



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en
Zonas Áridas**

**Reconstrucción hidroclimática en el municipio de San Dimas, Durango
con base en anillos de crecimiento de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham.**

T E S I S

Que como requisito parcial

Para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

Presenta:

MARÍA DEL SOCORRO MÉNDEZ MÁRQUEZ

Bajo la supervisión del Dr. José Villanueva Díaz

Bermejillo, Durango, México. Abril 2023



APROBADA



inifap
Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Tesis realizada por **MARIA DEL SOCORROMÉNDEZ MÁRQUEZ** 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 RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR: 

DR. JOSÉ VILLANUEVA DÍAZ

CO-DIRECTOR: 

DR. JULIÁN CERANO PAREDES

ASESOR: 

DR. ALDO RAFAEL MARTÍNEZ SIFUENTES

ASESOR: 

M.C RAFAEL CARRILLO FLORES

ÍNDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CUADROS	v
AGRADECIMIENTOS	ix
DEDICATORIAS	x
DATOS BIOGRÁFICOS	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
1.3 Hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Dendrocronología.....	5
2.1.1. Principios dendrocronológicos	5
2.1.2. Aplicaciones de la dendrocronología	7
2.1.3. Investigación dendroclimatológica.....	8
2.1.4. Investigaciones dendroclimaticas en México	9
2.2. <i>Pinus leiophylla</i>	10
2.3. Fenómenos de interacción Océano- Atmósfera.....	11
2.3.1. El Niño Oscilación del Sur (ENSO).....	12
2.3.2. Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)	13
2.3.3. Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)	14
2.3.4. El Monzón de Norteamérica (NAMS)	15
2.4 Índices de Sequia	16
2.4.1 Índice de Sequía de Palmer (PDSI)	16
2.4.2 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).....	17
2.4.3 Índice Estandarizado Evaporación, Precipitación (SPEI)	17
3. LITERATURA CITADA	18
CAPITULO II	26
EVENTOS EXTREMOS HIDROCLIMÁTICOS EN LA CUENCA DEL RÍO PIAXTLA, SINALOA, MÉXICO	26
RESUMEN	26

4.	INTRODUCCIÓN	27
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	28
5.1.	Ubicación del área de estudio	28
5.2.	Muestreo dendrocronológico.....	30
5.3.	Preparación y análisis de muestras en el laboratorio	32
5.4.	Fechado y medición.....	33
5.5.	Análisis de datos.....	34
5.6.	Obtención de datos climáticos	35
5.7.	Obtención de datos hidrométricos.....	36
5.8.	Índices océano-atmosfera e índices de sequía.....	36
5.9.	Función de respuesta	37
5.10.	Calibración y verificación del modelo.....	38
5.11.	Reconstrucción de precipitación	38
6.	RESULTADOS	39
6.1.	Desarrollo de cronologías.....	39
6.2.	Relaciones entre variables climáticas y series dendrocronológicas.....	41
6.3.	Relación entre datos hidrométricos y la serie integrada de anillo total	44
6.4.	Relación entre los registros de precipitación y de gastos hidrométricos	45
6.5.	Índices de sequía	45
6.6.	Madera tardía ajustada	47
6.7.	Relación entre precipitación estacional e índice de madera temprana.....	47
6.8.	Calibración y verificación del modelo.....	48
6.9.	Precipitación reconstruida	49
6.10.	Análisis de ondeleta de la serie de precipitación reconstruida.....	50
7.	DISCUSIÓN	51
7.1.	Parámetros dendrocronológicos de las series generadas.....	51
7.2.	Función de respuesta entre variables climáticas y series dendrocronológicas	52
7.3.	Función de respuesta entre datos hidrométricos y la serie integrada de anillo total ..	53
7.4.	Relación entre índices dendrocronológicos de madera temprana y de sequía	53
7.5.	Función de precipitación reconstruida.....	54
7.6.	Influencia de fenómenos océano-atmósfera en la variabilidad de la precipitación reconstruida.....	55
8.	CONCLUSIONES	56
9.	LITERATURA CITADA.....	58

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de las cronologías de anillo total de los sitios (Vencedores, San José de Miravalles y una combinada al integrar los dos sitios).	40
Cuadro 2. Asociación determinada entre índices de sequía y la cronología EWI de la serie integrada	46
Cuadro 3. Valores estadísticos del modelo de calibración y verificación en la precipitación estacional reconstruida de octubre abril registrado en el periodo 1988-2019 (32 años).....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático de las condiciones de El Niño y La Niña. El lado izquierdo de cada diagrama representa las condiciones climáticas del Océano Pacífico Occidental, cerca de Asia; mientras que el lado derecho son las condiciones dominantes del Océano Pacífico oriental, cerca de América del Sur. Colores: rojo/ naranja indican temperaturas cálidas en la superficie del océano. Amarillo/ verdoso indican temperaturas más frías. Las nubes de lluvia se forman sobre la piscina de agua tibia, durante El Niño, la piscina de agua tibia se mueve hacia el este y la pendiente de la termoclina se aplanan. Mientras que, para La Niña, la piscina cálida se mueve hacia el oeste y la pendiente de la termoclina aumenta. Fuente: Proyecto PMEL <http://www.pmel.noaa.gov/elnino/schematic-diagrams> 12

Figura 2. Representación de patrones típicos de anomalías en la temperatura de la superficie del mar. Los contornos representan la presión a nivel del mar, las flechas es la tensión del viento en superficie, durante la fase cálida (izquierda) y fría (derecha) en un invierno típico. El color azul representa temperaturas frías, mientras que el rojo temperaturas cálidas. Fuente: <http://research.jisao.washington.edu/pdo/> 14

Figura 3. (a) Patrón de SST de AMO observado, utilizando el conjunto de datos HadISST para el período 1870-2015. (b) Patrón de TSM de la NAO observado (invertido) para el mismo periodo. Fuente: Trenberth *et al.* 2021. 15

Figura 4. Animación de vapor de agua de la tarde del 22 de agosto de 2018 que muestra la circulación del monzón y la formación de tormentas eléctricas (azul oscuro, verde, rojo oscuro). El aire seco se muestra en naranja. Fuente: Climate.gov <https://www.climate.gov/media/13213> 16

Figura 5. Ubicación geográfica de los sitios de estudio en el municipio de San Dimas, Durango. INEGI (2018). 29

Figura 6. a) Extracción de muestras con taladro de Pressler, b) Preparación del núcleo de crecimiento en papel periódico, c) Rotulado de núcleos de crecimiento, d) Corte en sección transversal con apoyo de motosierra, e) Rotulado de rodajas para su identificación en laboratorio.	31
Figura 7. a) Montado de núcleos de crecimiento, b) posición de traqueidas y c) rodajas en proceso de secado.	32
Figura 8. Sistema de medición VELMEX, utilizando en el proceso de medición de las muestras dendrocronológicas.	34
Figura 9. Series dendrocronológicas de anillo total versión estándar de <i>P. leiophylla</i> desarrolladas en los sitios San José de Miravalles (a), Vencedores (b) y una integrada al combinar ambos sitios (c).....	41
Figura 10. Análisis de la asociación entre variables climáticas (precipitación acumulada mensual, temperatura promedio máxima mensual y temperatura promedio mínima mensual) y la cronología integrada de anillo total y de madera temprana y tardía, versión estándar. Donde $p < 0.01$	42
Figura 11. Valores de correlación entre la precipitación acumulada estacional y la cronología integrada de anillo total (RWI), madera temprana (EWI) y madera tardía (LWI), el mejor período fue octubre-abril para las tres cronologías. Donde $** = p < 0.01$	43
Figura 12. Correlación entre el volumen de escurrimiento acumulado noviembre-agosto del periodo 1959-2009, estación hidrométrica Río Piaxtla y el índice de ancho anillo de la serie integrada en su versión estándar.	44
Figura 13. Correlación entre volumen de escurrimiento acumulado de noviembre a agosto, periodo 1959-2009 y el índice de ancho de anillo del sitio San José de Miravalles, Durango.	45
Figura 14. Relación entre el Índice de Sequia de Palmer (PDSI) junio-agosto y el Índice de madera temprana (EWI) de la serie integrada versión estándar.	466

Figura 15. Asociación entre la precipitación estacional octubre-abril y el índice de la cronología integrada de madera temprana (EWI) versión estándar, período 1988-2019. La correlación entre ambas variables fue de 0.71 ($p < 0.01$). 48

Figura 16. Precipitación estacional reconstruida y observada de octubre-abril y del periodo 1988-2019 (32 años). 49

Figura 17. Reconstrucción de precipitación estacional octubre-abril de los últimos 171 años para la región San Dimas, Durango. Valores por encima y por debajo de una desviación estándar con respecto a la media, se consideran eventos extremos, tanto húmedos como secos, respectivamente. 50

Figura 18. Análisis de ondeleta a nivel anual de la precipitación reconstruida invierno- primavera. Las manchas rojas circunscritas en línea negra señalan períodos significativos atribuidos a la influencia de fenómenos circulatorios como ENSO, que se presentaron en años específicos de la reconstrucción de precipitación. 51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Correlaciones encontradas entre las cronologías de madera temprana, tardía y de anillo total de los sitios Vencedores, San José de Miravalles y el sitio Integrado en relación a las variables de precipitación, temperatura promedio mensual máxima y temperatura promedio mensual mínima. Los valores en negritas son significativos ($p < 0.05$).....	64
Anexo 2. Correlaciones encontradas entre las cronologías de madera temprana, tardía y de anillo total del sitio integrado en relación a las variables de precipitación, temperatura promedio mensual máxima y temperatura promedio mensual mínima. Los valores en negritas son significativos ($p < 0.05$).	66

AGRADECIMIENTOS

Se otorga un sincero agradecimiento al Programa de Becas Nacionales de **CONACyT** 2021-2022, por la beca otorgada para mis estudios de maestría.

El desarrollo de la presente investigación, se financió a través del proyecto “Red dendrocronológica mexicana: aplicaciones hidroclimáticas y ecológicas”, Fondo Sectorial de Investigación para la Educación, CB-2016-01-283134.

A **Dios** por darme vida para llegar hasta donde me encuentro y por toda su misericordia en cada paso que doy.

A **mi familia** por su amor, apoyo incondicional e impulso en el desarrollo de este trabajo.

A la **UACH-URUZA**, por haber podido realizar mis estudios de postgrado en esta Institución. Así como al **INIFAP CENID-RASPA**, por permitirme hacer uso de las instalaciones del Laboratorio de Dendrocronología en Gómez Palacio, Durango, lugar donde fue desarrollado en su totalidad este estudio.

Dr. José Villanueva Díaz por apoyarme a emprender este proyecto y brindarme su amistad, confianza, apoyo incondicional, su excelente asesoría, paciencia y su disponibilidad para realizar el presente estudio.

A mi comité asesor: Dr. Julián Cerano Paredes, Dr. Aldo Rafael Sifuentes Martínez y M.C Rafael Carrillo Flores por su amistad y su gran aporte de experiencia y sabiduría para lograr los objetivos esperados. Así mismo, agradezco la ayuda que me brindo la M.C Fátima Reyes Camarillo para el éxito del análisis de las muestras tomadas en campo.

A la **UPUCODEFO No. 4** Área de producción Forestal “La Victoria-Miravalles” S.C.; Ing. José Guadalupe Reyes Rodríguez y a los comisariados que brindaron su tiempo y apoyo en la calidad de los sitios de muestro.

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mi familia que siempre estuvieron a mi lado para apoyarme, impulsarme y orientarme con sabiduría en el desarrollo de mi vida personal y profesional.

A mis padres por su gran ejemplo de persistir en los objetivos planteados, por su gran sacrificio en el seguimiento de mis estudios, trabajo y los valiosos valores y consejos que a lo largo de mi vida me han compartido para crecimiento espiritual y profesional, les amo y siempre pondré en alto el ejemplo que me han brindado. Es un privilegio contar con unos padres como ustedes.

A mi esposo por tu apoyo incondicional y fundamental para mi crecimiento profesional y personal, gracias por brindarme tu compañía, amistad, amor y paciencia, te amo.

A mis hermanas por todo el amor y apoyo que me demuestran día a día, las amo mucho y agradezco a Dios por sus vidas.

A mis hijos por ser fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día más. Nuevas emociones, nuevas etapas por descubrir y agradezco que una de ellas sea a lado de ustedes. Octubre fue un mes único e inolvidable que me impulso a buscar lo mejor de mí. Mi motivación más grande en mi vida.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre	María del Socorro Méndez Márquez
Fecha de nacimiento	27 de junio 1994
Lugar de nacimiento	Casas Grandes, Chihuahua
Profesión	Ing. Forestal
Cédula profesional	0518003058



Desarrollo académico

Bachillerato: Centro de Educación y Capacitación Forestal No.1, Uruapan, Michoacán, México.

Licenciatura: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

Desarrollo científico

Trabajó en prácticas profesionales durante 5 meses como asistente de investigador para el laboratorio de Dendrocronología, a cargo del Dr. José Villanueva Díaz, realizando el análisis de muestras de diferentes especies de árboles mediante técnicas dendrocronológicas estándar. Participó como asistente en el 15° curso Nacional de Dendrocronología.

Participación como expositora en el VI Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas, en diciembre 2022, con el trabajo: Reconstrucción hidroclimática con base en anillos de crecimiento de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham.

RESUMEN

El desarrollo de la variabilidad climática permite analizar e identificar la frecuencia de eventos extremos. Sin embargo, para México los datos climáticos disponibles muestran limitantes en extensión, dificultando su uso para un análisis histórico confiable. Derivado de lo anterior, es importante recurrir a otras fuentes de información “*proxy*” como el desarrollo de series dendroclimáticas, en este caso, de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., especie en la que los estudios dendrocronológicos han sido muy escasos. El objetivo de esta investigación fue, reconstruir la precipitación estacional invierno-primavera y de verano en el área de producción de agua de la cuenca del río Piaxtla, mediante series de crecimiento de madera temprana, tardía y de anillo total de *P. leiophylla*. Se recolectó un total de 184 muestras de 71 árboles. Las muestras se analizaron y fecharon con técnicas dendrocronológicas. Se determinó que el crecimiento anual está influenciado de manera significativa por la precipitación invierno-primavera, por la lluvia estacional octubre-abril ($r = 0.71$; $p < 0.01$). Con este resultado, se logró reconstruir los últimos 171 años (1850-2020) para la región de San Dimas, Durango. Así mismo, se identificó la influencia significativa ($r = 0.42$; $p < 0.01$) del Niño Oscilación del Sur (ENSO) en la longitud total de la cronología en frecuencias significativas de 1 a 4 años. Se determinó que el anillo total explica 41% de la variación estacional de los escurrimientos registrados en el río Piaxtla. De igual manera, se determinó una estrecha relación entre la serie de madera temprana e índice Estandarizado de Precipitación del período estacional invierno-primavera, donde refleja el balance de humedad que ocurre en esta época, por lo que una reducción en la disponibilidad hídrica, puede conducir a disminuir la productividad de esta especie; por lo que es importante abundar más en este tipo de estudios en la región.

Palabras clave: *Pinus leiophylla*, SMO, Dendroclimatología, PDSI, variabilidad climática.

Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas.
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: María del Socorro Méndez Márquez
Director de Tesis: Dr. José Villanueva Díaz

ABSTRACT

The development of climate variability makes it possible to analyze and identify the frequency of extreme events. However, the climatic data available for Mexico, are limited in extensión, making it difficult to use them for a reliable historical analysis. Therefore, it is important to resort to other sources of "proxy" information such as the development of dendroclimatic series, in this case, of *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., a species in which dendrochronological studies have been very scarce. The objective of this research was to reconstruct the winter-spring and summer seasonal precipitation in the water production area of the Piaxtla river basin, by means of earlywood, latewood, and total ring growth series of *P. leiophylla*. A total of 184 samples were collected from 71 trees. The samples were analyzed and dated using dendrochronological techniques. It was determined that annual growth is significantly influenced by winter-spring precipitation, by the seasonal October-April rain ($r = 0.71$; $p < 0.01$). With this result, it was possible to reconstruct the last 171 years (1850-2020) for the region of San Dimas, Durango. Likewise, the significant influence ($r = 0.42$; $p < 0.01$) of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) on the total length of the chronology was identified at significant frequencies of 1 to 4 years. It was determined that the total ring explains 41% of the seasonal variation of the runoff recorded in the Piaxtla river. Similarly, a close relationship was determined between the earlywood series and the Standardized Precipitation Index of the winter-spring seasonal period, which reflects the moisture balance that occurs at this time, so that a reduction in water availability can lead to decrease in the productivity of this species; Therefore, it is important to conduct more studies of this type in the region.

Keywords: *Pinus leiophylla*, SMO, Dendroclimatology, PDSI, climatic variability

Master's Degree Thesis on Natural Resources and Environment in Arid Zones.
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: María del Socorro Méndez Márquez
Thesis Director: Dr. José Villanueva Díaz

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio climático actualmente es un área de interés, debido a sus impactos cada vez más visibles, al alterar la variabilidad climática con repercusiones directas en los diferentes ecosistemas (Cassman & Wood, 2005). Estas modificaciones climáticas implican pérdidas socioeconómicas, debido a la disminución en la productividad que se extiende en diversas regiones de México y del mundo (Castells, 2020).

Un impacto palpable del cambio climático es el desplazamiento de poblaciones rurales a zonas urbanas, que originalmente dependen de la producción agrícola, forestal o pecuaria, producción que se ha visto afectada por condiciones climáticas extremas (Cattaneo & Peri, 2016). Comprender las consecuencias del cambio climático y la variabilidad climática que actualmente se registra, demanda de información histórica robusta que permita analizar a largo plazo la variabilidad natural y las tendencias que se esperarían, sino existiera la influencia del cambio climático. Una limitante a lo anterior es la escasa representatividad de las estaciones climáticas disponibles y la extensión y calidad de sus registros, lo que inhibe un entendimiento verdadero del efecto que han originado las actividades humanas en la variabilidad del clima que se registra actualmente (Climate Computer Project, 2015). Por lo anterior, es importante desarrollar un conocimiento histórico de la variabilidad climática natural, donde la influencia humana fue insignificante en su comportamiento. Una de las fuentes de aproximación a este problema lo constituyen los anillos de árboles datados con exactitud al año de su formación, lo que permite un conocimiento de la variabilidad del clima y de sus tendencias en períodos de siglos o milenios (Anchukaitis, 2017).

Investigaciones dendrocronológicas han mostrado un auge en su desarrollo en México durante los últimos años. Este interés se ha visto favorecido por la diversidad biológica tan grande que se encuentra en el país, especialmente por la existencia de una diversidad de coníferas, particularmente de pinos (Farjon et al., 1997) y de latifoliadas que integra alrededor de 160 especies de encinos que se encuentran en poblaciones puras (encinares) o bien mezclados con diversas coníferas (bosque de pino-encino) (Rzedowski, 1978; Vargas, 1997); riqueza biológica que favorece la provisión de diversos servicios ecosistémicos, como son captura de carbono, servicios hidrológicos, biodiversidad, belleza esencia y ecoturismo, entre otros y que son de gran importancia a la sociedad (Vargas, 1997; Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018).

La historia de los estudios dendrocronológicos en México, se inició en la década de 1950, pero estudios de esta índole han mostrado un mayor dinamismo en los últimos 20 años, donde se ha generado una red dendrocronológica que supera las 350 cronologías. Una de las especies de mayor importancia para este tipo de estudios es *Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco, conifera que muestra la formación de anillos anuales bien definidos, donde las bandas de madera temprana y tardía son muy visibles y su desarrollo está influenciado por condiciones climáticas distintas (Stahle et al., 2000). El desarrollo de series dendrocronológicas con esta especie dio pie a la búsqueda de nuevos estudios con la inclusión de muchas otras especies con alta sensibilidad climática para generar series dendrocronológicas extensas de utilidad para reconstrucciones hidroclimáticas, ecológicas y de otras disciplinas (Speer, 2010).

Estudios dendroclimáticos con extensiones de siglos y milenios han mejorado en gran medida el entendimiento del clima y la influencia de fenómenos atmosféricos de circulación global en México (Villanueva et al., 2015; Cerano et al., 2019) y su impacto en la disponibilidad de los recursos hídricos (Villanueva et al., 2017).

Fenómenos atmosféricos que definen la disponibilidad de recursos hídricos en el norte de México, como es el caso del Monzón Mexicano, han sido estudiados en cierta medida mediante reconstrucciones dendroclimáticas (Therrell et al., 2002).

Algunos otros estudios han analizado el comportamiento hidroclimático en cuencas hidrológicas del norte de México, como es el caso de las cuencas del Río Nazas, San Pedro Mezquital y Piaxtla (Villanueva et al., 2020). Este tipo de investigaciones son importantes para generar conocimiento de la variación hidroclimática histórica y determinar la presencia de eventos extremos, su frecuencia en el tiempo y los fenómenos climáticos que los detonan; esta información es de enorme importancia para los tomadores de decisiones, que pueden ayudar a la formulación de planes de mitigación en caso de su ocurrencia (Descroix et al., 2002; Villanueva et al., 2017).

El presente estudio, se desarrolló en la cuenca del Río Piaxtla, la cual provee de los recursos hídricos que se utilizan en la producción de alimentos en el sur del estado de Sinaloa, una de las regiones agrícolas de mayor importancia económica en el pacífico mexicano. Esta cuenca produce un volumen de agua aproximado de $3,800 \times 10^6$, de los cuales se emplean $693 \times 10^6 \text{ m}^3$ para la producción agrícola, así como en otros sectores de carácter pecuario, doméstico e industrial (CONAGUA, 2018). Así mismo, la producción que se genera en esta cuenca, provee de los requerimientos hídricos para el desarrollo de ecosistemas forestales y rivereños presentes en la misma (Lanza et al., 2015).

Un aspecto importante, sin embargo, es el cambio de uso del suelo, como aprovechamiento forestal intensivo, incremento en la frontera agrícola, incendios intencionales, entre otras acciones antropogénicas, que ponen en peligro la provisión de estos servicios ecosistémicos en esta y otras cuencas del norte de México (Descroix et al 2002) y abonan al problema del calentamiento global.

La importancia de analizar la variabilidad del clima mediante estudios dendroclimáticos en cuencas proveedoras de recursos hídricos presentes en la

Sierra Madre Occidental, como lo es la cuenca del río Piaxtla, justifica la importancia de analizar a detalle la variabilidad histórica de la precipitación, presencia de eventos hidrológicos extremos y su frecuencia, duración e intensidad; así como los fenómenos atmosféricos de amplio impacto que influyen en su comportamiento.

1.1 Objetivo general

Desarrollar una reconstrucción de precipitación estacional invierno-primavera y de verano en el área de producción de agua de la cuenca del río Piaxtla, mediante series de crecimiento de madera temprana (EW), tardía (LW) y de anillo total (RW) con la especie *Pinus. leiophylla*. Schl & Cham.

1.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar una cronología con base en anillos de crecimiento de *P. leiophylla* y determinar la función de respuesta a variables climáticas, registros hidrométricos e índices de sequía.
2. Analizar la influencia de fenómenos circulatorios atmosféricos y determinar el crecimiento o influencia en el crecimiento de la especie en la variabilidad climática local.

1.3 Hipótesis

Ho: Las series de crecimiento de madera temprana y tardía de *P. leiophylla*, no permiten reconstruir por separado la precipitación invierno-primavera y de verano, respectivamente y por ende no, constituyen un “proxy” de los volúmenes anuales de escurrimiento que se generan en la cuenca del río Piaxtla.

Ha: Con las series de crecimiento de madera temprana y tardía de *P. leiophylla* es factible reconstruir por separado la precipitación invierno-primavera y de verano, respectivamente, y, por lo tanto, determinar la variación interanual de escurrimiento que se generan en la cuenca del río Piaxtla.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Dendrocronología

La dendrocronología es un principio fundamental que se aplica a cualquier estudio del pasado, donde se involucra los anillos de crecimiento datados al año exacto de su formación. Esta ciencia enfatiza la relación entre los árboles y el tiempo, involucrando procesos físicos (temperatura, intensidad de la luz, niveles de dióxido de carbono) y procesos biológicos (nutrientes, competencia, disponibilidad de agua), que vinculan el medio ambiente con el crecimiento de los árboles. La palabra “dendrocronología” se deriva del griego: *dendro*-árbol, *cronos*- tiempo y *logos*- conocimiento, disciplina científica que engloba técnicas y métodos que permiten el estudio y datación de los anillos de crecimiento anual y la extracción e interpretación de información (Stokes, 1996; Gutiérrez, 2009).

Cada árbol registra los fenómenos naturales que ocurren a su alrededor y la dendrocronología nos ayuda a interpretar esta información, aplicándola a problemas ambientales e históricos (Fritts, 2012).

2.1.1. Principios dendrocronológicos

La dendrocronología se fundamenta en una serie de principios básicos, que determinan su validez científica, entre los cuales se encuentran los siguientes (Fritts, 2012):

1. Principio de uniformidad: implica una relación directa con los procesos fisiológicos que vinculan los factores limitantes de un árbol con el tiempo; los factores limitantes están determinados por factores biológicos, los cuales son en parte afectados por el grado y la duración de los cambios de un año a otro. Este

principio, también implica que los anillos más delgados pueden proporcionar información más precisa sobre las condiciones ambientales limitantes, por lo que es clave tratarlos como anillos representativos.

De acuerdo con Fritts (1976), para el norte de México y el suroeste de Estados Unidos, el principal factor limitante es la precipitación, aunque para sitios elevados donde se presenta el límite arbóreo puede ser la temperatura (Fritts, 2012).

2. Principio de amplitud ecológica: se refiere a la capacidad de adaptación de cada especie dentro del hábitat. Cerca del centro geográfico de distribución, una especie se puede encontrar en múltiples sitios y los factores climáticos rara vez limitan el crecimiento, excepto durante eventos climáticos extremos y en condiciones locales más restringidas. El crecimiento de los árboles en las regiones áridas, a menudo se ve afectado por la sequía, mientras que el crecimiento de los árboles cerca de los bosques de gran elevación o latitud se ven más afectados por bajas temperaturas.

3. Selección de sitio: las especies seleccionadas deben ubicarse en lugares que sean más sensibles al factor climático de interés.

4. Sensibilidad: a través de los anillos de crecimiento, se puede visualizar si se cuenta con variabilidad y a la falta de la misma, el árbol resulta complaciente por mostrar una homogeneidad en el ancho de anillos; es decir, anillos muy similares en grosor de un año a otro.

5. Datado cruzado: es el principio más importante de la dendrocronología, su aplicación determina los controles para asegurar la correcta datación. Esta datación es posible debido a las condiciones ambientales similares que limitan el crecimiento del ancho del anillo y a las fluctuaciones de un año a otro, reflejadas en factores ambientales. Por lo tanto, la datación cruzada, consiste en emparejar patrones de ancho de anillos entre una especie o entre especies, comprobando su sincronía.

6. Repetición: se basa en el mayor número de muestras recolectadas, y su importancia radica en replicar las mismas muestras en diferentes árboles para

estimar mejor la variación del clima, proporcionando así, mayor soporte estadístico para la cronología.

7. Estandarización: consiste en eliminar los efectos de factores que no están asociados con las fluctuaciones en los cambios ambientales, como la edad de los árboles o las condiciones del sitio. Para este proceso, a las mediciones anuales del anillo de crecimiento, se les fija diversas funciones para su estandarización como pueden ser, curvas exponenciales negativas, líneas rectas de tendencia negativa o positiva, curvas flexibles (splines) o curvas de crecimiento; al resultado de dividir la medición anual entre el valor obtenido de la curva, se le conoce como índice de ancho de anillo. Los índices generalmente no tienen tendencia lineal; es decir, muestran varianza homogénea y su valor medio es alrededor de la unidad (Fritts, 2012).

2.1.2 Aplicaciones de la dendrocronología

La dendrocronología está íntimamente ligada a otras disciplinas, entre las que destacan especialmente los campos del medio ambiente y el clima. Dependiendo de los objetivos de la investigación, se pueden aplicar a diferentes ciencias, tales como: dendroecología, dendrohidrología, dendrogeomorfología, dendroarqueología, dendropirocronología y dendroclimatología (Schweingruber et al., 1990; Tomazello et al., 2000; Villanueva et al., 2004). La dendroclimatología permite estudiar la relación que existe entre el grosor de los anillos de crecimiento y variables climáticas; así como su relación con fenómenos atmosféricos de circulación global, reconstruyendo climas pasados y presentes (Schweingruber et al., 1990; Bradley, 1999; Villanueva et al., 2004). La reconstrucción se fundamenta en la relación entre las series dendrocronológicas y variables climáticas.

Tales reconstrucciones pueden expandir los registros climáticos y fundamentar la variabilidad climática de alta y baja frecuencia en un mayor número de observaciones, lo que permite conocer con mayor confiabilidad, la presencia de sequías, períodos húmedos y sus tendencias en el tiempo, brindando así, a los

tomadores de decisiones un conocimiento más confiable de la variabilidad del clima con fines de mitigación (Fritts, 2012).

2.1.3 Investigación dendroclimatológica

La investigación dendroclimatológica en Europa, se ha realizado con diferentes especies de los géneros *Picea*, *Pinus*, *Larix* y *Abies* con fines de reconstrucción climática (Génova, 1988; Schweingruber et al., 1991; Esper et al., 2002).

En Latinoamérica y en particular en México, Argentina, Chile, Brasil, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Guatemala, entre otros, se tiene un mayor interés por analizar el potencial dendrocronológico de diversas especies y desarrollar reconstrucciones dendroclimáticas. Esta aplicación, se refleja en un incremento de publicaciones en este tema, a partir de 1990 hasta la actualidad (Sánchez et al 2022). El enfoque de los estudios generados consistió en dos escalas (local y regional) establecidos acorde a los objetivos acordados por los investigadores.

La escala regional se relaciona con la variabilidad climática, mientras que, en el enfoque local, se trabaja por impulsar la búsqueda de nuevas especies con potencial dendroclimatológico y contempla a su vez, el desarrollo cronológico de series lo más extensa posible y con un tamaño de muestra adecuado, que permita el desarrollo de un análisis más confiable en la reconstrucción de variables climáticas (precipitación, temperatura, evaporación, humedad relativa, presión atmosférica, entre otras); de tal forma, que sea factible determinar con alta confiabilidad su comportamiento histórico y sus tendencias en el tiempo (Sánchez et al 2022). Los principales géneros que se han abordado con fines dendrocronológicos en América Latina han sido *Pinus*, *Pseudotsuga*, *Austrocedrus*, *Araucaria*, *Taxodium*, entre otras.

2.1.4 Investigaciones dendroclimáticas en México

En México, las primeras cronologías de anillos de árboles se desarrollaron entre 1940 y 1950 (Schulman, 1944; Schulman, 1956; Scott, 1966). Inicialmente, el interés de Schulman se centró en examinar muestras de madera arqueológica de las especies *Cupressus L.*, *Taxodium mucronatum* Ten y *Abies religiosa*, distribuidas en la parte central del país. Mientras que, en el sur de México, los estudios realizados se centraron en especies arbóreas como *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis*, *Pinus rudis* y *Pinus pseudostrobus* (Naylor, 1971; Suzan & Franco, 1981).

Los estudios dendrocronológicos en México, que se desarrollan en la actualidad, han sido impulsados por instituciones académicas públicas y centros de investigación. La mayor participación se ha realizado a través del Instituto Nacional de Investigadores Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) con una aportación que supera el 50%, de los estudios totales realizados en este rubro. Estos estudios se han generado principalmente en sitios de la Sierra Madre Occidental y Oriental, con dominancia de bosques de coníferas (Sánchez et al., 2022). El enfoque de los estudios dendrocronológicos ha sido con fines de reconstrucción de precipitación y entendimiento de su variabilidad en el tiempo (Sánchez et al., 2022).

Los primeros estudios dendroclimáticos fueron estimaciones de precipitación e Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) en el norte de Sonora (Villanueva & McPherson, 1995). Estas investigaciones realizadas en México han propiciado un avance importante relacionado con la función de respuesta climática de coníferas, las cuales en su mayoría responden a la precipitación estacional invierno-primavera, que muestra alta influencia del Niño/Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). Este efecto, se refleja en el crecimiento de la madera temprana en el suroeste de los Estados Unidos, norte y noroeste de México (Lough & Fritts, 1985; Michaelsen, 1989; Michaelsen & Thompson, 1992; Cleaveland et al., 1992; Lough, 1992; Stahle & Cleaveland,

1993; Stahle et al., 1998; Villanueva et al., 2014; Chávez et al., 2017; Villanueva et al., 2020).

La mayoría de los trabajos utilizados en reconstrucciones de precipitación, han involucrado especies como *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus cembroides* Zucc., y *Taxodium mucronatum* Ten. especies que muestran amplia distribución en México, además de alcanzar varios siglos de edad y mostrar anillos de crecimiento bien diferenciados con presencia de bandas de madera temprana y tardía, cada una influenciada por condiciones climáticas distintas. Por esta razón, las cronologías de coníferas presentes en el norte de México han mostrado un incremento importante en su uso para analizar una de las señales más claras de la influencia de ENSO (Villanueva et al, 2004).

En este estudio, se eligió la especie *P. leiophylla* para analizar la respuesta climática de la especie a la precipitación invierno-primavera, tanto en el anillo total anual, madera temprana y tardía; así como determinar la influencia potencial de ENSO y del fenómeno del Monzón de Norteamérica; por lo anterior, se hace una breve descripción de la importancia ecológica y económica de la especie en la región de estudio.

2.2. *Pinus leiophylla*

P. leiophylla es un árbol nativo de importancia ecológica y económica en México. Es una conífera pionera, que soporta condiciones ecológicas adversas. La distribución en México se extiende a lo largo de la SMO y la Sierra Madre del Sur, desde Chihuahua hasta Oaxaca, en elevaciones de 1600 a 3000 msnm y en un rango de precipitación anual entre 600 a 1000 mm, que ocurren en alto porcentaje durante el verano. Posee alta tolerancia a las heladas invernales, que se pueden prolongar hasta verano (Perry, 1991). Los principales productos económicos de esta especie consisten en la producción de resina, pulpa y madera aserrada para construcción de durmientes de ferrocarril y leña (Perry, 1991).

P. leiophylla es una especie monoica en la que los árboles maduros producen estróbilos masculinos y femeninos (Williams, 2008).

Esta especie, como la mayoría de las coníferas, depende de la dispersión de semillas y polen por el viento, a una distancia de menos de 10 m del árbol, lo que facilita su reproducción y dominancia en ciertos rodales (Vander, 1992). Muchas de las poblaciones de *P. leiophylla* han sido diezmadas por incendios intencionales y cambios en el uso de suelo (Martínez et al. 2002), por lo que una propuesta debe considerar a esta especie en un programa nacional de reforestación, dada su importancia ecológica y a su capacidad para sobrevivir y desarrollarse en condiciones de humedad restringida; además es una de las pocas especies de coníferas con capacidad de rebrotar, lo cual es evidente particularmente después de un incendio.

2.3. Fenómenos de interacción Océano- Atmósfera

La variación climática puede depender de complejas interacciones entre la atmósfera y el océano, hielo y superficie terrestre (Philander, 1999; Magaña et al., 1999). Estas interacciones afectan la distribución espacial y temporal en los niveles de humedad, patrones de viento y precipitación, explicando así las causas naturales de la variación del clima (Magaña et al., 1999). Así, por ejemplo, en la región del Caribe, fenómenos circulatorios océano-atmósfera que se originan en los océanos Pacífico y Atlántico afectan la precipitación de esta región (Giannini et al., 2001).

En este sentido, en el presente estudio se evalúa el impacto de fenómenos circulatorios que como ENSO, Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) y el Monzón de Norteamérica (NAMS, por sus siglas en inglés) ejercen sobre el crecimiento radial anual de *P. leiophylla*. A continuación, se describen algunos aspectos físicos de los fenómenos indicados.

2.3.1. El Niño Oscilación del Sur (ENSO)

ENSO, es un fenómeno que ocurre en el Océano Pacífico, influyendo en el comportamiento del clima a nivel global y a escala interanual y multianual.

El Niño se deriva del calentamiento oceánico a gran escala en el Océano Pacífico; mientras que la expresión “*Oscilación del Sur*” se mide por la diferencia en la presión atmosférica entre las islas de Tahití y Darwin, es decir cuando este sistema de presión alta y baja se invierten en estas, existe una oscilación (Wang et al., 2017).

ENSO se clasifica en tres fases: El Niño, fase positiva vinculada con temperaturas superficiales cálidas en el Océano Pacífico; fase neutra y fase fría (La Niña), que se considera una fase negativa asociada a temperaturas frías (Magaña, 2003; Seneviratne et al., 2012). Las fases correspondientes con El Niño y La Niña (Figura 1) se vinculan con un patrón espacial característico de sequías e inundaciones. Ambos episodios son fenómenos que se presentan una vez cada 2 a 7 años y suelen durar entre 9 a 12 meses, solamente en algunas ocasiones se extienden hasta por dos años, manifestando su impacto de diferente manera (Seneviratne et al., 2012).

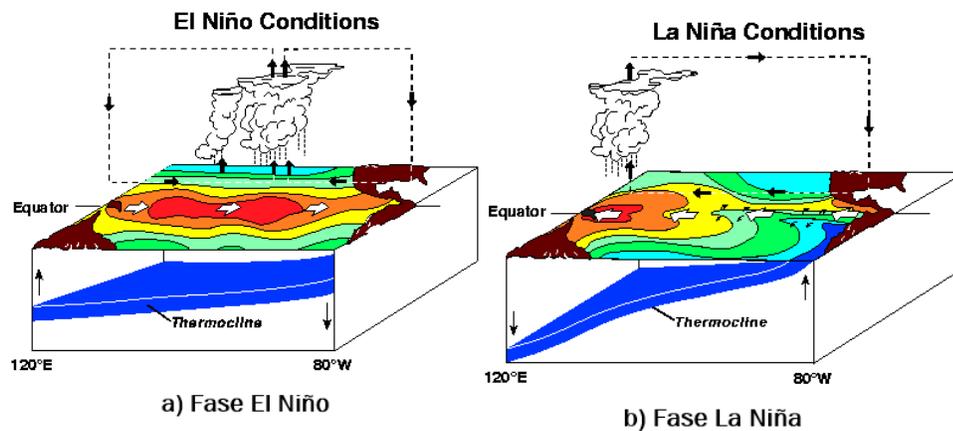


Figura 1. Diagrama esquemático de las condiciones de El Niño y La Niña. El lado izquierdo de cada diagrama representa las condiciones climáticas del Océano Pacífico Occidental, cerca de Asia; mientras que el lado derecho son las condiciones dominantes del Océano Pacífico oriental, cerca de América del Sur. Colores: rojo/ naranja indican temperaturas cálidas en la superficie del océano. Amarillo/ verdoso indican temperaturas más frías.

Las nubes de lluvia se forman sobre la piscina de agua tibia, durante El Niño, la piscina de agua tibia se mueve hacia el este y la pendiente de la termoclina se aplana. Mientras que, para La Niña, la piscina cálida se mueve hacia el oeste y la pendiente de la termoclina aumenta. Fuente: Proyecto PMEL <http://www.pmel.noaa.gov/elnino/schematic-diagrams>.

El monitoreo de las condiciones de ENSO se enfoca principalmente en las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (TSM) en 4 regiones geográficas del pacífico ecuatorial. Las anomalías TSM iguales o superiores a 0.5 °C (0.9 °F) corresponden a la región Niño 3.4 (que comprende las regiones Niño 3 y 4, desde 170 °W a 120 °W de longitud) son indicativas de la fase cálida de ENSO (El Niño), mientras que las anomalías menores o iguales a -0.5°C (-0.9°F) están asociadas con condiciones de fase fría (La Niña) (Magaña, 2003).

Registros paleoclimáticos han indicado que el Pacífico seguirá caracterizándose por una gran variabilidad estacional e interanual a medida que la tierra se calienta (Scroxtton et al., 2011). De tal manera, que reconstrucciones dendrocronológicas de precipitación han demostrado que la influencia de ENSO es mayor para el norte de México, en particular, durante su fase cálida, lo que implica un incremento en la precipitación durante el periodo estacional invierno-primavera (Villanueva et al., 2007, 2009; Cerano et al., 2009).

2.3.2. Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)

La Oscilación Decadal del Pacífico, se describe a menudo como un patrón de variabilidad climática de larga duración similar a El Niño (Zhang et al., 1997); los extremos en el patrón PDO están marcados por variaciones generalizadas en la cuenca del Pacífico y el clima de América del Norte. Paralelo a ENSO las fases extremas de PDO se han clasificado como cálidas y de enfriamiento (Figura 2), según lo definido por las anomalías de la temperatura en el Océano Pacífico nororiental y tropical (Wang et al., 2017; Mantua & Hare, 2002).

La etapa de enfriamiento (fase negativa) sucede en el interior del Pacífico Norte, mientras que la fase positiva (cálida) se presenta a lo largo de la costa de Norteamérica, Centroamérica y el Ecuador. (Mantua et al., 1997; Mantua & Hare, 2002).

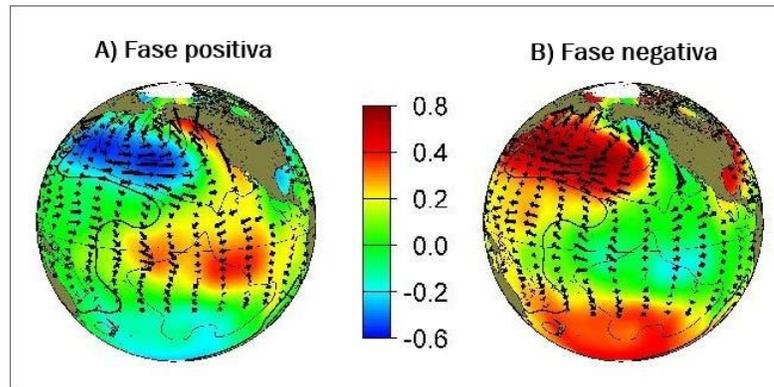


Figura 2. Representación de patrones típicos de anomalías en la temperatura de la superficie del mar. Los contornos representan la presión a nivel del mar, las flechas es la tensión del viento en superficie, durante la fase cálida (izquierda) y fría (derecha) en un invierno típico. El color azul representa temperaturas frías, mientras que el rojo temperaturas cálidas. Fuente: <http://research.jisao.washington.edu/pdo/>.

Dos particularidades que distinguen el PDO de ENSO, se reflejan en su escala de tiempo: mientras que ENSO es principalmente un fenómeno interanual, el PDO tiene una escala decenal. La influencia del PDO muestra una persistencia de 20 a 30 años (Mantua et al., 1997). La segunda característica se basa en la huella climática que deja PDO, por mostrarse con mayor intensidad en el sector del Pacífico Norte y América del Norte. Este índice es un resumen de patrones de presión, temperatura, viento y precipitación (Mantua et al., 1997).

2.3.3. Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)

La Oscilación Multidecadal del Atlántico constituye un modo de variabilidad climática multidecadal, con fases cálidas y frías alternas en amplias zonas del hemisferio norte. Es una oscilación de la temperatura de la superficie del océano Atlántico Norte, esencialmente constituye un ciclo continuo de cambios a largo

plazo, con periodos que pueden durar de 20 a 40 años. Afecta a Europa, África y Norteamérica (Enfield et al., 2001). Este fenómeno está relacionado con la distribución de la precipitación de verano en México.

Las etapas cálidas se asocian con períodos de sequía y las etapas frías con periodos húmedos (Figura 3). También está asociado con la frecuencia de sequias severas y ciclones (Enfield et al., 2001). Para el noroeste de México se ha documentado los efectos del AMO relacionado con las fluctuaciones del NAMS (Hu & Feng 2012).

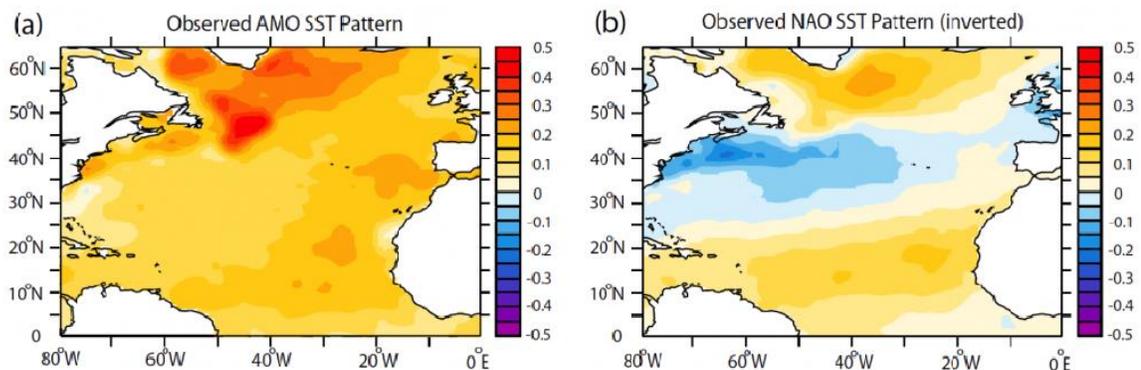


Figura 3. (a) Patrón de SST de AMO observado, utilizando el conjunto de datos HadISST para el período 1870-2015. (b) Patrón de TSM de la NAO observado (invertido) para el mismo periodo. Fuente: Trenberth et al. 2021.

2.3.4. El Monzón de Norteamérica (NAMS)

Este fenómeno circulatorio se origina por el cambio estacional en la dirección de los vientos entre el continente y el océano (Bryson & Lowry, 1955; Nava, 2012), domina el ciclo estacional de precipitación sobre el noroeste de México, sur de Arizona y grandes áreas de Nuevo México y Texas (Barlow et al., 1998). Las lluvias son cortas pero intensas, principalmente los picos durante el verano, representan más del 70% de la precipitación total anual para la región.

Este fenómeno (Figura 4) juega un papel importante en la hidrología del oeste de México (principalmente en las montañas de la SMO y sus alrededores, incluidos Sonora, Chihuahua, Sinaloa y Durango) y el suroeste de los Estados Unidos.

Lo cual puede propiciar efectos importantes para los sectores económicos de las regiones (Ray et al., 2007).

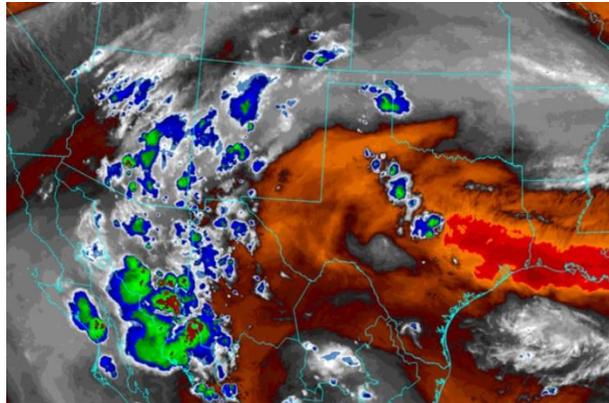


Figura 4. Imagen de vapor de agua de la tarde del 22 de agosto de 2018 que muestra la circulación del monzón y la formación de tormentas eléctricas (azul oscuro, verde, rojo oscuro). El aire seco se muestra en naranja. Fuente: Climate.gov <https://www.climate.gov/media/13213>

2.4 Índices de Sequia

2.4.1 Índice de Sequía de Palmer (PDSI)

El Índice de Sequía de Palmer fue desarrollado como un índice para medir el suministro y la demanda de humedad en el suelo. Se basa en el concepto de demanda de suministro de agua, teniendo en cuenta un desfase entre la precipitación real y la cantidad de precipitación necesaria para mantener las condiciones climáticas o de humedad normal, y las variables de evapotranspiración y escorrentía (Palmer, 1965). Este indicador es una visualización de la ocurrencia de sequias y la temporada de lluvias. Tiene una escala de - 6 (anormalmente seco) a + 6 (anormalmente húmedo) calculados a partir de registros históricos de variables climáticas como: precipitación, temperatura y humedad del suelo (McKee et al., 1993).

2.4.2 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El Índice Estandarizado de Precipitación fue desarrollado por McKee et al. (1993). Este índice se utiliza para detectar y monitorear sequías en varios sectores económicos como la agricultura, ganadería y silvicultura (Campos, 2015).

Consiste en convertir los datos de precipitación en probabilidades para registros de precipitación a largo plazo. Una ventaja que considera este índice, en comparación al Índice de Palmer es que permite analizar los efectos de la sequía en diferentes escalas de tiempo (Edwards, 1997). El SPI es adecuado para estudiar el comportamiento en períodos de un mes a varios meses o años, lo cual es importante para evaluar la disponibilidad de agua (McKee et al. 1993).

2.4.3 Índice Estandarizado Evaporación, Precipitación (SPEI)

Este índice representa un índice multiescalar de precipitación y de temperatura (Vicente et al., 2010), que es perceptible a los efectos del cambio climático. Permite la identificación de diferentes tipos e impactos de sequía, contando con la sensibilidad del PDSI en la demanda de evapotranspiración ocasionada por fluctuaciones climáticas (Vicente et al., 2012a, 2012b).

Para determinar este índice, se emplea el balance hídrico-climático. Este balance realiza la comparación del agua disponible con la demanda evaporativa atmosférica, proporcionando una medida más confiable referente al impacto de sequía. Se calcula en varias escalas de tiempo, es decir, más de uno, dos o tres meses, ajustando los valores a una distribución de probabilidad logística para la transformación de los datos originales en unidades estandarizadas comparadas en espacio y tiempo.

El SPEI se ha empleado en diferentes investigaciones donde se ha analizado la variabilidad de sequía (Potop, 2011; Li et al., 2011; Paulo et al., 2012), reconstrucción de sequía (Allen et al., 2011), sistema agrícola (Potop et al., 2012), impactos de sequía en la hidrología (Lorenzo et al., 2010) y ecológicos (Vicente et al., 2010).

Estos estudios demostraron que SPEI se correlacionó mejor con variables hidrológicas y ecológicas a diferencia de otros índices de sequía (Begueria et al., 2014).

3. LITERATURA CITADA

- Anchukaitis, k. (2017). Tree rings reveal climate change past, present, and future. *Proceedings of the American Philosophical Society*. 161 (3): 224-263.
- Allen, K. J., Ogden, J., Buckley, B. M., Cook, E. R., & Baker, P. J. (2011). The potential to reconstruct broadscale climate indices associated with southeast Australian droughts from *Athrotaxis* species, Tasmania. *Climate Dynamics*, 37 (9), 1799-1821. Doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-011-1011-7>
- Beguería, S., Vicente, S. S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International journal of climatology*, 34(10), 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Bradley, R. S. (1999). *Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary* (2nd ed). Amherst, Massachusetts, United States. Elsevier.
- Bryson, R. A., & Lowry, W. P. (1955). Synoptic climatology of the Arizona summer precipitation singularity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 36(7), 329-339. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-36.7.329>
- Campos, A. D. F. (2015). Contraste de los índices DPP, SPI y RDI para clasificación de sequías, en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 183-193. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200724222015000100012&lng=es&tlng=es.
- Castells Q. D. (2020). Desarrollo económico y cambio climático, una perspectiva espacial para Latinoamérica. *Revista Economía y Política*, 1-10.
- Cassman, K. G & Wood, S. (2005). Cultivated systems. In: Millenium Ecosystem Assessment Board, editor. *Millenium ecosystem assessment: global*

ecosystem assessment report on conditions and trends. Washington (DC): Island Press; p. 745-787.

- Cattaneo, C. & Peri, G. (2016). The Migration Response to Increasing Temperatures, *Journal of Development Economics*, 122: 127-146. <https://doi.org/1025097/rep.n32.2020.0>
- Cerano, P. J., Villanueva D. J., Fulé, P. Z., Arreola Á. J. G., Sánchez C. I., & Valdez C. R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y bosques*, 15(2), 27-44. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S14054712009000200002&script=sci_arttext
- Cerano, P.J., Villanueva D.J., Valdez C. R. D., Constante G.V., González B.J, & Estrada A.J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(10): 7-23.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Fulé, P., Arreola, J., Sánchez, I y Valdez, R. (2019). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosque*. 15 (2); 27-44.
- Chávez G. M. P., Cerano P. J., Nájera L. J. A., Pereda B. V., Esquivel A. G., Cervantes M. R. & Corral R. S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 38(2), 387-399. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>
- Cleaveland, M. K., Cook, E. R., & Stahle, D. W. (1992). Secular variability of the Southern Oscillation detected in tree-ring data from México and the southern United States. In *EL Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation* (pp. 271-291).
- Climate Computer Project. (2015). Base de datos. URL: <http://clicom-mex.cicese.mx>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). Estadísticas del agua en México. México: SEMARNAT. Retrieved from http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Descroix, J., Nouvelot, J. F., y Vauclin, M. (2002). Evaluation of antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-west Mexico). *Journal of Hydrology*, 263(1-4), 114–130. Doi: 10.1016/S0022-1694(02)00047-1.
- Edwards, D. C. (1997). Characteristics of 20th Century drought in the United States at multiple time scales. Air Force Inst of Tech Wright-Patterson Afb Oh. [Tesis de maestría, Universidad de Colorado]. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA325595>
- Enfield, D. B., Mestas-Nuñez, A. M., & Trimble, P. J. (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the

- continental US. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077-2080.
<https://doi.org/10.1029/2000GL012745>
- Esper, J., Cook, E. R., & Schweingruber, F. H. (2002). Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability.
- Farjon, A., de la Rosa, J. A. P., & Styles, B. T. (1997). *A field guide to the pines of Mexico and Central America*. Royal Botanic Gardens.
- Fritts, H.C. (1976) *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 p.
- Fritts, H. C. (2012). *Tree rings and climate*. Elsevier
- Génova, R. (1988). Comparación de tres series dendrocronológicas del valle de Conangles (Pirineo central). *Orsis: organismes i sistemes*, 3, 105-120.
- Giannini, A., Kushnir, Y., & Cane, M. A. (2001). Seasonality in the impact of ENSO and the North Atlantic high on Caribbean rainfall. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(2), 143-147.
[https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00231-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00231-8)
- Gutiérrez, E. (2009). *La dendrocronología: métodos y aplicaciones: En Arqueología Nàutica Mediterrània*. Universidad de Barcelona [Archivo PDF].
- Hu, Q., & Feng, S. (2012). AMO-and ENSO-driven summertime circulation and precipitation variations in North America. *Journal of Climate*, 25(19), 6477-6495. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00520.1>
- Lanza E., G. D. L., Salinas R. S. A. & Carbajal P. J. L. (2015). Cálculo del flujo ambiental como sustento para la reserva de agua al ambiente del río Piaxtla, Sinaloa, México. *Investigaciones geográficas*, (87), 25-38.E
- Li, J., Xie, S. P., Cook, E. R., Huang, G., D'arrigo, R., Liu, F., ... & Zheng, X. T. (2011). Interdecadal modulation of El Niño amplitude during the past millennium. *Nature climate change*, 1(2), 114-118.
<https://www.nature.com/articles/nclimate1086>
- Lorenzo, L. J., Vicente, S. S. M., Lopez, M. J. I., Beguería, S., García, R. J. M., & Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386(1-4), 13-26.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.001>
- Lough, J. M. (1992). An index of the Southern Oscillation reconstructed from western North American tree-ring chronologies. In *EL Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation* (pp. 215-226).
<http://pascalfrancis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6500846>
- Lough, J. M., & Fritts, H. C. (1985). The Southern Oscillation and tree rings: 1600–1961. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 24: 952-966.

- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica internacional*, 42(3), 313-330. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56842304>
- Magaña, V. (1999). *El Clima y El Niño. Los Impactos de El Niño en México*. V. Magaña (editor). Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación. México.
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069-1080. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
- Mantua, N. J., & Hare, S. R. (2002). The Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 58(1), 35-44. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1015820616384>
- Martínez T. T, J J Vargas H, Muñoz O. A & López U. J. (2002) Respuesta al déficit hídrico en *Pinus leiophylla*: consumo de agua y crecimiento en plántulas de diferentes poblaciones. *Agrociencia* 36(3), 365-376. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30236310.pdf>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* [Archivo PDF]. <https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>
- Michaelsen, J. (1989). Long-period fluctuations in El Niño amplitude and frequency reconstructed from tree-rings. *Aspects of climate variability in the Pacific and the western Americas*, 55, 69-74. <https://doi.org/10.1029/GM055p0069>
- Michaelsen, J., & Thompson, L. G. (1992). A comparison of proxy records of El Niño/Southern Oscillation. In *EL Niño. Historical and paleoclimatic aspects of the Southern Oscillation* (pp. 323-348).
- Naylor, T. H. (1971). *Dendrochronology in Oaxaca, Mexico: a preliminary study*. Tree-ring Bulletin.
- Nava, C. (2012). *Reconstrucción de las lluvias de verano en la región del Monzón Mexicano: registros de los últimos 6000 años*. Ensenada, Baja California, 68 México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Paulo, A. A., Rosa, R. D., & Pereira, L. S. (2012). Climate trends and behaviour of drought indices based on precipitation and evapotranspiration in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5), 1481-1491. <https://nhess.copernicus.org/articles/12/1481/2012/>

- Perry Jr, J. P. (1991). The pines of Mexico and central America. Timber Press, Inc.
- Philander, S. G. (1999). El Nino and La Nina predictable climate fluctuations. *Reports on Progress in Physics*, 62(2), 123. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/62/2/001/meta>
- Potop, V. (2011). Evolution of drought severity and its impact on corn in the Republic of Moldova. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3), 469-483. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-011-0403-2>
- Potop, V., Mozny, M., & Soukup, J. (2012). Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.002>
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Editorial LIMUSA. México, D.F. México 432 p.
- Sánchez, C. O. D., Carlón, A. T., Mendoza, M. E., & Villanueva D. J. (2022). Dendroclimatology in Latin America: A Review of the State of the Art. *Atmosphere*, 13(5), 748.
- Schulman, E. (1944). *Dendrochronology in Mexico, I*. *Tree-Ring Bulletin*
- Schulman, E. (1956). *Dendroclimatic changes in semiarid America*. University of Arizona Press, Tucson
- Schweingruber, F. H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F., & Bräker, O. U. (1990). Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8, 9-38.
- Schweingruber, F. H., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1991). Yearly maps of summer temperatures in Western Europe from AD 1750 to 1975 and Western North America from 1600 to 1982. *Vegetatio*, 92(1), 5-71.
- Scott, S. D. (1966) *Dendrochronology in Mexico*, Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona Press, Tucson.
- Scroxtton, N., Bonham, S. G., Rickaby, R. E., Lawrence, S. H. F., Hermoso, M., & Haywood, A. M. (2011). Persistent el Niño–southern oscillation variation during the Pliocene epoch. *Paleoceanography*, 26(2). <https://doi.org/10.1029/2010PA002097>
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., ... & Zwiers, F. W. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. <https://doi.org/10.7916/d8-6nbt-s431>
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. Tucson, A Z. 333 p.
- Stahle, D., Villanueva D. J., Cleaveland, M., Therrell, M., Paull, G. J., Burns, B. T., Salinas, W., Suzán A. H., Fule, P. Z & Roig, F. (2000). Recent tree-ring research in Mexico. *Dendrocronología en América Latina*. Mendoza, Argentina. EDIUNC. 285-306.

- Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (1993). Southern Oscillation extremes reconstructed from tree rings of the Sierra Madre Occidental and southern Great Plains. *Journal of Climate*, 6(1), 129-140. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0129:SOERFT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0129:SOERFT>2.0.CO;2)
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., ... & Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2)
- Stokes, M. A. y T. L. Smiley. (1996). An introduction to the tree-ring dating. The University of Arizona Press. USA. 73.
- Suzan, H. y M. Franco. (1981). Estudios dendrocronológicos en México en poblaciones de *Pinus hartwegii*. En: Memorias del VII Congreso Mexicano de Botánica, 277 – 278.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Villanueva D. J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D14), ACL-6. <https://doi.org/10.1029/2001JD000851>
- Tomazello F, M., Botosso, P. C., & Lisi, C. S. (2000). Potencialidade da família Meliaceae par dendrocronología em regiões tropicais e subtropicais. *Dendrocronología en América Latina*, 381-431.
- Trenberth, Kevin, Zhang, Rong y personal del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (Eds). Última modificación el 5 de junio de 2021. "La guía de datos climáticos: Oscilación multidecenal del Atlántico (AMO)". Obtenido de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atlantic-multi-decadal-oscillation-amo>.
- Vargas M. F. (1997). Compendio de árboles históricos y notables de México. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México, D.F, México. 52 p.
- Vander W. S. B. (1992). The Role of Animals in Dispersing a " Wind-Dispersed" Pine. *Ecology*, 73(2), 614-621. <https://doi.org/10.2307/1940767>
- Vicente, S. S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente, S. S. M., Beguería, S., Lorenzo, L. J., Camarero, J. J., López, M. J. I., Azorín, M. C., ... & Sánchez, L. A. (2012a). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8332>
- Vicente, S. S. M., Zouber, A., Lasanta, T., & Pueyo, Y. (2012b). Dryness is accelerating degradation of vulnerable shrublands in semiarid

- Mediterranean environments. *Ecological Monographs*, 82(4), 407-428.
<https://doi.org/10.1890/11-2164.1>
- Villanueva, D. J. & McPherson, G. R. (1995). Forest stand structure in mountains of Sonora, México and New México, USA. In: DeBano, L. F., P. E. Ffolliott, A. Ortega-Rubio, G. J. Gottfried, R. H. Hamre, and C. E. Edminster (Tech. Coord.). *Biodiversity and Management of the Madrean Archipelago: The Sky Islands of the Southwestern United States and Northern Mexico*. USDA-Forest Service, General Technical Report RM-GTR-264. Pp. 416-423.
- Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Stahle, W., Therrel, M., Cleaveland, M., & Sánchez. (2004). Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México. Gómez Palacio, Durango. INIFAP CENID-RASPA.
- Villanueva, D. J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano, P. J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo O. E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1), 117-131. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-006-9144-0>
- Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Cerano, P. J., Estrada, Á. J., & Sánchez, C. I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia forestal en México*, 34(105), 37-69. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140535862009000100003&script=sci_abstract&tlng=en
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Rosales, M. S., Arrocena, L. J. C., Stahle, D. W., Ruiz, C., J. A., & Martínez, S. A. R. (2014). Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca alta del Río Mezquital, Durango. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(SPE10), 1897-1912. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014001401897
- Villanueva D. J., Cerano P. J., Vázquez S. L, Stahle, P. D., Fulé, L.L. Yocom, O. F. R. & Ruiz C. J., (2015). Red dendrocronológica de pino de altura (*Pinus hartwegii*Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Boletín del Instituto de Geografía* 86: 5-14.
- Villanueva D. J., Estrada A. J. & Martínez S. A., (2017). El Monzón de Norteamérica y su influencia en la variabilidad hidroclimática de la cuenca alta del río Nazas. Folleto Técnico No. 42, ISBN: 978-607-37-0836-4. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango. 23 p.
- Villanueva D. J., Castruita E. L., Martínez S. A., Loera C. R., & Estrada A. J. (2020). Variabilidad hidroclimática del suroeste de Chihuahua inferida con anillos de crecimiento de coníferas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 26 (3), 373-389.

- Wang, C., Deser, C., Yu, J. Y., DiNezio, P., & Clement, A. (2017). El Niño and southern oscillation (ENSO): a review. *Coral reefs of the eastern tropical Pacific*, 85-106. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-7499-4_4.
- Williams, C. G. (2008). Selfed embryo death in *Pinus taeda*: a phenotypic profile. *New Phytologist*, 178(1), 210-222. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02359.x>
- Zhang, Y., J. Wallace, & D. Battisti, (1997). ENSO-like interdecadal variability: 1900–93. *J. Climate*, 10, 1004–1020.

CAPITULO II

EVENTOS EXTREMOS HIDROCLIMÁTICOS EN LA CUENCA DEL RÍO PIAXTLA, SINALOA, MÉXICO

RESUMEN

Introducción: El análisis de la variabilidad climática anual e interanual mediante anillos de crecimiento, permite determinar la frecuencia de eventos extremos y sus tendencias en períodos más allá de los registros climáticos disponibles.

Objetivo: Reconstruir la precipitación estacional invierno-primavera en la cuenca del río Piaxtla, mediante series de crecimiento de *Pinus leiophylla*.

Materiales y métodos: Incrementos radiales se obtuvieron de *P. leiophylla* y se dataron con técnicas dendrocronológicas convencionales. Se determinó la respuesta climática de la especie y desarrolló una reconstrucción estacional de lluvia.

Resultados y discusión: El crecimiento anual de esta especie mostró influencia significativa de la precipitación invierno-primavera, por la lluvia estacional octubre-abril ($r = 0.71$; $p < 0.01$). Esta información permitió reconstruir el período 1850-2020 de precipitación para la región; así mismo, se identificó una influencia significativa ($r = 0.42$; $p < 0.01$) del Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), presentando frecuencias entre 1 a 4 años. Se determinó que la serie de anillo total explica alrededor del 50% de la variación estacional y se detectó una estrecha relación entre la madera temprana e índices de sequía del mismo período, lo que implica que el tamaño de esta banda de crecimiento, refleja en cierta medida el balance de humedad de este período.

Conclusión: La información generada favorece el entendimiento de las fluctuaciones interanuales y multianuales de la precipitación en esta región e identifican eventos hidroclimáticos extremos ocurridos en los últimos 171 años.

Palabras clave: SMO; dendroclimatología; índice de sequía; variabilidad climática; ENSO.

4. INTRODUCCIÓN

La Sierra Madre Occidental (SMO) presenta condiciones ecológicas idóneas que favorecen una alta riqueza en biodiversidad y producción de recursos hídricos, como es el caso de la cuenca del Río Piaxtla. Esta región hidrológica provee de una diversidad de servicios ambientales, entre los que se encuentran la captura de carbono y la captación y filtración de agua (Santiago et al., 2015). Las acciones del ser humano, han modificado la variación natural del clima, repercutiendo negativamente en la provisión de servicios ambientales, que son esenciales para el bienestar de la humanidad (Thom & Seidl, 2016); sin embargo, la demanda de estos servicios ambientales se ha incrementado en función a una población cada vez mayor (CONAGUA, 2019).

Derivado de la variación climática es importante estudiar el comportamiento histórico para cuantificar y analizar su comportamiento pasado, sus cambios actuales y tendencias que se puedan presentar en un futuro (Babst et al., 2018). Esto constituye una acción difícil de realizar, especialmente cuando se tiene una escasa provisión de registros climáticos instrumentales, así como su limitación en tiempo y calidad; lo que dificulta su uso para el análisis histórico de la variabilidad climática en México y sus tendencias potenciales (Villanueva et al., 2009). Derivado de lo anterior, los anillos de los árboles son empleados como una fuente indirecta o “proxy”, permitiendo analizar la variabilidad histórica del clima por siglos o milenios (Bradley, 1999).

México es considerado como uno de los principales países de Latinoamérica con mayor potencial en investigación dendrocronológica, debido a su alta diversidad climática y biodiversidad (Villanueva et al., 2003). Sin embargo, una de las especies en la que dichos estudios han sido muy limitados es *Pinus leiophylla* Schl. & Cham., aun y cuando la especie presenta bandas de crecimiento bien definidas.

Lo anterior, constituye una oportunidad para expandir conocimiento en este tema y desarrollar estudios que definan con mayor claridad eventos hidroclimáticos extremos y sus posibles tendencias, ayudando a los tomadores de decisiones a establecer planes de manejo de los recursos hídricos con fines de mitigación, fundamentados con base a períodos críticos y prolongados de baja disponibilidad hídrica, problemas que se pueden magnificar en el futuro, detonado por el cambio climático o acciones antropogénicas (Villanueva et al., 2007).

De esta manera, el objetivo de la presente investigación fue desarrollar una serie dendrocronológica de *P.leiophylla*, determinar la función de respuesta a variables hidroclimáticas, generar una reconstrucción de precipitación estacional y analizar la influencia de índices de sequía y de fenómenos circulatorios atmosféricos en su variabilidad a través del tiempo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del área de estudio

Poblaciones de bosque mixto de coníferas con presencia de *P. leiophylla* se ubicaron en dos sitios del municipio de San Dimas, localizado en la Sierra Madre Occidental, en la porción oeste del estado de Durango (Figura 5). Los sitios seleccionados se identificaron como San José de Miravalles y Vencedores, el primero de ellos ubicado en las coordenadas geográficas 24°18'24.6" latitud norte, 105°23'24.1" longitud oeste a una elevación de 2500 msnm y el segundo en las coordenadas 24°24'37.9" latitud norte, 105°45'21.8" longitud oeste, a una elevación de 2470 msnm (INEGI, 2004).

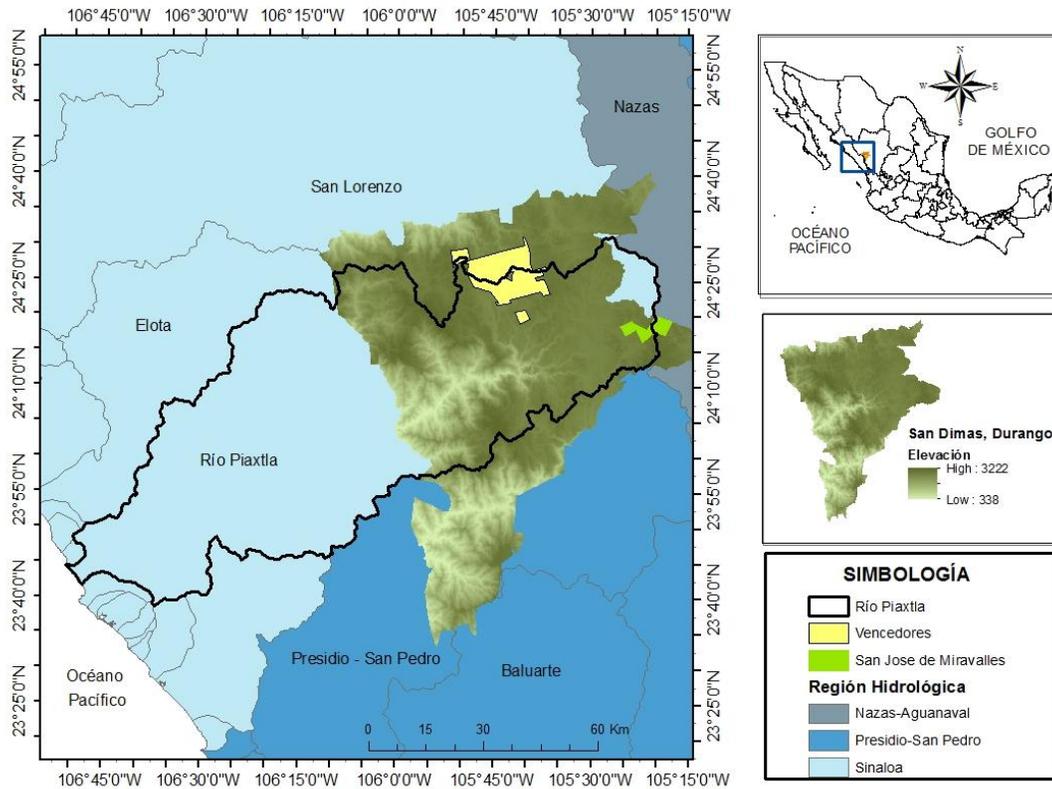


Figura 5. Ubicación geográfica de los sitios de estudio en el municipio de San Dimas, Durango. INEGI (2018).

El clima dominante del área se clasifica como semifrio subhúmedo Cb (w2) con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5 a 12°C y una mínima del mes más frío de -3°C, la temperatura del mes más cálido es de 22°C. La precipitación en el mes más seco es menor a 40 mm, con lluvias predominantes de verano y lluvia invernal de 5.0 a 10.2% del total anual. La precipitación media anual para los sitios San José de Miravalles y Vencedores es de 800 a 1000 y de 1200 a 1500 mm, respectivamente (García, 2004; INEGI, 2021).

Dadas las características de los sitios, los suelos dominantes son de clase litosol y regosol éurico; distinguidos por ser suelos someros de fertilidad variable, principalmente localizados a pie de las sierras, conocidos por sus condiciones topográficas y pobre desarrollo (INEGI, 2004).

Los sitios se localizan en la Región Hidrológica 10 (Sinaloa), dentro de la cuenca exorreica del Río Piaxtla (SEMARNAT, 2013). La vegetación más representativa es el bosque de pino-encino y de *Juniperus*. Las especies de pino más comunes son: *Pinus cooperi* C.E. Blanco, *Pinus durangensis* Martínez, *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl & Cham, *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl & Cham, *Pinus engelmannii* Carr, *Pinus strobiformis* Engelm y *Pinus lumholtzii* B. L. Rob. & Fernald (Chávez et al., 2017; INEGI, 2021). Los rodales de *P. durangensis* y *P. teocote*, se encuentran asociados con *Pinus cooperi* var. *ornelasi* y *P. leiophylla*. (Domínguez et al., 2018).

5.2. Muestreo dendrocronológico

El muestreo selectivo, consideró arbolado vivo, secciones transversales de arbolado muerto y de tocones de aprovechamientos previos. Los núcleos de crecimiento se obtuvieron de árboles vivos en pie empleando taladro de Pressler de dimensiones variables (Figura 6 a). Se seleccionaron especímenes maduros de *P. leiophylla* con características de longevidad y ubicados en sitios donde su crecimiento dependiera exclusivamente del agua de lluvia, lo cual permite maximizar la señal climática y minimizar el ruido debido a factores ajenos al clima (Fritts, 2012; Cerano et al., 2022).

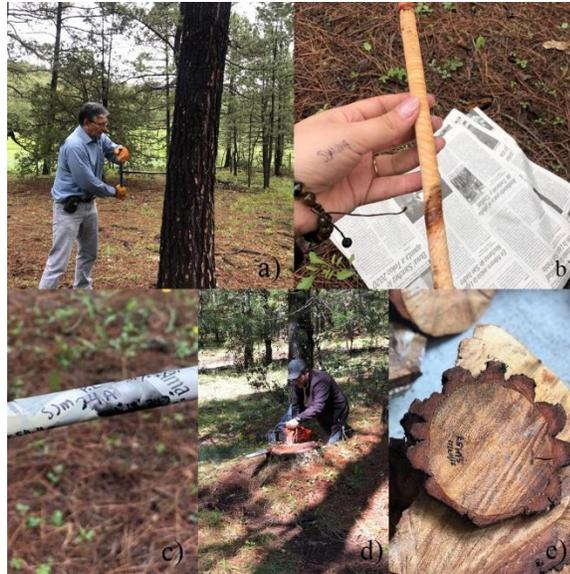


Figura 6. a) Extracción de muestras con taladro de Pressler, b) Preparación del núcleo de crecimiento en papel periódico, c) Rotulado de núcleos de crecimiento, d) Corte en sección transversal con apoyo de motosierra, e) Rotulado de rodajas para su identificación en laboratorio.

Los núcleos de crecimiento se envolvieron en papel periódico acorde al diámetro interno empleado (12.0 mm) (Figura 6 b) o se insertaron en popotes de plástico para 5.1 mm. Ambos métodos se utilizaron para prevenir fragmentación o deformación durante el trabajo de campo. Las secciones transversales se obtuvieron con apoyo de una motosierra (Figura 6 d) y posteriormente, se rotularon ambas extracciones con la clave del sitio, VEN para Vencedores y SJM para San José de Miravalles, número de muestra (01... n), y muestras por árbol (A, B, C...n) (Figura 6 c, e), así como fecha de colecta, coordenadas del árbol (latitud, longitud), elevación (m), diámetro de fuste (cm) y condición del árbol en función a su vigor y presencia de daños adicionales como cicatrices o daños provocados por incendios, presencia de plagas o daños mecánicos por efecto de aprovechamientos previos. Para evitar dañar las muestras durante el proceso de muestreo y durante su traslado a laboratorio, estas se colocaron en tubos de plástico.

5.3. Preparación y análisis de muestras en el laboratorio

Las muestras obtenidas en campo, se procesaron en el Laboratorio Nacional de Dendrocronología del INIFAP CENID RASPA; estas se secaron a temperatura ambiente; posteriormente, los núcleos de crecimiento se montaron en molduras de madera uniéndolas con pegamento y ajustándolas con masking tape (Figura 7a).

El montado de las muestras se realizó de tal manera que, las traqueidas se observaran en una posición perpendicular a los anillos de crecimiento (Figura 7b). Una mala orientación de las traqueidas hace que los crecimientos anuales se observen difusos y no se distinga con claridad la terminación del crecimiento anual. Para el caso de las secciones transversales (Figura 7c) o rodajas seccionadas, estas se restauraron al unir porciones separadas y aquellas muy endebles, se montaron en láminas de triplay para estabilizarlas y facilitar su manejo durante el fechado.



Figura 7. a) Montado de núcleos de crecimiento, b) posición de traqueidas y c) rodajas en proceso de secado.

Los núcleos de crecimiento ya montados y las secciones transversales estabilizadas se pulieron con lijas de diferente grano (grueso a fino) en secuencias de 120,220, 240 y finalmente se terminó manualmente con lija muy fina (grano 1000 a 1200), lo cual permitió visualizar con mayor nitidez los anillos de crecimiento (Cerano et al., 2022). Posterior a la preparación de las muestras, se realizó un conteo de los anillos de crecimiento con el apoyo de un estereoscopio binocular Olympus Corporation con resolución de 10X.

Para el proceso de conteo, se siguió el método convencional propuesto por Stokes y Smiley (1996), donde cada década se marcó con un punto, cada 50 años con dos puntos y cada 100 años con tres puntos. La presencia de anillos falsos se identificó con una línea diagonal, anillos perdidos o micro anillos con dos puntos en diagonal entre el anillo anterior y posterior para facilitar su ubicación, conteo y medición. La identificación de anillos falsos y perdidos fue posible definirlos mediante el fechado cruzado, el cual consiste en comparar los crecimientos de núcleos procedentes del mismo árbol o de otros árboles muestreados en el sitio, donde se pueden detectar los anillos perdidos, con las cuales se realiza la corrección; lo mismo sucede con los anillos falsos, que en algunas muestras se detectan como dos anillos y permitiendo su correcta identificación en las muestras problema.

5.4. Fechado y medición

La medición de anillo total, madera temprana y tardía se realizó a través del sistema de medición VELMEX de fase deslizable con una resolución de 0.001 mm (Figura 8). El sistema se compone de un estereo-microscopio y una platina de fase deslizable, conectada a un micrómetro y a una computadora con el software de medición (MeasureJ2X para Windows) (Robinson & Evans, 1980).



Figura 8. Sistema de medición VELMEX, utilizando en el proceso de medición de las muestras dendrocronológicas.

Para el proceso de medición, se inició con el anillo más interno y se terminó con el último anillo completo, justo pegado a la corteza; si el último anillo aún está en proceso de desarrollo, no se contabiliza (Cerano et al., 2022). El sistema de medición genera tres bases de datos, una de anillo total (RW.Dat), otra de madera temprana (EW.Dat) y una más de madera tardía (LW.Dat).

5.5. Análisis de datos

La base de datos de medición generada para los sitios de muestreo (San José de Miravalles y Vencedores), se corrió en el programa COFECHA para analizar su calidad de fechado (Holmes, 1983). Para identificar problemas de fechado, el programa realiza correlaciones en segmentos de 50 años, con traslape entre sub-periodos de 25 años. De esta manera, el programa identifica problemas de desfaseamiento.

Una vez identificados los problemas de datado, se procedió a corregir los errores hasta obtener un fechado correcto. La base de datos corregida y datada correctamente, se corrió en el programa ARSTAN, el cual normaliza las series de crecimiento mediante el proceso de estandarización, cuyo objetivo es eliminar tendencias biológicas y otros ruidos ajenos a la influencia del clima.

Este proceso, se realiza al ajustar curvas exponenciales negativas o líneas rectas con tendencia positiva o negativa y una segunda estandarización realizada con curvas flexibles que preservan 50% de la varianza (Cook & Holmes, 1984).

Los índices dendrocronológicos se obtuvieron al dividir el valor de ancho de anillo entre el valor obtenido de la curva de ajuste, creando de esta manera tres series normalizadas, conocidas como estándar, residual y arstan, con una media alrededor de 1.0 y varianza homogénea (Fritts, 2012). El archivo con los índices dendrocronológicos se procesó en el programa FMT de la Librería de Programas Dendrocronológicos (DPL, por sus siglas en inglés) para manejarlos en dos columnas (año e índice) y realizar comparaciones posteriores con variables climáticas. A la serie dendrocronológica se le ajustó una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia (Cook & Peters, 1981).

El potencial dendrocronológico de las series generadas de *P. leiophylla*, se determinó con base a los valores de intercorrelación entre series (R_{bar}) (Cook & Kairiukstis, 2013), y a través de la Señal Expresada de la Población (EPS, por sus siglas en inglés), donde un $EPS > 0.85$ se considera confiable con fines de reconstrucción climática (Wigley et al., 1984).

5.6. Obtención de datos climáticos

Los datos de precipitación y temperatura (mínima y máxima) fueron obtenidos del software ClimateNA versión 6.40 (Wang *et al.*, 2012 y Wang *et al.*, 2016) para las coordenadas 24.3088° latitud norte y -105.3981° longitud oeste. El software incluye información histórica de diversas variables (precipitación; temperatura máxima mensual, temperatura mínima mensual y temperatura media mensual; radiación solar) bajo un esquema de reescalado a través del modelo de elevación para el período 1901–2019.

5.7. Obtención de datos hidrométricos

Los datos hidrométricos se obtuvieron de la página oficial de CONAGUA, a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) mediante la actualización del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional (<http://hidrosuperf.imta.mx/bandas/>). En esta red, se registra el nivel de agua y el gasto (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana. La red incluye 2,070 estaciones hidrométricas, las cuales son el resultado de una depuración al catálogo BANDAS hecho en 2008 por la CONAGUA y el IMTA.

Para este estudio, se seleccionaron los registros de la estación hidrométrica 10111 (Río Piaxtla), que abarca el período 1958-2009 y al cual drena hacia el Pacífico, el agua producida en las cuencas de estudio.

5.8. Índices océano-atmosfera e índices de sequía

Índices de ENSO (3.4 y 3.0 SST), a través del SOI (1951-2021) e índices de AMO, se obtuvieron de la página de la Agencia Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) Earth System Research Laboratory (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>, <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/soi>, <https://psl.noaa.gov/data/correlation/amon.us.long.data>). El índice del PDO del período (1854-2020), se obtuvo del sitio Climate Data Guide (<https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/cmb/ersst/v5/index/ersst.v5.pdo.dat>).

Los registros instrumentales (1901-2012) y reconstruidos (1825-2012) del PDSI, se obtuvieron del Atlas de Sequía para México (<http://drought.memphis.edu/MXDA/Default.aspx>) (Stahle et al., 2016).

De igual manera, el SPI, se obtuvo del Atlas Norteamericano de Precipitación Estandarizada (NASPA, por sus siglas en inglés), tanto instrumental (Dic-Abr, May-Jul, del período- 1892-2016) y reconstruido (Dic-Abr, May-Jul, período- 1825-2016) <http://drought.memphis.edu/NASPA/> (Stahle et al., 2020).

Valores del SPEI de enero a diciembre, periodo 1950-2000, se obtuvieron del Global Drought Monitor (<https://spei.csic.es/map/maps.html#months=1#month=10#year=2021>) (Vicente & Beguería, S., 2012).

5.9. Función de respuesta

El análisis de función de respuesta, entre las series dendrocronológicas de anillo total, madera temprana y tardía con registros climáticos de precipitación y temperatura máxima y mínima y datos hidrométricos, se determinó a través del coeficiente de correlación de Pearson con el software “R studio” y el paquete estadístico Minitab. La relación entre las series dendrocronológicas e índices de ENSO, AMO, PDO e índices de sequía (PDSI, SPI, SPEI), también se generaron mediante este proceso.

El análisis comprendió los últimos 7 meses del año previo y los 12 meses del año actual de crecimiento (19 meses), ya que el desarrollo del anillo anual de los árboles, se relaciona con la disponibilidad hídrica acumulación de nutrientes y reservas de etapas previas, así como los que se liberan durante la estación de crecimiento (Fritts, 2012). Para analizar la respuesta de la madera tardía a la precipitación de verano, generada en parte por NAMS, se eliminó la auto-correlación ejercida por la madera temprana sobre la madera tardía, proceso que consiste en una regresión lineal entre los índices de madera temprana y madera tardía, donde los valores residuales de la regresión, se consideran como “madera tardía pura”, donde la auto-correlación entre la madera temprana y la tardía se ha minimizado (Meko & Baisan, 2001; Griffin et al., 2011).

5.10. Calibración y verificación del modelo

Se generó un modelo de regresión lineal simple con el programa “R studio”, entre los índices dendrocronológicos y los registros de precipitación. La salida del modelo son los datos estacionales de precipitación reconstruida y los índices dendrocronológicos constituyen la variable independiente. El proceso de calibración- verificación, se realizó con la subrutina Verify del DPL, proceso que consiste en verificar el modelo de calibración; para este proceso, el registro total de lluvia se dividió en dos sub-periodos, uno para calibración y otro para verificación, en este proceso, el primer período se utiliza para calibración y el segundo para verificación y posteriormente el proceso se revierte. La verificación del modelo de reconstrucción se fundamenta en varias pruebas estadísticas, entre las que se encuentra la correlación de Pearson, reducción del error, valor de “t”, entre otras (Fritts, 2012).

Aunque este procedimiento se enfoca en el periodo con máxima correlación, la ecuación seleccionada se usa sólo si en el proceso de verificación, la correlación entre variables sigue siendo significativa y si la capacidad de predicción de la ecuación en intervalos fuera de los datos observados es significativa (Cook & Jacoby, 1983; Stahle & Cleaveland, 1992; Woodhouse, 2001).

5.11. Reconstrucción de precipitación

El modelo de reconstrucción de precipitación, se aplicó al período de la cronología con un EPS > 0.85, el cual estadísticamente es confiable para este propósito. Valores superiores a la media reconstruida, se consideraron como años húmedos e inferiores a la media como años secos; valores extremos se definieron como aquellos con una desviación estándar por encima y por debajo de la media, respectivamente.

Los periodos secos y húmedos se verificaron mediante documentos históricos y con reconstrucciones dendroclimáticas previamente realizadas en la región.

6. RESULTADOS

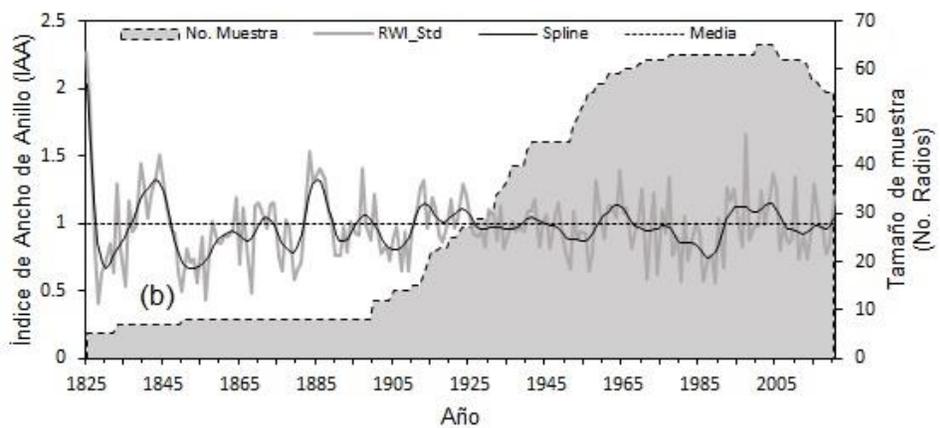
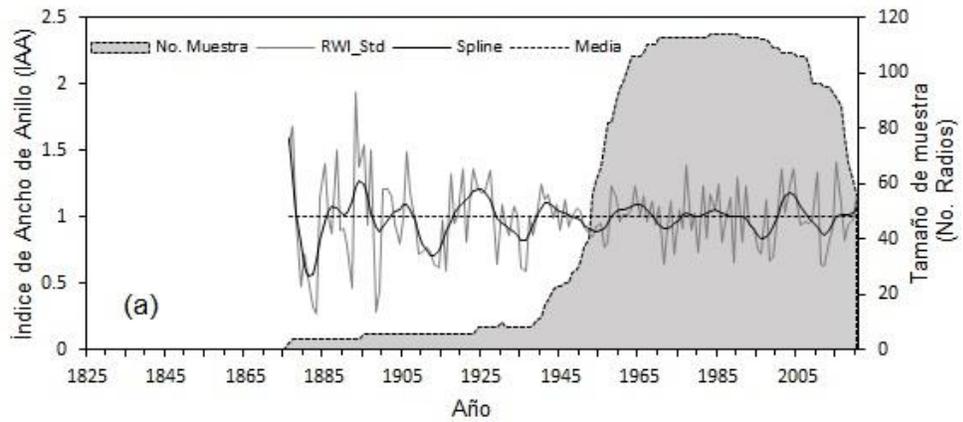
6.1. Desarrollo de cronologías

Se fecharon 184 núcleos de crecimiento obtenidos de 71 especímenes de *P. leiophylla* en dos sitios diferentes: 116 núcleos de 40 árboles (20 árboles vivos y 20 muertos provenientes de tocones) en el ejido San José de Miravalles y 68 núcleos de 31 árboles (12 vivos y 19 muertos) en el ejido Vencedores, municipio de San Dimas, Durango. La correlación entre las series fue significativa con base al criterio establecido por COFECHA (Holmes, 1983), que determina como mínima correlación significativa entre muestras de 0.328 ($p < 0.01$). Con base a lo anterior, la especie indica potencial con fines de reconstrucción dendroclimática (Cuadro 1).

Se generaron cronologías individuales (anillo total, madera temprana y madera tardía) para cada sitio muestreado y una adicional al combinar las muestras de ambos sitios. La extensión de las series dendrocronológicas fue de 196 años (1825-2020) para el sitio Vencedores (Figura 9b), 145 años (1876-2020) para el sitio San José de Miravalles (Figura 9a) y 196 años (1825-2020) para la serie combinada de ambos sitios (Figura 9c).

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de las cronologías de anillo total de los sitios (Vencedores, San José de Miravalles y una combinada al integrar los dos sitios).

Especie	Sitio	Intercorrelación entre series	Periodo de la cronología (años)	Sensibilidad media	Tamaño de muestra (No. radios)
<i>Pinus leiophylla</i>	Vencedores	0.54	1825-2020 (196)	0.37	68
	San José de Miravalles	0.61	1876-2020 (145)	0.35	116
	Combinada	0.55	1825-2020 (196)	0.36	184



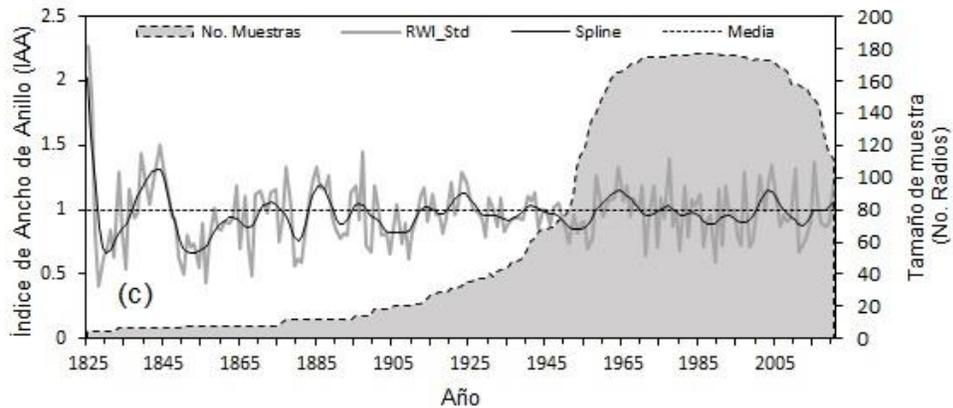


Figura 9. Series dendrocronológicas de anillo total versión estándar de *P. leiophylla* desarrolladas en los sitios San José de Miravalles (a), Vencedores (b) y una integrada al combinar ambos sitios (c).

6.2. Relaciones entre variables climáticas y series dendrocronológicas

Los registros de precipitación acumulada estacional de octubre-diciembre del año previo al crecimiento y enero-abril del año actual de crecimiento, mostraron una relación positiva con la cronología integrada de madera temprana y de anillo total de los sitios Vencedores y San José de Miravalles (Figura 10).

La relación entre la cronología integrada de anillo total y de madera temprana y los registros de temperatura promedio máxima mensual y promedio mínimo mensual fueron negativas, sin embargo, respecto a la temperatura promedio máxima mensual, enero- abril del año actual de crecimiento, mostraron correlaciones bajas con el RWI de la cronología integrada ($r = -0.44$, -0.43 , $p < 0.01$, respectivamente); mientras que con la EWI fue de -0.46 y de -0.45 ($p < 0.01$), respectivamente.

Por otra parte, la asociación con la cronología LWI mostró un valor -0.26 y -0.25 , ($p < 0.01$) para los meses indicados, respectivamente. Se obtuvo una correlación positiva y no significativa ($p > 0.05$) entre temperatura máxima, RWI y LWI de julio a diciembre del año actual de crecimiento. Con respecto a temperatura mínima mensual, también se obtuvo correlaciones negativas, con las series RWI y EWI para el mes de marzo del año actual de crecimiento ($r = -0.23$, -0.24 ; $p <$

0.01, respectivamente). Así mismo, la temperatura mínima de septiembre, noviembre y diciembre del año actual de crecimiento presentó una relación positiva, pero no significativa ($p > 0.05$) (Figura 10).

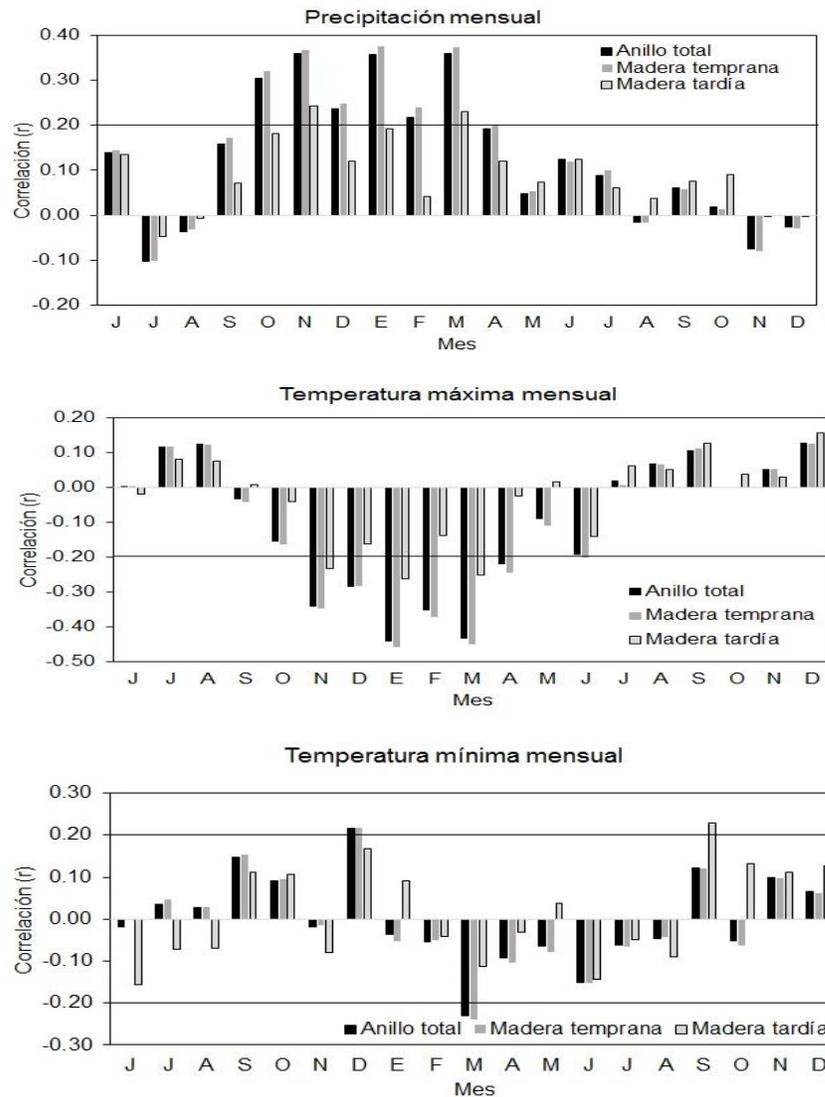


Figura 10. Análisis de la asociación entre variables climáticas (precipitación acumulada mensual, temperatura promedio máxima mensual y temperatura promedio mínima mensual) y la cronología integrada de anillo total y de madera temprana y tardía, versión estándar. Donde $p < 0.01$.

La correlación entre las cronologías integradas de madera temprana, anillo total y precipitación de enero fue de 0.38 y de 0.36 ($p < 0.01$), respectivamente; no

obstante que, la precipitación acumulada del periodo octubre-abril, mostró una mayor correlación con madera temprana y con anillo total ($r = 0.71, 0.70$; $p < 0.01$, respectivamente).

Por lo anterior, se consideró que estas cronologías poseen mayor potencial con fines de reconstrucción de lluvia (Figura 11). La cronología de madera tardía indico una correlación de 0.510 ($p < 0.01$), para el mismo periodo de comparación.

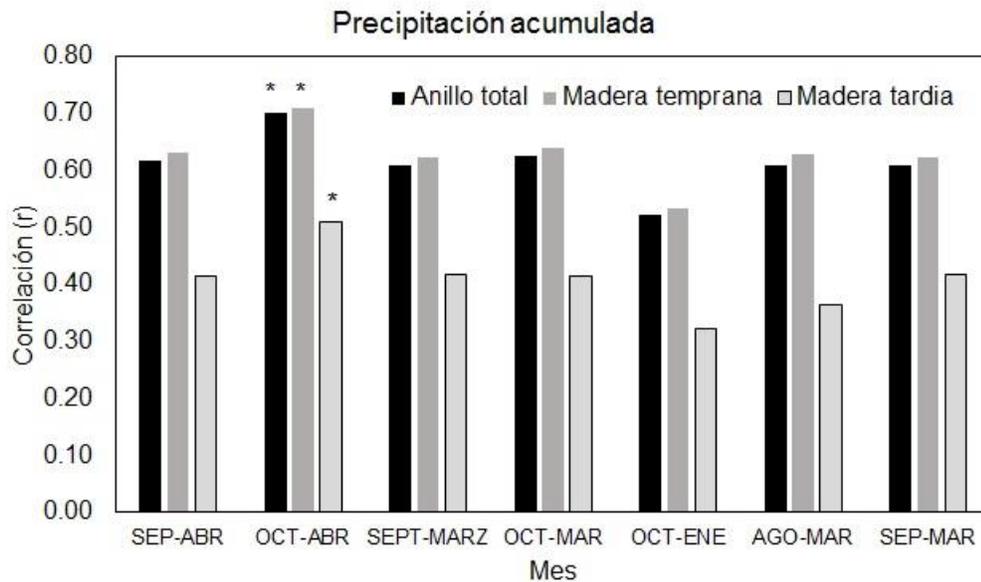


Figura 11. Valores de correlación entre la precipitación acumulada estacional y la cronología integrada de anillo total (RWI), madera temprana (EWI) y madera tardía (LWI), el mejor período fue octubre-abril para las tres cronologías. Donde ** = $p < 0.01$.

En este tenor, la variable climática que mostró una mayor influencia en el incremento radial de *P. leiophylla* fue la precipitación. La serie integrada de madera temprana (EWI) indica el mayor potencial para reconstruir la variabilidad de la lluvia estacional octubre-abril, donde la cronología explica 50% ($r = 0.71$, $p < 0.01$) de la variabilidad estacional.

6.3. Relación entre datos hidrométricos y la serie integrada de anillo total

Con base a los registros hidrométricos disponibles en la zona, se realizó un análisis de correlación entre el caudal registrado de la estación hidrométrica Río Piaxtla (estación 10111) y los índices de anillo total y madera temprana versión estándar de la serie integrada.

La mayor correlación fue similar al utilizar las series RWI y EWI y el caudal medio acumulado noviembre-agosto del período 1959-2009, con una correlación de 0.55 ($p < 0.01$) (Figura 12). Al normalizar los registros hidrométricos con base al logaritmo base 10, se incrementó la correlación a 0.59 ($p < 0.01$).

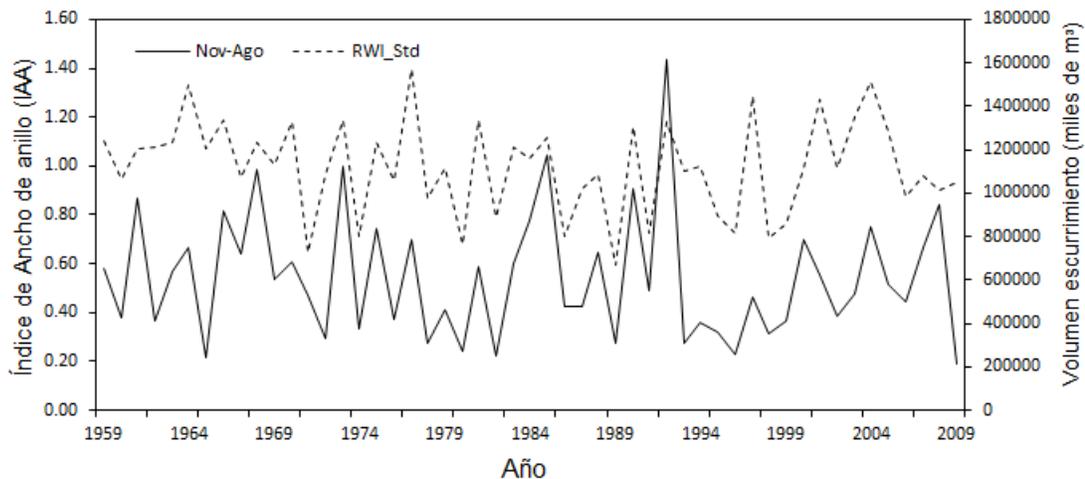


Figura 12. Correlación entre el volumen de escurrimiento acumulado noviembre-agosto del periodo 1959-2009, estación hidrométrica Río Piaxtla y el índice de ancho anillo de la serie integrada en su versión estándar.

La relación entre los registros hidrométricos y la serie de anillo total del sitio San José de Miravalles mostró una mayor correlación en el período estacional noviembre-agosto ($r = 0.64$, $p < 0.01$, 1959-2009) (Figura 13), lo que indica que el crecimiento radial de la especie explica el caudal que se genera durante el invierno, primavera y verano en esta cuenca hidrológica.

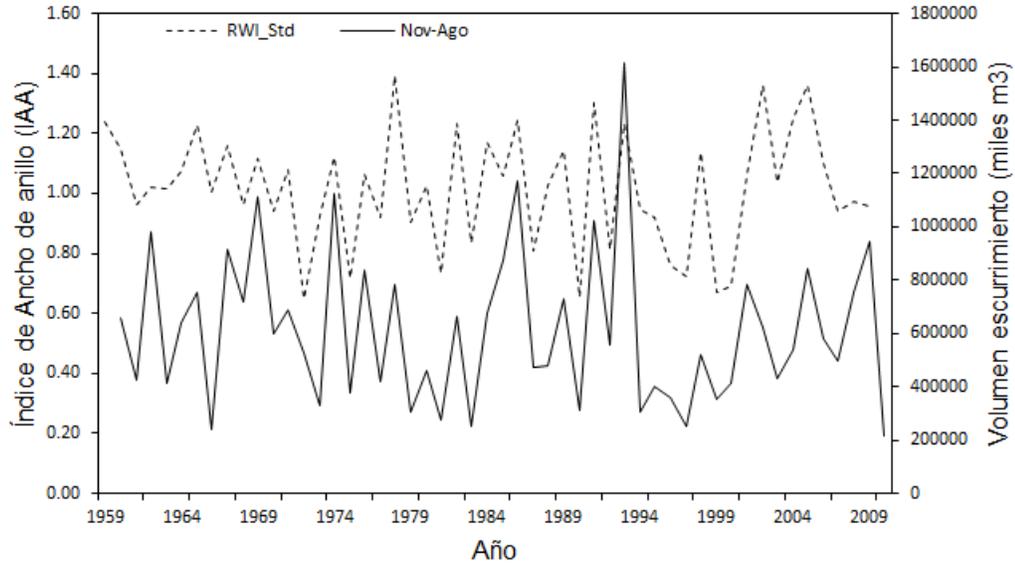


Figura 13. Correlación entre volumen de escurrimiento acumulado de noviembre a agosto, periodo 1959-2009 y el índice de ancho de anillo del sitio San José de Miravalles, Durango.

6.4. Relación entre los registros de precipitación y de gastos hidrométricos

Los datos instrumentales (1959-2009) disponibles de precipitación estacional (octubre-abril) y el volumen de caudal medio (noviembre-agosto) correlacionaron significativamente con un valor de 0.59 ($p < 0.01$), la correlación se incrementó a 0.64 ($p < 0.01$) de 1959 a 2000, lo que indica que la precipitación estacional octubre-abril, explica hasta en 41% el volumen de caudal medio registrado en el período noviembre-agosto y que determina un mayor incremento radial de la especie en estudio.

6.5. Índices de sequía

La comparación entre los registros del PDSI reconstruido para la república mexicana y la cronología estándar de madera temprana de la serie integrada, produjo una correlación de 0.54 ($p < 0.01$, 1901-2012), para el período junio-agosto; mientras que con los valores de PDSI reconstruido de América del Norte junio-agosto fue de 0.52, ($p < 0.01$, 1901-2005) (Figura 14); así mismo, se encontró una correlación significativa entre el SPI reconstruido (1825-2016) y la

versión estándar de la cronología integrada de madera temprana para los meses de diciembre a abril ($r = 0.36$, $p < 0.01$), pero disminuyó en el periodo mayo-julio ($r = 0.228$, $p < 0.01$).

Por otra parte, el valor del SPEI enero-diciembre del periodo 1950-2020 con la cronología de madera temprana, versión estándar de la serie integrada, no mostró asociación significativa ($r = 0.14$, $p > 0.05$ (Cuadro 2)).

Cuadro 2. Asociación determinada entre índices de sequía y la cronología EWI de la serie integrada

Índice	Período (Años)	Correlación (r)
SPEI		
Ene-dic	1950-2020 (70)	0.14 ($p > 0.05$)
PDSI		
MEXDA Rec jun-ago	1901-2012 (111)	0.54 ($p < 0.01$)
NADA Rec jun-ago	1901-2005 (104)	0.52 ($p < 0.01$)
SPI		
Rec dic-abr	1825-2016 (191)	0.36 ($p < 0.01$)
Rec may-jul	1825-2016 (191)	0.23 ($p < 0.01$)
Inst dic-abr	1892-2016 (124)	0.34 ($p < 0.01$)
Inst may-jul	1892-2016 (124)	0.14 ($p > 0.05$)

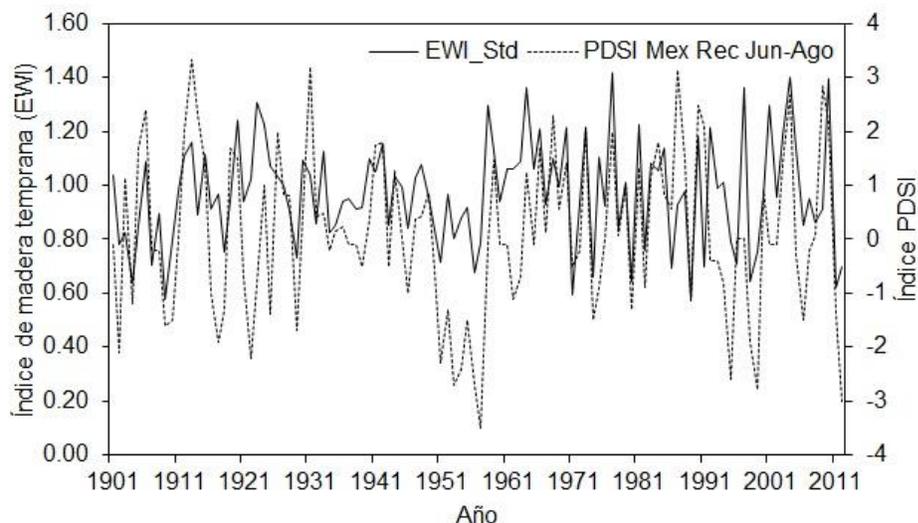


Figura 14. Relación entre el Índice de Sequía de Palmer (PDSI) junio-agosto y el Índice de madera temprana (EWI) de la serie integrada versión estándar.

6.6 Madera tardía ajustada

La asociación entre la cronología ajustada de madera tardía versión residual y la precipitación de junio y julio indicó correlaciones positivas, pero no significativas (0.13, 0.11, $p > 0.05$, respectivamente). Para la cronología de madera tardía ajustada, del sitio San José Miravalles y la precipitación de agosto, mostró una correlación de 0.21 ($p < 0.01$); no así, para el sitio Vencedores que mostró correlaciones no significativas ($p > 0.05$).

En este tenor, los resultados no mostraron mejora en la correlación con la precipitación de verano, por lo que fue descartado para el desarrollo de análisis posteriores.

6.7 Relación entre precipitación estacional e índice de madera temprana

El registro de precipitación utilizada en este estudio se extiende de 1988 a 2019 (32 años), donde la mejor correlación ($r = 0.71$, $p < 0.01$), se obtuvo con la cronología versión estándar de madera temprana y la precipitación del período estacional octubre-abril.

Lo que indica potencial para desarrollar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad en la longitud de la serie dendrocronológica con un EPS > 0.85 (Figura 15).

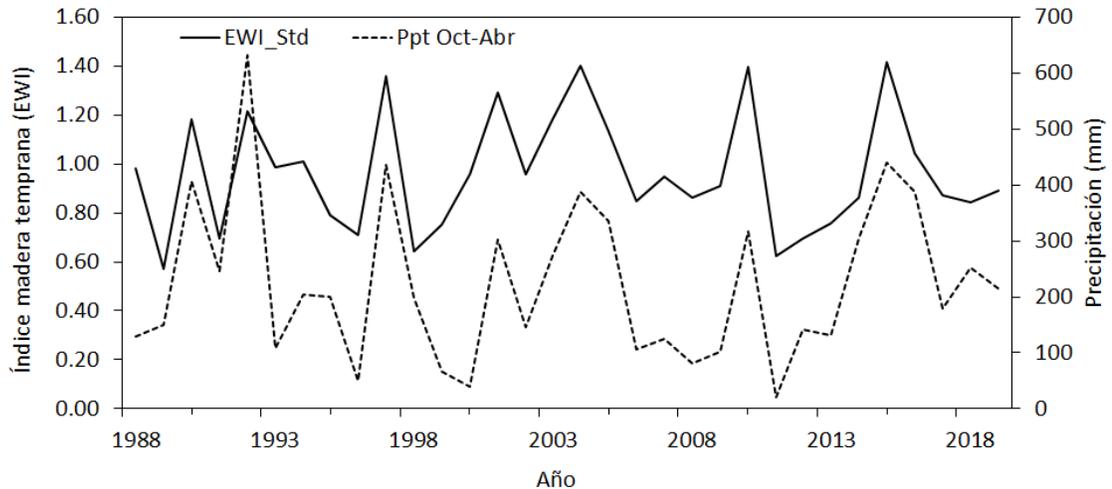


Figura 15. Asociación entre la precipitación estacional octubre-abril y el índice de la cronología integrada de madera temprana (EWI) versión estándar, período 1988-2019. La correlación entre ambas variables fue de 0.71 ($p < 0.01$).

El modelo de regresión lineal generado para la reconstrucción fue el siguiente:

$$Y = 417.59x - 179.76$$

Donde:

Y= Valor de precipitación estacional reconstruida de octubre del año previo a abril del año actual de crecimiento (mm)

X= Índice de madera temprana de la cronología integrada versión estándar para un año en particular

Posterior a ello se realizó la calibración y verificación del modelo para corroborar si los datos obtenidos son significativos.

6.8 Calibración y verificación del modelo

La calibración (sub-periodo 1988-2003) mostró una correlación significativa ($r = 0.64$, $p < 0.01$) al igual que en el sub-período utilizado para verificar el modelo (2004-2019), con una correlación de 0.80 ($p < 0.01$) (Figura 16), donde los parámetros estadísticos de ambas pruebas fueron significativos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores estadísticos del modelo de calibración y verificación en la precipitación estacional reconstruida de octubre abril registrado en el periodo 1988-2019 (32 años).

Periodo	Correlación (r)	Error estándar	Valor t	Grados de libertad
1988 – 2003 (Calibración)	0.64	.40	3.11	14
2004 – 2019 (Verificación)	0.80	.64	2.65	14

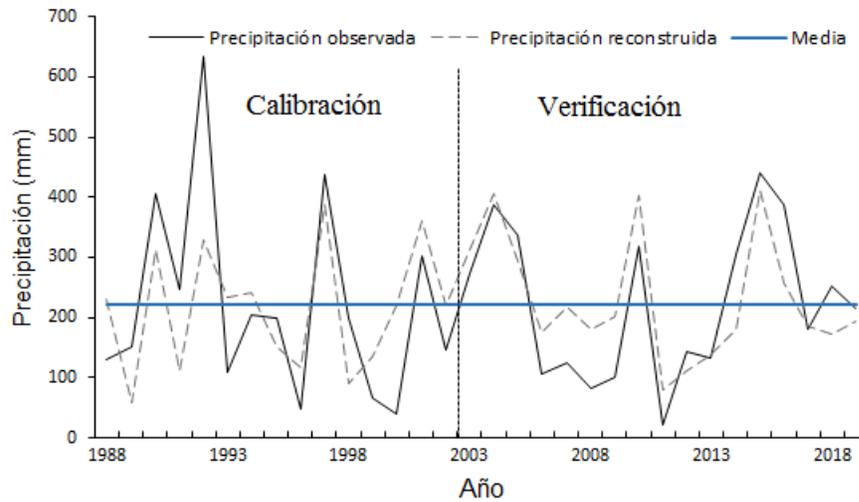


Figura 16. Precipitación estacional reconstruida y observada de octubre-abril y del periodo 1988-2019 (32 años).

6.9 Precipitación reconstruida

La reconstrucción de precipitación octubre-abril, comprendió el período 1850-2020 (171 años), donde presentó un EPS de 0.96 y Rbar total 0.35.

La reconstrucción indica alta variabilidad interanual y multianual para la región de San Dimas, Durango (Figura 17).

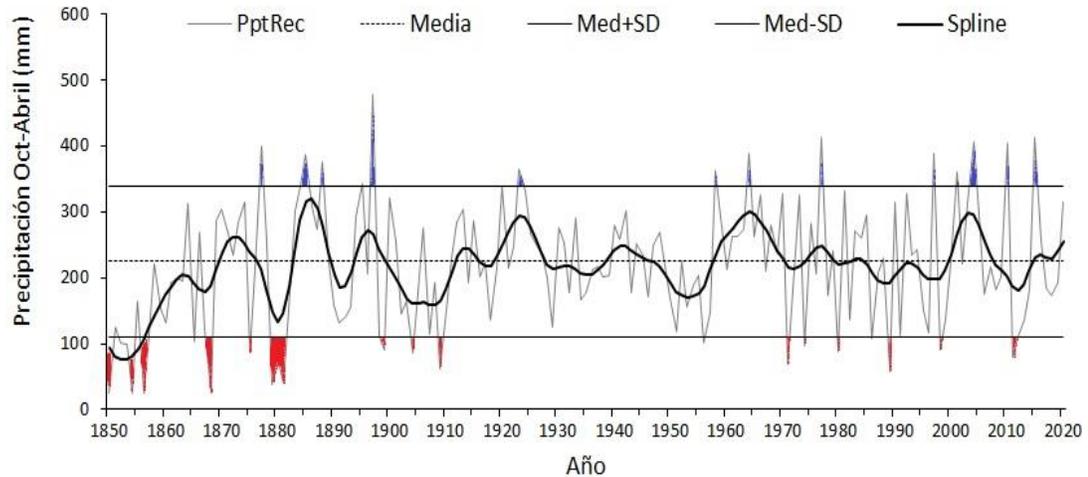


Figura 17. Reconstrucción de precipitación estacional octubre-abril de los últimos 171 años para la región San Dimas, Durango. Valores por encima y por debajo de una desviación estándar con respecto a la media, se consideran eventos extremos, tanto húmedos (períodos resaltados en azul) como secos (períodos resaltados en rojo), respectivamente.

En el período reconstruido se detectaron eventos importantes de sequías extremas en los períodos 1850-1856, 1865-1868, 1875-1879, 1880-1899, 1904-1909, 1956-1971, 1974-1980, 1986-1998 y 1998-2011 (Figura 17). Los eventos secos más extremos corresponden a los años 1850, 1854-1856 y 1868. Así mismo, se detectaron eventos muy húmedos en los periodos 1877, 1884-1885, 1888, 1895, 1897, 1923, 1958, 1964, 1977, 1997, 2001, 2004, 2010 y 2015. En este tenor, los eventos más extremos corresponden a los periodos 1897, 1977 y 2015 (Figura 17).

6.10 Análisis de ondeleta de la serie de precipitación reconstruida

El análisis de ondeleta al asociar la precipitación reconstruida del periodo octubre-abril (Figura 18) permitió observar los periodos en los que las frecuencias dominantes fueron significativas.

De esta manera, las frecuencias de 9 a 14 años (1867-1899), 5 a 7 años (1873-1881), 3 a 4 años (1870-1878), 1 a 4 años (1893-1900), 1 a 3 años (1970-1975),

1 a 2 años (1988-1990), 3 a 4 años (1995-2001) y de 5 a 7 años (2009-2012), se presentaron en los períodos entre paréntesis, los cuales pueden asociarse a la influencia de ENSO, con frecuencias dominantes de 2 a 7 años.

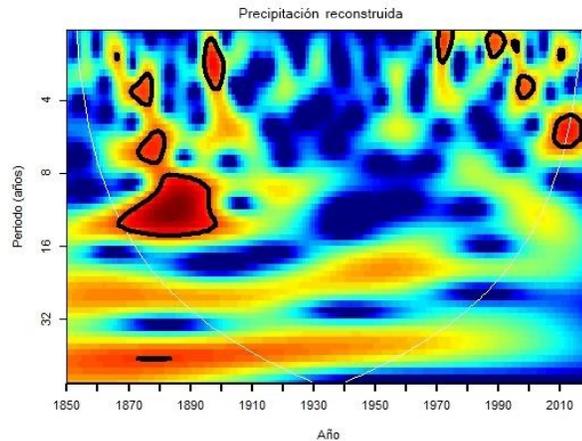


Figura 18. Análisis de ondeleta a nivel anual de la precipitación reconstruida invierno- primavera. Las manchas rojas circunscritas en línea negra señalan períodos significativos atribuidos a la influencia de fenómenos circulatorios como ENSO, que se presentaron en años específicos de la reconstrucción de precipitación.

7. DISCUSIÓN

7.1. Parámetros dendrocronológicos de las series generadas

Con base a las series dendrocronológicas desarrolladas de los sitios San José de Miravalles, Vencedores y la serie integrada con ambos sitios, se determinaron valores de correlación entre series que oscilan de 0.54 a 0.61 ($p < 0.01$) con una sensibilidad media 0.35 a 0.37 (Cuadro 1), lo cual, significa que las series que integran las cronologías estuvieron bien datadas y muestran una respuesta común a la variabilidad del clima e indican potencial para fines de reconstrucción dendroclimática (Grissino, 2001; Fritts, 2012).

Los valores estadísticos de las series generadas de *P. leiophylla* son similares a otras cronologías desarrolladas con especies de coníferas presentes en la Sierra Madre Occidental como *P. durangensis*, *P. lumholtzii* y *Pseudotsuga menziesii*

con valores de correlación de 0.52 a 0.70, las cuales han sido utilizadas con fines de reconstrucción dendroclimática (Cerano et al., 2012; Villanueva et al., 2014; Díaz et al., 2016; Chávez et al., 2017; Villanueva et al., 2018).

7.2. Función de respuesta entre variables climáticas y series dendrocronológicas

La serie integrada de *P. leiophylla* respondió significativamente a la precipitación acumulada del periodo octubre-abril ($r = 0.70$, $p < 0.01$), respuesta similar a la determinada para la mayoría de especies de coníferas presente en la Sierra Madre Occidental (Stahle et al., 1998; Cleaveland et al., 2003; Villanueva et al., 2005; Villanueva et al., 2007; Villanueva et al., 2009; Cerano et al., 2009; Irby et al., 2013; Villanueva et al., 2014; Chávez et al., 2017). Esta respuesta, se atribuye a que la precipitación que ocurre en el período estacional invierno-primavera, por ser de baja intensidad, está sujeta a menor tasa de evaporación y muchas veces, al no superar la tasa de infiltración del suelo, se almacena en su perfil, donde puede ser utilizada al inicio de la estación de crecimiento, particularmente durante la formación de la madera temprana, donde se producen los fotosintatos para el crecimiento radial y longitudinal del árbol (Villanueva et al., 2005; Pallardy, 2010; Villanueva et al., 2009a; Cerano et al., 2009; Fritts, 2012).

El efecto de la temperatura máxima en el crecimiento, se reflejó en una relación negativa con temperatura máxima promedio del periodo estacional enero-marzo (Figura 10). La explicación de esta relación, se fundamenta en un incremento en el déficit de presión de vapor en las acículas (2 a 3 kPa), lo que propicia reducción estomática y cierre total del estoma cuando alcanza 3.5 kPa; situación que repercute en la transpiración y difusión de CO_2 y que a su vez, reduce los fotosintatos indispensables para el crecimiento, una vez que se alcanza temperaturas de 30° C (Leverenz, 1981).

La temperatura mínima en este estudio, mostró un efecto positivo en el incremento radial, lo cual se atribuye a una menor demanda de agua durante el

periodo de crecimiento (Chávez et al., 2017). De forma general, la baja relación que se encontró entre el crecimiento y la temperatura mínima, es indicativo de que esta variable, no ejerce tanta influencia en los procesos fisiológicos como la temperatura media o máxima, aunque la principal variable climática limitante es la precipitación (Stahle et al., 1999; Cleaveland et al., 2003).

7.3. Función de respuesta entre datos hidrométricos y la serie integrada de anillo total

El caudal acumulado del periodo estacional noviembre-agosto de la estación hidrométrica 10111, que registra los volúmenes escurridos de la cuenca del Río Piaxtla, se explica hasta en 35% por la serie de crecimiento de anillo total, lo cual sugiere, que la especie también puede ser utilizada para reconstrucciones de esta índole, como ha sido documentado en reconstrucción hidrométricas desarrolladas en el norte de México, donde la precipitación acumulada invierno-primavera y verano, se relaciona con series dendrocronológicas de madera temprana y de anillo total (Villanueva et al., 2014; Villanueva et al., 2020; Martínez et al., 2020).

Esta información es relevante con fines de manejo sustentable de los recursos hídricos, ya que en las reconstrucciones se pueden identificar frecuencias de períodos húmedos y secos y su tendencia en el tiempo (Villanueva et al., 2014; Martínez et al., 2020).

7.4. Relación entre índices dendrocronológicos de madera temprana y de sequía

La madera temprana que, en la mayoría de las coníferas presentes en los bosques del norte de México, se forma durante la estación de primavera y principios de verano, muestra alta relación con índices de sequía, los cuales se fundamentan en un balance de agua en el suelo, donde los volúmenes de agua

almacenado en el suelo y la velocidad de pérdida mediante el proceso de evapotranspiración como función de temperatura, determinan la intensidad o el grado de sequía (Martin et al., 2008).

La sensibilidad de series dendrocronológicas de madera temprana o de anillo total a índices de sequía en el norte de México ha sido verificado en diversos estudios dendroclimáticos desarrollados en dicha región. Estos estudios han demostrado, incrementos en la temperatura, mostrando una alta sensibilidad a ciertas especies arbóreas. Al existir un aumento considerable en la temperatura, aparejado con decrementos en la precipitación, pone en peligro la estabilidad ecológica de esta y de otras especies de coníferas (Villanueva et al., 2009; Villanueva et al., 2022), por lo que es importante el análisis detallado de estos índices y sus tendencias potenciales en el tiempo (Vicente et al., 2012)

7.5. Función de precipitación reconstruida

La reconstrucción indica el potencial de esta especie para captar la variabilidad interanual y multianual de la lluvia en esta región; es similar o superior al de otras especies de coníferas en la región, con las que se han realizado reconstrucciones de precipitación, algunas de ellas con varios siglos de extensión (Villanueva et al., 2005; Villanueva et al., 2008; Cerano et al., 2009; Villanueva et al., 2009; Constante et al., 2010; Villanueva et al., 2014; Villanueva et al., 2015; Chávez et al., 2017).

La reconstrucción desarrollada detectó la presencia de sequias como la ocurrida en las décadas de 1850 y 1860, que afectaron la producción de alimentos en el estado de Durango y en gran parte del país. Durante el periodo del Porfiriato, se presentaron sequías de alto impacto social y económico como ocurrió en los años 1875, 1882, 1884-1885 (Florescano, 1980).

Para paliar el impacto de estos eventos meteorológicos, el gobierno tomó medidas económicas mediante la importación libre y sin impuestos de granos

básicos; a su vez, a nivel federal, se adquirió granos en zonas no afectadas para distribuirlos en aquellas con mayor problema de disponibilidad (Florescano, 1980).

La sequía acontecida a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, originó falta de alimentos y descontento social, lo que pudo haber constituido un detonante del inicio de la Revolución Mexicana iniciada en 1910; más tarde, una sequía en la década de 1950 y en particular en los años de 1956 y 1957, representó una de las sequías más severas registradas en los últimos 500 años (Stahle et al., 2012), lo que produjo carestía de alimentos, muerte de ganado y migración de la población del campo a la ciudad y hacia los Estados Unidos de América con la implementación del programa “Bracero” (Florescano, 1980; O’Hara y Metcalfe, 1995).

El desarrollo de una red dendrocronológica que integre diversas especies de coníferas y de otras latifoliadas es importante para lograr un mayor entendimiento de la variabilidad hidroclimática en esta región y en general en el norte de México. En este tenor, el desarrollo de series dendrocronológicas de *P. leiophylla*, con anillos de crecimiento bien definidos y de bandas de crecimiento de madera temprana y tardía bien marcadas, constituye una opción para el desarrollo de series dendrocronológicas sensibles a la variabilidad del clima y que puedan indicar frecuencias de eventos hidroclimáticos extremos y sus tendencias futuras.

7.6. Influencia de fenómenos océano-atmósfera en la variabilidad de la precipitación reconstruida

La variabilidad hidroclimática en la región, tiene alta influencia de fenómenos atmosféricos de circulación general, uno de los cuales es ENSO, del cual se ha documentado su influencia en diferentes estudios dendrocronológicos (Stahle et al., 1998; Cleaveland et al., 2003; Villanueva et al., 2007; Villanueva et al. 2018; Martínez et al., 2020). ENSO en su fase cálida (El Niño) y fría (La Niña) ejerce

diferente influencia en la variabilidad del clima en el norte de México, donde la fase cálida favorece un incremento en la precipitación de las estaciones invierno-primavera; mientras que la fría, da pie a un decremento en la precipitación en el mismo período (Stahle et al., 1998; Méndez & Magaña, 2010).

La influencia de ENSO se presencié para ciertos periodos a lo largo de la reconstrucción, como lo confirma el análisis de ondeleta, en los periodos 1867-1899, 1873-1881, 1870-1878, 1893-1900, 1970-1975, 1988-1990, 1995-2001 y 2009-2012 (Figura 18). Este comportamiento se ha verificado en reconstrucciones estacionales invierno-primavera previas (Villanueva et al., 2020).

Otros fenómenos circulatorios como NAMS, no mostraron una influencia significativa en las series de crecimiento de madera tardía, aunque una red dendrocronológica más completa es importante desarrollar para dilucidar con mayor claridad la influencia de este y de otros fenómenos circulatorios.

8. CONCLUSIONES

La especie *P. leiophylla* generó anillos de crecimiento anual con bandas de crecimiento bien delimitadas, donde es factible discriminar las secciones de madera temprana y de madera tardía, que se encuentran bien diferenciadas en el anillo anual. Los parámetros dendrocronológicos de la especie como son intercorrelación entre series, sensibilidad media, relación señal/ruido, entre otras, se ubican en el rango de aceptable o de excelente potencial dendrocronológico.

La serie dendrocronológica de *P. leiophylla* indicó alto potencial como “*proxy*” de la variabilidad hidroclimática en la zona de estudio, lo cual se constató mediante el desarrollo de una reconstrucción de precipitación estacional octubre-abril de los últimos 171 años.

La relación significativa observada entre el flujo acumulado noviembre-agosto de la estación hidrométrica de la cuenca del río Piaxtla y la serie de crecimiento de anillo total, indica que la especie tiene alto potencial para reconstrucciones hidrométricas, que son esenciales para analizar la disponibilidad hídrica con fines de riego, uso urbano y otros fines productivos.

La relación entre la precipitación acumulada reconstruida invierno-primavera con madera temprana y la relación significativa con índices de ENSO, sugiere un efecto significativo de este fenómeno circulatorio de gran escala, que puede explicar la variabilidad interanual y multianual de la precipitación. Este fenómeno muestra cierta predictibilidad por lo que en un futuro puede indicar la disponibilidad hídrica a presentarse con antelación, lo que es de gran relevancia para el uso sustentable de este recurso.

La especie mostró una respuesta negativa en crecimiento a la temperatura promedio máximo del periodo enero-abril del año actual de crecimiento, lo que sugiere que incrementos en esta variable derivado del calentamiento global, aunado a un decremento en la precipitación puede poner en riesgo la estabilidad de esta especie y afectar las relaciones ecológicas que se generan en este ecosistema, con una potencial pérdida de biodiversidad y de otros servicios ecosistémicos, de los cuales dependen comunidades rurales y urbanas establecidas a lo largo de la cuenca.

El Monzón de Norteamérica es el fenómeno circulatorio con mayor influencia en explicar los volúmenes de precipitación que ocurren durante la época de verano; sin embargo, en este estudio, no se encontró alguna relación significativa con la madera tardía; no obstante lo anterior es pertinente desarrollar una red dendrocronológica más completa, con especímenes ubicados en los sitios de mayor influencia de este fenómeno, así como comparar los índices de madera tardía con otras variables como días con lluvia, volúmenes de precipitación por

día entre otras variables relacionadas con la precipitación para determinar relaciones potenciales con este fenómeno.

La serie dendrocronológica señala potencial para analizar respuesta a sequías como se mostró con la asociación significativa encontrada con los índices de sequía SPEI y PDSI; información de utilidad para analizar la influencia de balances hidrológicos en la producción de biomasa.

El desarrollo de una red dendrocronológica regional con esta especie, puede coadyuvar a generar un mejor conocimiento de la variabilidad interanual y multianual del clima en esta región, lo que es importante para determinar tendencias en el clima bajo escenarios del cambio climático.

9. LITERATURA CITADA

- Babst, F., Bodesheim, P., Charney, N., Friend, A. D., Girardin, M. P., Klesse, S., ... & Evans, M. E. (2018). When tree rings go global: Challenges and opportunities for retro-and prospective insight. *Quaternary Science Reviews*, 197, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.009>
- Bradley, R. S. (1999). *Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary*. Elsevier.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Arreola, Á. J. G., Sánchez, C. I., & Valdez, C. R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y bosques*, 15(2), 27-44. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S14054712009000200002&script=sci_arttext
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Constante, G. V., González B. J. L., & Estrada, Á. J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la Cuenca de Río Nazas, Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(10), 07-23. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S200711322012000200002&script=sci_arttext
- Cerano, P. J., Szejner, P., Gutiérrez, G. G., Cervantes, M. R., Cambrón, S. V. H., Villanueva, D. J. & Castruita, E. L. U. (2022). How to Extract Climate Variability from Tree-Rings. *J. Vis. Exp*, 181, e63414. [Archivo PDF]. https://www.researchgate.net/profile/GenaroGutierrezGarcia/publication/359131959_How_to_Extract_Climate_Variability_from_TreeRings/links/62

[2975be84ce8e5b4d150cb5/How-to-Extract-ClimateVariabilityfromTreeRings.pdf](#)

- Chávez, G. M. P., Cerano, P. J., Nájera L. J. A., Pereda, B. V., Esquivel A. G., Cervantes, M. R. & Corral R. S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 38(2), 387-399. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000200016>
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva, D. J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59(3), 369-388. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1024835630188>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2019). Estadísticas del agua en México, CNAM. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- Cook, E. R., & Peters, K. (1981). The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. <http://hdl.handle.net/10150/261038>
- Cook, E. R., & Kairiukstis, L. A. (Eds.). (2013). *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Springer Science & Business Media.
- Cook, E. R., & Holmes, R. H. (1984). *Program ARSTAN and user's manual* Laboratory of Tree-Ring Research (Software). Arizona, USA: University of Arizona.
- Cook, E. R., & Jacoby, G. C. (1983). Potomac River streamflow since 1730 as reconstructed by tree rings. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22(10), 1659-1672. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1659:PRSSAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1659:PRSSAR>2.0.CO;2)
- Díaz, R. B., Villanueva, D. J., & Cerano, P. J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y bosques*, 22(1), 111-123. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712016000100111&lng=es&tlng=es.
- Domínguez, G., Tilo, G., Hernández, G. B. N., González, R. H., Cantú, S. I., Alanís, R. E., & Alvarado, M. S. (2018). Estructura y composición de la vegetación en cuatro sitios de la Sierra Madre Occidental. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(50), 9-34. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.227>
- Fritts, H. (2012). *Tree rings and climate*. Elsevier
- Florescano, M. (1980). Análisis histórico de las sequías en México (No. 632.12 F5).
- García, E. (2004). *Climas (clasificación de Koppen, modificado por García)*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México [Archivo

- PDF].
<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- Griffin, D., Meko, D. M., Touchan, R., Leavitt, S. W., & Woodhouse, C. A. (2011). Latewood chronology development for summer-moisture reconstruction in the US Southwest. *Tree-Ring Research*, 67(2), 87-101. <https://doi.org/10.3959/2011-4.1>
- Grissino, M. H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA [Archivo PDF]. https://lustialab.com/CC-Art/USRes/2001_Grissino_Cofecha.pdf
- Holmes, R. L. (1983). Computer assisted quality control. *Tree-ring bull*, 43, 69-78. <http://hdl.handle.net/10150/261253>
- INEGI. (2004). Guía para la interpretación de Cartografía, Edafología [Archivo PDF]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenido/s/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825231736/702825231736_1.pdf
- INEGI. (2018). Datos de relieve. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Recuperado el 20 de noviembre de 2020 de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2021). Uso de suelo y vegetación modificado por CONABIO. Escala 1: 250,000, serie VII. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & Díaz, J. V. (2013). Reconstrucción dendrocronológica de patrones de precipitación de largo plazo en el Parque Nacional de Basaseachi, Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 19(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2013.191349>
- Leverenz, J. W. (1981). Photosynthesis and transpiration in large forest-grown Douglas-fir: diurnal variation. *Canadian Journal of Botany*, 59(3), 349-356. <https://doi.org/10.1139/b81-048>
- Martínez, S. A. R., Villanueva, D. J., Carlón, A. T., & Estrada, Á. J. (2020). 243 years of reconstructed streamflow volume and identification of extreme hydroclimatic events in the Conchos River Basin, Chihuahua, Mexico. *Trees*, 34(6), 1347-1361. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00468-020-02002-w>
- Martín, B. D., Cherubini, P., Del Río, M., & Cañellas, I. (2008). Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. *Trees*, 22(3), 363-373. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00468-007-0191-6>
- Meko, D. M., & 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: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(6), 697-708. <https://doi.org/10.1002/joc.646>
- Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175-1188. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>
- O'Hara, S. L., & Metcalfe, S. E. (1995). Reconstructing the climate of Mexico from historical records. *The Holocene*, 5(4), 485-490. <https://doi.org/10.1177/095968369500500412>
- Pallardy, S. G. (2010). *Physiology of woody plants*. academic press.
- Robinson, W. J., & Evans, R. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin* 40, 59-64 <http://hdl.handle.net/10150/260443>
- Santiago, J. R., Etter, J., & Kristen, M. (2015). *Sedum piactlaense* (Crassulaceae), a new species from Durango, México. *Haseltonia*, 2015(20), 58-63. <https://doi.org/10.2985/026.020.0110>
- SEMARNAT. (2013). Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión [Archivo PDF]. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001596.pdf>
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., ... & Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2)
- Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., Therrell, M. D., & Villanueva-Diaz, J. (1999). Tree-ring reconstruction of winter and summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years. In 10th Conference of Global Change Studies. Preprint volume, American Meteorological Society, 79th Annual Meeting. January (Vol. 1015).
- Stahle, D. W., Burnette, D. J., Villanueva, D. J., Heim, R. R., Fye, F. K., Paredes, J., ... & Cleaveland, M. K. (2012). Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics*, 39(6), 1431-1446. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-011-1205-z>
- Thom, D., & Seidl, R. (2016). Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 91(3), 760-781. <https://doi.org/10.1111/brv.12193>
- Vicente, S. S. M., Beguería, S., Lorenzo, L. J., Camarero, J. J., López, M. J. I., Azorín, M. C., ... & Sánchez, L., A. (2012). Análisis comparativo de diferentes índices de sequía para aplicaciones ecológicas, agrícolas e hidrológicas. *Publicaciones de la Asociación Española de Climatología. Serie A*; 8. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8332>

- Villanueva, D. J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano, P. J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo, Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1), 117-131. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-006-9144-0>
- Villanueva D. J., Hernández, G., Cornejo, E., Stahle, D. W., Tnerrell, M. D., y Cleaveland, M. K.. (2003). Análisis estructural de un rodal milenario de sabino (*Taxodium mucronatum Ten.*) en los Peroles, San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 28(94), 57-79. <http://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/884>
- Villanueva, D. J., Luckman, B. H., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., Cerano, P. J., ... & Jasso, I. R. (2005). Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: Water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, Mexico. *Dendrochronologia*, 22(3), 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.04.005>
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Rosales, M. S., Arrocena, L. J. C., Stahle, D. W., Ruiz, C. J. A., & Martínez, S. A. R. (2014). Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca alta del Río Mezquital, Durango. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(SPE10), 1897-1912. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014001401897
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D.W. Stahle, J. Estrada A. y V. Constante G. (2008). Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y reconstrucciones de precipitación y flujo en México. Folleto Científico No. 23. Inifap Cenid-Raspa. Gómez Palacio, Durango. 49 pp.
- Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Cerano, P. J., Estrada, Á. J., & Sánchez, C. I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia forestal en México*, 34(105), 37-69. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140535862009000100003&script=sci_abstract&tlng=en
- Villanueva D., J., Cerano P. J., Vázquez S. L., Stahle D.W., Fulé, P.Z., Yocom, O. L., L., Franco R. y Ruiz C. J. A. (2015). Red dendrocronológica de pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2015(86), 5-14. <https://doi.org/10.14350/riq.42003>
- Villanueva, D. J., González, E. M., Cerano, P. J., Estrada, Á. J., Martínez, S. A. R., & Rosales, M. S. (2018). Red dendrocronológica de pino triste (*Pinus lumholtzii* BL Rob. & Fernald) en la Sierra Madre Occidental para reconstrucción de lluvia estacional. *Madera y bosques*, 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421530>

- Villanueva, D. J., Castruita, E. L. U., Martínez, S. A. R., Loera, C. R., & Estrada, Á. J. (2020). Chihuahua southwestern hydroclimatic variability inferred with coniferous growth rings. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 26(3), 373-389. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.09.071>
- Villanueva, D. J., Stahle, D. W., Poulos, H. M., Therrell, M. D., Howard, I., Martínez, S. A. R., ... & Estrada, Á. 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, T., Hamann, A., Spittlehouse, D. L., & Murdock, T. Q. (2012). ClimateWNA-high-resolution spatial climate data for western North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(1), 16-29. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-043.1>
- Wang, T., Hamann, A., Spittlehouse, D., & Carroll, C. (2016). Locally downscaled and spatially customizable climate data for historical and future periods for North America. *PloS one*, 11(6), e0156720. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156720>
- Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(2), 201-213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2)
- Woodhouse, C. A. (2001). A tree-ring reconstruction of streamflow for the Colorado Front Range 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(3), 561-569. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05493.x>

ANEXOS

Anexo 1. Correlaciones encontradas entre las cronologías de madera temprana, tardía y de anillo total de los sitios Vencedores, San José de Miravalles y el sitio Integrado en relación a las variables de precipitación, temperatura promedio mensual máxima y temperatura promedio mensual mínima. Los valores en negritas son significativos ($p < 0.05$).

PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL																					
SITIOS	CRONOLOGIAS	AÑO PREVIO							AÑO ACTUAL												
		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
INTEGRADA	RWI Std	0.14	-0.10	-0.04	0.16	0.30	0.36	0.24	0.36	0.22	0.36	0.19	0.05	0.12	0.09	-0.02	0.06	0.02	-0.08	-0.03	
	EWI Std	0.14	-0.10	-0.03	0.17	0.32	0.37	0.25	0.38	0.24	0.37	0.20	0.05	0.12	0.10	-0.02	0.06	0.01	-0.08	-0.03	
	LWI Std	0.14	-0.05	-0.01	0.07	0.18	0.24	0.12	0.19	0.04	0.23	0.12	0.07	0.13	0.06	0.04	0.08	0.09	0.00	0.00	
SJM	RWI Std	0.15	0.01	0.02	0.16	0.27	0.37	0.34	0.33	0.19	0.31	0.14	-0.03	0.10	0.14	-0.01	0.02	0.02	-0.01	0.10	
	EWI Std	0.04	0.08	0.18	0.15	0.08	0.07	0.23	0.18	-0.12	0.12	0.05	-0.08	0.00	0.14	0.20	0.15	0.08	0.05	0.23	
	LWI Std	0.11	0.08	0.06	0.06	0.16	0.12	0.07	0.21	-0.05	0.14	0.11	0.05	0.10	0.03	0.10	0.07	0.17	0.09	0.07	
VEN	RWI Std	0.09	-0.13	-0.08	0.11	0.24	0.31	0.13	0.26	0.22	0.33	0.19	0.04	0.13	-0.02	-0.12	0.01	-0.04	-0.07	-0.11	
	EWI Std	0.03	-0.17	-0.06	0.03	0.01	-0.01	-0.11	-0.05	-0.04	0.12	0.01	-0.01	0.04	-0.15	-0.06	0.08	-0.01	-0.08	-0.11	
	LWI Std	0.09	-0.09	-0.07	0.06	0.14	0.27	0.04	0.10	0.12	0.25	0.14	0.07	0.07	0.00	-0.08	-0.05	0.00	-0.05	-0.08	
TEMPERATURA PROMEDIO MÁXIMA MENSUAL																					
SITIOS	CRONOLOGIAS	AÑO PREVIO							AÑO ACTUAL												
		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
INTEGRADA	RWI Std	0.00	0.12	0.13	-0.03	-0.16	-0.34	-0.29	-0.44	-0.35	-0.43	-0.22	-0.09	-0.19	0.02	0.07	0.11	0.00	0.05	0.13	
	EWI Std	0.00	0.12	0.12	-0.04	-0.16	-0.35	-0.28	-0.46	-0.37	-0.45	-0.25	-0.11	-0.20	0.01	0.06	0.11	0.00	0.05	0.13	

	LWI Std	-0.02	0.08	0.08	0.01	-0.04	-0.23	-0.16	-0.26	-0.14	-0.25	-0.03	0.01	-0.14	0.06	0.05	0.13	0.04	0.03	0.16	
SJM	RWI Std	0.01	0.01	0.03	-0.03	-0.21	-0.27	-0.23	-0.45	-0.27	-0.36	-0.16	-0.08	-0.17	-0.03	0.05	0.11	-0.03	0.04	0.10	
	EWI Std	0.01	0.13	0.10	0.02	-0.01	0.03	-0.02	-0.30	0.00	-0.03	0.22	0.09	0.01	0.10	0.09	0.03	0.01	0.05	-0.01	
	LWI Std	0.06	0.09	0.02	-0.05	-0.03	-0.07	-0.05	-0.32	-0.07	-0.13	0.12	0.09	-0.15	0.06	0.04	0.16	0.01	0.07	0.13	
VEN	RWI Std	0.05	0.17	0.16	-0.02	-0.08	-0.32	-0.24	-0.30	-0.28	-0.36	-0.21	-0.04	-0.13	0.08	0.11	0.14	0.02	0.04	0.14	
	EWI Std	0.06	0.23	0.13	0.00	0.04	-0.04	-0.04	0.04	0.06	-0.16	0.10	0.19	0.02	0.26	0.13	0.02	0.05	0.03	-0.03	
	LWI Std	0.06	0.17	0.20	0.06	0.04	-0.21	-0.11	-0.08	-0.06	-0.21	-0.04	0.07	0.01	0.20	0.16	0.22	0.14	0.03	0.20	
TEMPERATURA PROMEDIO MINIMA MENSUAL																					
SITIOS	CRONOLOGIAS	AÑO PREVIO							AÑO ACTUAL												
		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
INTEGRADA	RWI Std	-0.02	0.04	0.03	0.15	0.09	-0.02	0.22	-0.04	-0.05	-0.23	-0.09	-0.06	-0.15	-0.06	-0.05	0.12	-0.05	0.10	0.07	
	EWI Std	0.00	0.05	0.03	0.15	0.10	-0.01	0.22	-0.05	-0.05	-0.24	-0.10	-0.08	-0.15	-0.07	-0.04	0.12	-0.06	0.10	0.06	
	LWI Std	-0.16	-0.07	-0.07	0.11	0.11	-0.08	0.17	0.09	-0.04	-0.11	-0.03	0.04	-0.14	-0.05	-0.09	0.23	0.13	0.11	0.13	
SJM	RWI Std	0.16	0.01	-0.01	0.07	0.08	-0.06	0.24	-0.11	0.05	-0.12	0.04	0.00	0.00	0.02	0.02	0.10	0.05	0.09	0.16	
	EWI Std	0.04	0.07	0.07	0.08	0.14	0.04	0.22	-0.20	0.07	0.00	0.17	-0.02	0.05	0.06	0.07	0.10	0.12	0.05	0.20	
	LWI Std	-0.03	-0.04	-0.05	-0.04	0.11	-0.11	0.15	-0.08	0.04	-0.06	0.17	0.15	-0.07	0.04	0.00	0.23	0.21	0.07	0.20	
VEN	RWI Std	0.00	0.11	0.09	0.18	0.12	0.03	0.15	0.03	-0.06	-0.18	-0.11	-0.03	-0.11	-0.02	-0.01	0.16	-0.08	0.11	0.00	
	EWI Std	-0.06	0.08	0.10	0.24	0.07	0.12	0.04	0.04	0.07	-0.17	-0.07	0.11	-0.08	0.08	0.08	0.25	0.07	0.13	0.03	
	LWI Std	-0.05	0.04	0.00	0.20	0.16	0.00	0.11	0.18	-0.03	-0.06	-0.05	0.04	-0.04	0.06	0.00	0.28	0.11	0.16	0.03	

Anexo 2. Correlaciones encontradas entre las cronologías de madera temprana, tardía y de anillo total del sitio integrado en relación a las variables de precipitación, temperatura promedio mensual máxima y temperatura promedio mensual mínima. Los valores en negritas son significativos ($p < 0.05$).

VARIABLE	CRONOLOGIA	AÑO PREVIO								AÑO ACTUAL											
		J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
PRECIPITACIÓN	RWI_Std	0.14	-0.10	-0.04	0.16	0.30	0.36	0.24	0.36	0.22	0.36	0.19	0.05	0.12	0.09	-0.02	0.06	0.02	-0.08	-0.03	
	EWI_Std	0.14	-0.10	-0.03	0.17	0.32	0.37	0.25	0.38	0.24	0.37	0.20	0.05	0.12	0.10	-0.02	0.06	0.01	-0.08	-0.03	
	LWI_Std	0.14	-0.05	-0.01	0.07	0.18	0.24	0.12	0.19	0.04	0.23	0.12	0.07	0.13	0.06	0.04	0.08	0.09	0.00	0.00	
TEMP. MAX	RWI_Std	0.00	0.12	0.13	-0.03	-0.16	-0.34	-0.29	-0.44	-0.35	-0.43	-0.22	-0.09	-0.19	0.02	0.07	0.11	0.00	0.05	0.13	
	EWI_Std	0.00	0.12	0.12	-0.04	-0.16	-0.35	-0.28	-0.46	-0.37	-0.45	-0.25	-0.11	-0.20	0.01	0.06	0.11	0.00	0.05	0.13	
	LWI_Std	-0.02	0.08	0.08	0.01	-0.04	-0.23	-0.16	-0.26	-0.14	-0.25	-0.03	0.01	-0.14	0.06	0.05	0.13	0.04	0.03	0.16	
TEMP. MIN	RWI_Std	-0.02	0.04	0.03	0.15	0.09	-0.02	0.22	-0.04	-0.05	-0.23	-0.09	-0.06	-0.15	-0.06	-0.05	0.12	-0.05	0.10	0.07	
	EWI_Std	0.00	0.05	0.03	0.15	0.10	-0.01	0.22	-0.05	-0.05	-0.24	-0.10	-0.08	-0.15	-0.07	-0.04	0.12	-0.06	0.10	0.06	
	LWI_Std	-0.16	-0.07	-0.07	0.11	0.11	-0.08	0.17	0.09	-0.04	-0.11	-0.03	0.04	-0.14	-0.05	-0.09	0.23	0.13	0.11	0.13	