 1947 – 1950, 1961 – 1965, 1968 – 1976, 1998 – 2001 y 2021 – 2023 el crecimiento fue inferior.

Las cronologías St y Rs de madera temprana presentaron una mayor variabilidad interanual (fig.3B), los periodos que destacan con mayor desarrollo MTe conciernen a 1901 – 1910, 1913 – 1916, 1931 – 1935, 1943 – 1947, 1978 – 1990 y 2002 – 2012. Los periodos con menor formación de MTe fueron 1923 – 1930, 1936 -1942, 1961 – 1965, 1973 -1977, 1998 – 2001.

Con respecto a las cronologías St y Rs de madera tardía también presentaron una mayor fluctuación interanual, los periodos con mayor desarrollo de MTa fueron: 1903 – 1904, 1907, 1909 -1910, 1912, 1914 – 1915, 1917, 1923 – 1926, 1928 – 1930, 1935, 1937 – 1939, 1941 – 1944, 1949 – 1951, 1954 – 1956, 1958 – 1962, 1969 – 1971, 1974 – 1977, 1983 - 1985, 1992 1995, 1996, 1998, 2003 – 2006, 2009 – 2010, 2014 – 2016 y 2018 – 2021 (fig. 3C).

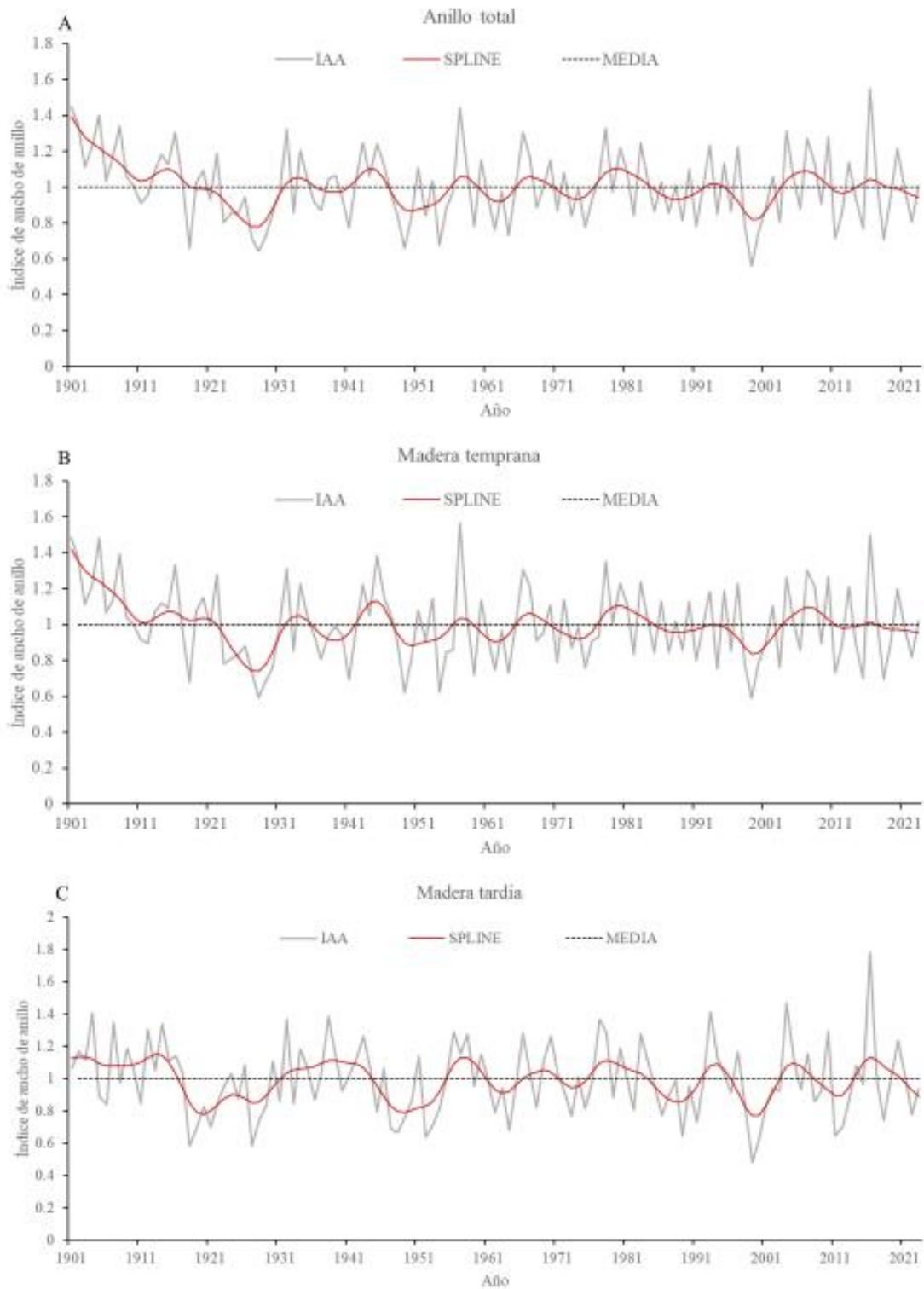


Figura 3. Cronología de índices de ancho de anillo de *P. montezumae*.

Los eventos de sequía descritos por Domínguez (2016) y registrados en el Tzolkin Monitor de Sequía de Mesoamérica se asociaron a la cronología de ancho de anillo (Fig. 4) y se observó que aquellos periodos de tiempo donde el crecimiento radial del árbol fue menor a la media anual corresponden a años con eventos de sequía, como son: la sequía de 1908 a 1910, las sequías de 1925, 1935, la de 1948 a 1954 que fue muy severa, 1957, 1960 a 1964, 1969, 1977. También se puede identificar que en el periodo de 1980 al 2023 el crecimiento radial estuvo influenciado por la presencia de sequías anuales de intensidad moderada, destacando el registro en la cronología de sequías severas en 2001, 2006 - 2012 y de 2018 – 2023.

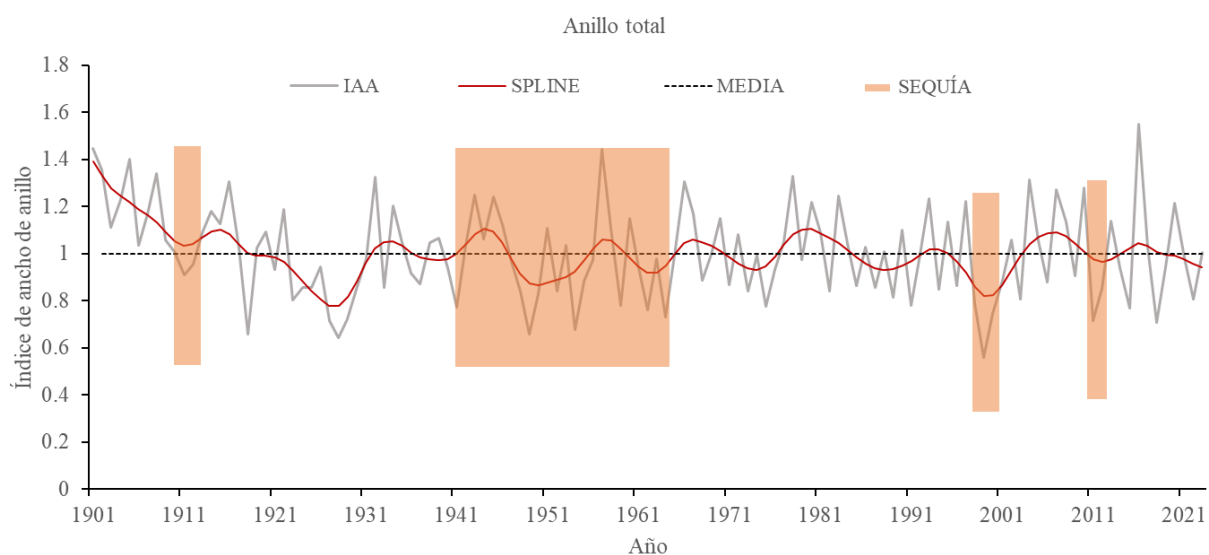


Figura 4. Vinculación de índice de ancho de anillo con eventos de sequía.

Relación entre índices de ancho de anillo y precipitación. La función de respuesta del crecimiento radial de *Pinus montezumae* y la variabilidad del clima se analizó en el periodo común de 1981 – 2023. El análisis de correlación (coeficiente de Pearson), entre la cronología estandarizada de anillo total y la precipitación mensual, mostraron correlaciones tanto positivas y como negativas a lo largo del ciclo de crecimiento. La

correlación entre el IAA estándar y precipitación mensual fue significativa ($p < 0.05$) en el mes de julio ($r = 0.329$, $p_valor = 0.033$); mientras que, en el índice de MTe fue para septiembre del año anterior ($r = -0.35$, $p_valor = 0.049$) y julio ($r = 0.331$, $p_valor = 0.032$), para MTa fue en marzo ($r = 0.373$, $p_valor = 0.015$) (fig. 5A). En los análisis de las cronologías residuales y la precipitación, la relación fue similar a la estándar, en el caso del IAA fue significativa para septiembre del año anterior ($r = -0.308$, $p_valor = 0.046$) y julio ($r = 0.306$, $p_valor = 0.048$). Con respecto a la MTe en septiembre del año anterior ($r = -0.341$, $p_valor = 0.027$) y en MTa en noviembre ($r = 0.333$, $p_valor = 0.031$) y marzo ($r = 0.373$, $p_valor = 0.015$) (fig. 5B).

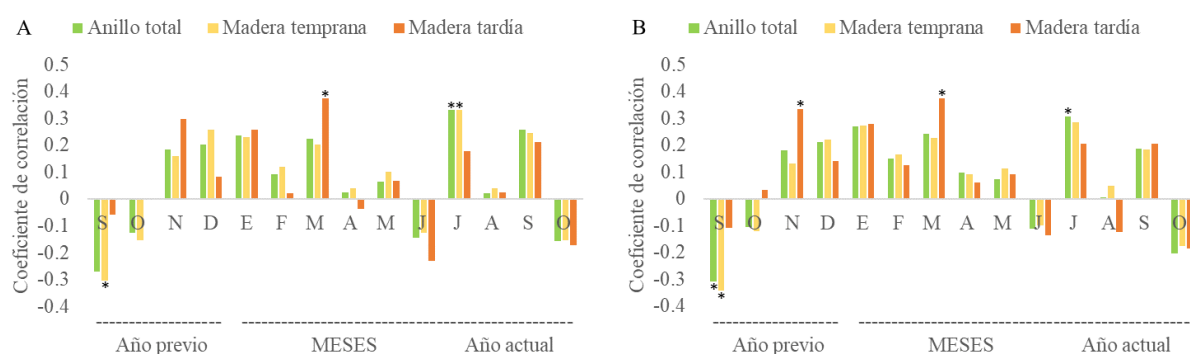


Figura 5. Coeficientes de correlación de precipitación e índices de ancho de anillo, A. estándar, B. residual.

Relación entre Índices de ancho de anillo y Temperatura. La reciprocidad entre los índices de ancho de anillo AT, MTe, MTa, y la temperatura (máxima, media y mínima) en el periodo común entre los años 1981 a 2023 reveló correlaciones negativas y positivas. Las asociaciones de los índices de ancho de anillo y la temperatura máxima, media y mínima con valores de coeficientes de correlación estadísticamente significativos ($p_valor < 0.05$) (tabla 3), indican que las temperaturas máximas de los meses septiembre y

octubre del año anterior estos meses previos favorecieron el crecimiento del anillo total y la formación de madera temprana; sin embargo, en la cronología residual la temperatura máxima de enero afectó de forma negativa el desarrollo de madera tardía (fig. 6A, 6B).

La correlación entre la temperatura mínima de octubre, noviembre, diciembre del año anterior con el índice de ancho de anillo de MTa y en diciembre con AT (fig. 6C, 6D), en la cronología estándar, fueron estadísticamente significativa; mientras que, en la cronología residual solo fue significativa para noviembre; lo cual significa que las temperaturas mínimas de invierno favorecen la formación de madera tardía y puede deberse a que los árboles inician su etapa de letargo.

Finalmente, la correlación entre la temperatura media de septiembre y octubre del año anterior resultó estadísticamente significativa con el índice de madera tardía en la cronología estándar y solo octubre en la residual (fig. 6E, 6F), estos resultados reafirman la importancia de las temperaturas de otoño en la formación de madera tardía.

Tabla 3

Coeficientes de correlación de Pearson de la relación entre Índices de ancho de anillo y Temperatura.

Temperatura	Mes	Índices de ancho de anillo de las Cronologías					
		Estándar			Residual		
		Anillo total	Madera Temprana	Madera Tardía	Anillo total	Madera Temprana	Madera Tardía
Máxima	Septiembre*	r = 0.365 p = 0.017	r = 0.353 p = 0.021	-	r = 0.361 p = 0.018	r = 0.356 p = 0.020	-
	Octubre*	r = 0.326 p = 0.034	-	-	-	-	-
	Enero	-	-	-	-	-	r = -0.318 p = 0.039
Media	Septiembre*	-	-	r = 0.316 p = 0.041	-	-	-
	Octubre*	-	-	r = 0.362 p = 0.018	-	-	r = 0.310 p = 0.045
	Octubre*	-	-	r = 0.323 p = 0.036	-	-	-
Mínima	Noviembre*	-	-	r = 0.365 p = 0.017	-	-	r = 0.342 p = 0.026
	Diciembre*	r = 0.318 p = 0.039	-	r = 0.317 p = 0.040	-	-	-

* mes del año anterior al inicio de la temporada de crecimiento



Figura 6. Coeficientes de correlación de temperatura e índices de ancho de anillo. A. Relación temperatura máxima – cronología estándar. B. Relación temperatura máxima – cronología residual. C. Relación temperatura mínima – cronología estándar. D. Relación temperatura mínima – cronología residual. E. Relación temperatura media – cronología estándar. F. Relación temperatura media – cronología residual.

Discusión

Los resultados obtenidos aportan evidencia sobre la respuesta de *Pinus montezumae* a las condiciones ambientales, debido a que se lograron identificar patrones de crecimiento a través del fechado del 88% de las muestras, el porcentaje es bueno, en estudios dendrocronológicos es común excluir hasta el 40% de las muestras por problemas de crecimiento (Cerano-Paredes et al., 2014). La baja presencia de anillos falsos (menos del 5%) encontrada en *P. montezumae* coincide con lo registrado por Gutiérrez-García y Ricker (2019) y Villanueva-Díaz et al. (2016) para especies que habitan en la alta montaña.

Los valores de intercorrelación entre series fueron de 0.657 (anillo total), 0.601 (madera temprana) y 0.673 (madera tardía), similar a lo obtenido por Cortés-Cortés (2020) para *P. montezumae* en Coyuca de Catalán, Guerrero ($r = 0.57$) mayor al valor mínimo de 0.328 establecido por Holmes (1983), lo cual muestra que las intercorrelaciones de *P. montezumae* son estadísticamente significativas ($p_valor < 0.05$). Los valores de sensibilidad media del ancho total del anillo (0.281), madera temprana (0.324) y madera tardía (0.278), de acuerdo con Grissino-Mayer (2001), el *P. montezumae* presenta sensibilidad baja (0.135 – 0.179) e intermedia (0.279) en el ancho total del anillo. Estos valores son menores a los reportados para pináceas del Norte de México, donde se obtuvieron valores mayores a 0.5 (Constante-García et al., 2010; Santillán-Hernández et al., 2016), y menores a los obtenidos para *P. Montezumae* en el Estado de Guerrero (0.31), según lo reportado por Cortés-Cortés (2020).

La autocorrelación de primer orden en los tres índices de ancho de anillo muestra valores (entre 0.092 y 0.196), lo cual es un criterio fundamental en estudios dendrocronológicos, debido a que una baja autocorrelación indica que el crecimiento radial

no está significativamente influenciado por las condiciones climáticas del año anterior (Constante-García et al., 2010; Fritts, 1976). Estos resultados muestran que la especie sea particularmente adecuada para estudios de reconstrucción climática, porque permite registrar con mayor precisión las variaciones climáticas interanuales.

De acuerdo con Briffa (1995), una cronología de sitio con un valor de señal expresada de la población (EPS) superior a 0.85 indica que el número muestras es adecuado; en este estudio, se alcanzaron valores superiores; es decir, valores entre 0.934 y 0.972 para los tres índices de crecimiento (AT, MTe y MTa); lo cual lo que confirma la robustez de los datos analizados.

Con base en los parámetros dendrocronológicos obtenidos para *P. montezumae* en este estudio y los hallazgos reportados en estudios de la misma especie, como el de Cortés-Cortés (2020) y estudios de otras especies del centro del país, reconocidas por su buen potencial en este campo (Cerano-Paredes et al., 2014; Villanueva-Díaz et al., 2016; Villanueva-Díaz et al., 2017), se puede concluir que presenta un potencial dendrocronológico de moderado a alto, lo que la hace adecuada para investigaciones relacionadas con el impacto del clima y el cambio climático en su crecimiento radial.

La relación entre el clima y el crecimiento radial indica que la disponibilidad de humedad, particularmente durante el invierno y la primavera, influye positivamente en el crecimiento de la especie. Este comportamiento coincide con un patrón que se presenta desde el sureste de los Estados Unidos hasta el centro de México, como lo han señalado diversos estudios (Allende et al., 2016; Cerano-Paredes et al., 2013; St. George et al., 2010; Villanueva-Díaz et al., 2016; Villanueva-Díaz et al., 2017). Por lo tanto, las lluvias de baja intensidad, pero de larga duración junto con tasas moderadas de evaporación, permiten la

retención de humedad en el suelo, favoreciendo el desarrollo durante los primeros meses de la temporada de crecimiento (Cerano-Paredes et al., 2009; Cerano-Paredes et al., 2011; Cleaveland et al., 2003; Constante-García et al., 2009; Díaz et al., 2002).

Por otra parte, las precipitaciones de verano y otoño del año de crecimiento actual presentan una variabilidad en su relación con las cronologías de *P. montezumae*; mientras que, los meses de otoño del año previo muestran correlaciones negativas y algunas estadísticamente significativas. Este patrón ha sido documentado también en investigaciones sobre otras especies del género *Pinus* (Cerano-Paredes et al., 2011, Cerano-Paredes et al., 2013; Chávez-Gándara et al., 2017; López-Hernández et al., 2018). Dicho comportamiento podría explicarse por la abundancia de lluvia durante estos periodos, que supera la capacidad de infiltración del suelo, provoca saturación de sus partículas y genera escurrimientos superficiales, limitando así su disponibilidad para el desarrollo del árbol, así como por el hecho de que la mayor parte de los fotosintatos producidos en la temporada de lluvias se asignan al desarrollo de la copa, dejando en segundo plano el incremento en el diámetro del tronco (Fritts, 1976). No obstante, esta lluvia es de gran importancia, pues parte de ella se almacena en el suelo y puede ser utilizada en la siguiente etapa de crecimiento (Meko et al., 1995).

El crecimiento de *P. montezumae* está principalmente influenciado y regulado por la disponibilidad de humedad durante el otoño del año previo y la primavera del año en curso. Al igual que otras especies estudiadas en investigaciones dendrocronológicas en el norte y centro de México, *P. montezumae* mostró una respuesta significativamente mayor a la precipitación que a la temperatura (Cerano-Paredes et al., 2013; Constante-García et al., 2010; Villanueva-Díaz et al., 2015; Villanueva-Díaz et al., 2017).

Los análisis de la temperatura máxima, mínima y media han identificado relaciones positivas entre estos factores y el crecimiento radial de los árboles en diversas partes del mundo, demostrando que la temperatura es un factor determinante en el desarrollo de los bosques, reflejándose en procesos clave, como la reactivación del cambium vascular, la diferenciación celular del xilema y la fotosíntesis, basándose en análisis de índices de ancho de anillo (Antonucci et al., 2017; Li et al., 2017; Li et al., 2018; Zuhu et al., 2016). Este estudio confirma la importancia de la temperatura en el crecimiento del *P. montezumae*, debido a que se logra evidenciar, en algunos meses, el impacto de esta variable. De manera similar a lo observado en el estudio de *P. montezumae* realizado por Cortés-Cortés (2020), se identificaron principalmente relaciones positivas entre la temperatura máxima y la cronología estandarizada; además, en ambos estudios se observó una disminución en los valores estadísticamente significativos ($p_{\text{valor}} < 0.05$) al correlacionarse con la cronología residual.

En otros estudios se han identificado correlaciones positivas entre la cronología de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y la temperatura máxima, hallazgos que respaldan la evidencia presentada en otras investigaciones, que sugieren que el aumento en la temperatura máxima favorece el crecimiento de *P. hartwegii* en la región central del país (Astudillo-Sánchez et al., 2017; Astudillo-Sánchez et al., 2019; López-Hernández et al., 2018).

La temperatura mínima mostró una influencia positiva en la mayoría de los meses analizados, destacándose su efecto sobre la cronología de madera tardía, la cual presentó el mayor número de correlaciones positivas estadísticamente significativas al 0.05. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado en otros estudios dendrocronológicos realizados en México, que han encontrado correlaciones positivas significativas entre las

temperaturas invernales y el crecimiento de diversas coníferas (Cerano-Paredes et al., 2012; Cerano-Paredes et al., 2014; Chávez-Gándara et al., 2017; Correa-Díaz et al., 2019; Huante et al., 1991; López-Hernández et al., 2018).

El crecimiento de las especies en respuesta a las temperaturas mínimas se debe, en gran medida, a que estas condiciones favorecen una menor evaporación del suelo y las plantas, tienen una mayor disponibilidad de agua para el crecimiento (Cerano-Paredes et al., 2011; Chávez-Gándara et al., 2017).

En relación a la temperatura media, diversos estudios reportan que esta influye de manera negativa en el crecimiento radial (Cortés-Cortés et al., 2020; Manzanilla-Quñones et al., 2020; Villanueva-Díaz et al., 2016). Sin embargo, en la presente investigación se identificó la presencia de correlaciones positivas, coincidiendo con lo reportado para otras especies de coníferas (Cerano-Paredes et al., 2014; Correa-Díaz et al., 2019). En la cronología residual se observaron correlaciones negativas de enero y mayo, un patrón que también se presentó al correlacionarse con la temperatura máxima. Este comportamiento puede atribuirse tanto al déficit hídrico como a que las temperaturas en la zona de estudio, en ciertos meses, se sitúan fuera del rango óptimo para la fotosíntesis en algunas coníferas, el cual oscila entre 15 y 25 °C, reduciéndose gradualmente en ambos extremos (Huxman et al., 2003; McCullough et al., 2017; Williams et al., 2013).

Conclusiones

Los resultados de este estudio indican que el *Pinus montezumae* es una especie que responde a la precipitación de primavera y verano porque favorecen el incremento anual del crecimiento radial, en comparación con la temperatura, lo anterior sugiere que la

variabilidad en la cantidad de lluvia afecta directamente la formación de los anillos de crecimiento.

La temperatura máxima de otoño contribuye al desarrollo de madera temprana al final del ciclo de crecimiento; mientras que la temperatura media y mínima del invierno propicia la generación de madera tardía. Además, se observó que la especie es sensible a eventos de sequía al disminuir el crecimiento radial como se observó en la última década del periodo de estudio.

Los efectos del cambio climático podrían intensificar los desafíos que enfrenta el *P. montezumae*, al modificar los patrones de precipitación e incrementar las temperaturas máximas en su hábitat natural. La mayor frecuencia de sequías prolongadas y eventos de lluvias torrenciales podrían incrementar su vulnerabilidad al estrés hídrico. En escenarios futuros, de mayor variabilidad climática, es probable que esta especie experimente una disminución sostenida en su crecimiento. Estos hallazgos resaltan la importancia del *P. montezumae* como un indicador del impacto de la variabilidad climática en los bosques de la región.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el otorgamiento de una beca para estudios de maestría al primer autor. A la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo y al personal responsable de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan por el acceso y apoyo para la realización de esta investigación.

Referencias

- Aber, J., Neilson, R. P., McNulty, S., Lenihan, J. M., Bachelet, D., y Drapek, R. J. (2001). Forest processes and global environmental change: Predicting the effects of individual and multiple stressors. *BioScience*, 51(9), 735. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051)
- Allende, T. C., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D. R., Villanueva-Díaz, J. y Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.04.002>
- Antonucci, S., Rossi, S., Deslauriers, A., Morin, H., Lombardi, F., Marchetti, M. y Tognetti, R. (2017). Large scale estimation of xylem phenology in black spruce through remote sensing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 233, 92-100. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.011>
- Astudillo-Sánchez, C. C., Fowler, M. S., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R. y Soria-Díaz, L. (2019). Recruitment and facilitation in *Pinus hartwegii*, a Mexican alpine treeline ecotone, with potential responses to climate warming. *Trees*, 33, 1087-1100 <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01844-3>
- Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., Nava-Bernal, G. E. y Gómez-Albores, M. A. (2017). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees*, 31, 441–453. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1460-z>

- Benito, F. G. (2014). *Archivos climáticos y paleohidrológicos. Introducción a datos proxy y su análisis*. Madrid, España: CSIC- Museo Nacional de Ciencias Naturales.
- Briffa, K. R. (1995). Interpreting high-resolution proxy climate data. The example of dendroclimatology. En H. von Storch y A. Navarra (Eds.), *Analysis of climate variability, applications of statistical techniques* (pp. 77–94). Nueva York: Springer Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03167-4_5
- Bunn, A. G. (2010). Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*, 28(4), 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.12.001>
- Bunn, A.G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2), 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Cassman, K. G. y Wood, S. (2005) Cultivated systems. En R. Hassan, R. Scholes y N. Ash (Eds.), *Ecosystems and human well-being: Current state and trends* (pp. 745–794). Washington, DC; Millennium Ecosystem Assessment - Island Press. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.804.aspx.pdf>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz J., Cervantes-Martínez, R., Vázquez-Selem, L., Trucios-Caciano, R. y Guerra-de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas* (83), 41-54. <https://doi.org/10.14350/rig.35190>

- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Arreola-Ávila, J. G., Sánchez-Cohen, I. y Valdez-Cepeda, R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712009000200002&lng=es&tlng=es
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Méndez-González, J. y Constante-García, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 235-249. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800006&lng=es&tlng=es
- Cerano-Paredes, J., Rivera-González, M., Estrada-Ávalos, J., Trucios-Caciano, R. y Ríos-Saucedo, J. C. (2012). Análisis dendrocronológico de *Pinus cooperi* en Durango, México. *Agrofaz*, 12(3), 81-88.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Trucios-Caciano, R. y Guerrero-Soto, J. L. (2013). Reconstrucción de sequías fuertes en el Parque Nacional "Pico de Tancítaro", Michoacán. *Revista Chapingo serie Zonas Áridas*, 2, 57-62. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2012.06.026>
- 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. y 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*, 38(2), 387-399.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>

Cleaveland, M.K., Stahle, D.W., Therrell, M.D., Villanueva-Díaz, J. Burns, B.T. (2003).
Tree-Ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in
Durango, Mexico. *Climatic Change* 59, 369–388.
<https://doi.org/10.1023/A:1024835630188>

CONANP. (2013). Programa de manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl–Popocatepetl.
Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), México.
Recuperado el 15 agosto, 2024 de
[https://conanp.gob.mx/conanp/dominios/iztapopo/documentos/programa_dema
nejo_izta_popo.pdf](https://conanp.gob.mx/conanp/dominios/iztapopo/documentos/programa_demanejo_izta_popo.pdf)

Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E. H. y
Valencia-Manzo, S. (2009). Dendrocronología 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=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000200002&lng=es&tlng=es)

Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J. y Estrada-Ávalos, J. (2010).
Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto técnico número
19. Gómez Palacio, Durango: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias.

- Cook, E. R. y Kairiukstis, L.A. (1990) Methods of dendrochronology. *Applications in the Environmental Sciences*. International Institute for Applied Systems Analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Correa-Díaz, A., Silva, L. C. R., Horwath, W. R., Gómez-Guerrero, A., Vargas-Hernández, J., Villanueva-Díaz, J., Velázquez-Martínez, A y Suárez-Espinoza, J. (2019). Linking remote sensing and dendrochronology to quantify climate-induced shifts in high-elevation forests over space and time. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124, 166–183. <https://doi.org/10.1029/2018JG004687>
- Cortés-Cortés, O., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Flores-López, C. y Valencia-Manzo, S. (2020). 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. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.03.012>
- Díaz, S. C., Therrell, M. D., Stahle, D. W. y Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua (México) winter-spring precipitation reconstructed from tree rings, 1647-1992. *Climate Research*, 22, 237-244.
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 77-93. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500077&lng=es&tlng=es

- Farjon, A., Pérez-de la Rosa, J. A. y Styles, B. T. (1997). *Guía de Campo de los pinos de México y América Central*. The Royal Botanic Gardens, Kew e Instituto Forestal de Oxford, Universidad de Oxford: Oxford, UK.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press Inc.: New York.
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205-221.
- Gutiérrez-García, G. y Ricker, M. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902676. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- Howard, I. M., Stahle D. W., Torbenson, M. C. A. y Griffin, D. (2021). The summer precipitation response of latewood tree-ring chronologies in the southwestern United States. *International Journal of Climatology*, 41, 2913-2933. <https://doi.org/10.1002/joc.6997>
- Huante, P., Rincón, E. y Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, Mexico. *Tree-Ring Bulletin*, 51, 15–28.
- Huxman, T. E., Turnipseed, A. A., Sparks, J. P., Harley, P. C. y Monson, R. K. (2003). Temperature as a control over ecosystem CO₂ fluxes in a high-elevation, subalpine forest. *Oecologia*, 134, 537–546 <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1131-1>

IMTA. (2020). Tzolkin Monitor de Sequía de Mesoamérica. Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua, Secretaria de Medio Ambiente Recursos Naturales, México. Recuperado el 18 agosto, 2024 de <http://galileo.imta.mx/Sequias/moseq/index.html>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC. https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf

IPCC. (2021). *Climate change 2021: A summary for all*. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGI_SummaryForAll.pdf

Li, M., Duan, J., Wang, L. y Zhu, H. (2018). Late summer temperature reconstruction based on tree-ring density for Sygera Mountain, southeastern Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 163, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.02.005>

Li, X., Liang, E., Gricar, J., Rossi, S., Čufar, K. y Ellison, A. M. (2017). Critical minimum temperature limits xylogenesis and maintains treelines on the southeastern Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 62(11), 804-812. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.04.025>

López-Hernández, M. I., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E. H., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R. y Esquivel-Arriaga, F. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* a variables climáticas en Chiapas,

México. *Biología Tropical*, 66(4), 1580–1596. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v66n4/0034-7744-rbt-66-04-1580.pdf>

Manzanilla-Quñones, U., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J. y Villanueva-Díaz, J. (2020). Sensibilidad climática en anchuras de anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii*: una especie alpina mexicana con potencial dendroclimático. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91(0), e913117. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3117>

McCullough, I. M., Davis, F. W. y Williams, A. P. (2017). A range of possibilities: Assessing geographic variation in climate sensitivity of ponderosa pine using tree rings. *Forest Ecology and Management*, 402, 223–233. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.025>

Meko, D., Stockton, C. W. y Boggess, W. R. (1995). The tree–ring record of severe sustained drought. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(5), 789 – 801. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03401.x>

Meko, D.M. y Baisan, C. H. (2001). Pilot study of latewood-width of conifers as an indicator of variability of summer rainfall in the North American monsoon region. *International Journal of Climatology*, 21, 697–708. <https://doi.org/10.1002/joc.646>

NASA POWER. (2023). Prediction Of Worldwide Energy Resources. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington D. C. Recuperado el 31 junio, 2024 de <https://power.larc.nasa.gov>

- Osorio-Osorio, J. A., Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Soria-Díaz, L. y Vargas-Tristán, V. (2020). Reconstrucción histórica de la precipitación en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México, mediante anillos de crecimiento en *Taxodium mucronatum* (Cupressaceae). *Revista de Biología Tropical*, 8(3), 818–832. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i3.39624>
- Posit team (2024). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. <http://www.posit.co/>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Santillán-Hernández, M., Cornejo-Oviedo, E. H., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S. y Capó-Arteaga, M. Á. (2016). 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>
- Schweingruber, F. H. (1988). *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology*. Holland: Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht.
- St. George, S., Meko, D. M. y Cook, E. R. (2010). The seasonality of precipitation signals embedded within the North American Drought Atlas. *The Holocene*, 20(6), 983–988. <https://doi.org/10.1177/0959683610365937>
- Stokes, M. A. y Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. Tucson. The University of Arizona Press.

- Vaganov, E. A., Hughes, M. K. y Shashkin, A. V. (2006). *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E. A., Chávez-Durán, A. A., Zavala-Aguirre, J. L., Cerano-Paredes, J. y Martínez-Sifuentes, A. R. (2017). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411464>
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Vázquez-Selem, L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., Franco-Ramos, O. y Ruiz-Corral, J. A. (2015). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas*, 86, 5-14.
- Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Gómez-Guerrero, A., Cerano-Paredes, J., Aguirre-González, N. A. y Franco-Ramos, O. (2016). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tláloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(2), 175-185. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802016000200175&lng=es&tlng=es
- Williams, A. P., Allen, C. D., Macalady, A. K., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Swetnam, T. W., Rauscher, S. A., Seager, R., Grissino-Mayer, H. D., Dean, J. S., Cook, E. R., Gangodagamage, C., Cai, M. y McDowell, N. G. (2013).

Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality.
Nature Climate Change, 3, 292–297. <https://doi.org/10.1038/nclimate1693>

Zhu, L., Zhang, Y., Li Z., Guo, B. y Wang, X. (2016). A 368-year maximum temperature reconstruction based on tree-ring data in the northwestern Sichuan Plateau (NWSP), China. *Climate of the Past*, 12, 1485–1498. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1485-2016>

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Los análisis realizados en esta investigación indican que *P. montezumae* tiene potencial dendrocronológico de medio a alto, los anillos de crecimiento reflejan de manera significativa las condiciones ambientales en las que se desarrolla, por tanto, es una especie apta para estudios de variabilidad climática y reconstrucción climática.

El análisis de correlación entre las variables climáticas y las cronologías de crecimiento indican que *P. montezumae* muestra una respuesta significativa a la precipitación durante la primavera y el verano, ya que estas estaciones favorecen el incremento del crecimiento radial anual. En contraste, la temperatura parece tener una influencia menor, lo que sugiere que las variaciones en la cantidad de lluvia impactan directamente la formación de los anillos de crecimiento.

Por otro lado, se identificó que la temperatura máxima en otoño contribuye al desarrollo de la madera temprana al final del ciclo de crecimiento, mientras que la temperatura media y mínima en invierno favorecen la formación de madera tardía. Asimismo, se evidenció que la especie es sensible a eventos de sequía, ya que su crecimiento radial disminuyó notablemente durante la última década.

El impacto del cambio climático en los bosques es cada vez más evidente, y los patrones de crecimiento observados en *P. montezumae* reflejan que es una especie altamente influenciada por las variaciones climáticas. Los escenarios climáticos proyectan un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como sequías prolongadas y lluvias torrenciales, lo que alterará la dinámica de los ecosistemas y afectará significativamente el crecimiento y la distribución de esta especie. Estos resultados subrayan la importancia de continuar con estudios dendrocronológicos que permitan evaluar los efectos del cambio climático a largo plazo y generar estrategias para la conservación y manejo de estos ecosistemas forestales.