



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ciencias Naturales

Maestría en Ciencias Biológicas

Análisis dendroclimático en la Sierra Gorda de Querétaro, México: perspectivas para una reconstrucción climática regional

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Biológicas

Presenta

Omar Noé Mendoza Villa

Dirigido por:

Víctor Hugo Cambrón Sandoval

Co-dirigido por:

Julián Cerano Paredes

Sinodal vocal:

Hugo Luna Soria

Sinodal suplente:

Dioseline Girón Gutiérrez

Sinodal suplente:

Rosalinda Cervantes Martínez

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (marzo del 2026)

México

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

Dedicatoria

A mi esposa Adriana Morales Rangel, quien es mi compañera de vida y de vocación.

A mis padres: Magdalena Villa Mendoza y José Marciano Mendoza López, quienes han sido los que me encaminaron a escoger esta vocación por sus enseñanzas de vida.

A mis hermanos, con cariño y aprecio les dedico esta tesis.

A mis compañeros de maestría, hoy grandes amigos.

Agradecimientos

Expreso mi sincero agradecimiento a mi director de tesis, Víctor Hugo Cambrón Sandoval, por sus enseñanzas, su orientación constante y por canalizarme con las personas adecuadas para atender mis necesidades académicas cuando fue necesario.

También agradezco a mi co-director de tesis, Julián Cerano Paredes, cuyo acompañamiento y experiencia en el tema de la dendrocronología fueron fundamentales para la culminación y buen término de este proyecto.

Extiendo este agradecimiento a mi comité sinodal, integrado por Hugo Luna Soria, Dioseline Girón Gutiérrez y Rosalinda Cervantes Martínez, por su tiempo, disposición, paciencia y valiosas observaciones durante la revisión de este trabajo. Sus aportaciones y sugerencias permitieron fortalecer la calidad académica y científica de esta tesis.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios de posgrado y por el apoyo académico y administrativo recibido durante mi formación.

De igual forma, expreso mi reconocimiento a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Querétaro (SECIHTI), por su respaldo institucional y por el apoyo económico que brinda a la investigación científica en México, lo cual permitió el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, agradezco a todas las personas que de una u otra forma me ayudaron, apoyaron, recomendaron o me acompañaron en las diferentes etapas de mi proyecto de maestría.

GRACIAS DE TODO CORAZON A TODOS

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
ANTECEDENTES.....	5
Aspectos generales del clima, monitoreo y su clasificación	5
Desarrollo de la dendrocronología	7
Fundamentos anatómicos de la formación de anillos de crecimiento	8
Distribución de pinos en México	9
Dendrocronología en México.....	9
Estudios dendrocronológicos regionales con especies de pinos	10
Áreas Naturales protegidas y la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda.....	11
Clima en la Sierra Gorda.....	11
Distribución de pinos en la Sierra Gorda	13
Dendrocronología en el estado de Querétaro	13
HIPÓTESIS.....	15
OBJETIVO GENERAL	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS	16
Localización de la región de estudio	16
Selección de zonas de muestreo	16
Especies de pinos seleccionadas	18
Selección de ejemplares	21
Extracción de núcleos de crecimiento	22
Registro de datos	24
Resguardo de muestras.....	24
Preparación de muestras.....	25
Datación de núcleos de crecimiento.....	26

Medición de anillos de crecimiento	28
Revisión de la datación	29
Generación de cronologías	30
Análisis de función de respuesta climática por sitio	32
Obtención de variables climáticas.....	32
Análisis de correlación.....	33
Análisis de variabilidad común entre series.....	34
Determinación de sincronía de crecimiento.....	34
Correlación entre series.....	34
Análisis de componentes principales	34
Generación de cronología regional	35
Análisis de función de respuesta climática regional	36
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
Datación de núcleos de crecimiento.....	37
Análisis de función de respuesta climática por sitio	39
Análisis de variabilidad común entre series.....	54
Cronología regional.....	56
CONCLUSIÓN	63
BIBLIOGRAFÍA	65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1..... 21

Cuadro 2..... 38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 5

Figura 2 12

Figura 3 17

Figura 4 22

Figura 5 23

Figura 6 25

Figura 7 26

Figura 8 27

Figura 9 28

Figura 10 40

Figura 11 41

Figura 12 42

Figura 13 43

Figura 14 44

Figura 15 45

Figura 16 46

Figura 17 47

Figura 18 48

Figura 19 49

Figura 20 50

Figura 21 51

Figura 22 54

Figura 23 55

Figura 24 56

Figura 25 57

Figura 26 58

Figura 27 60

RESUMEN

La dendrocronología analiza el patrón de los anillos de crecimiento de los árboles para asignar una fecha exacta a cada uno y desarrollar una cronología específica de un sitio o región. El patrón de crecimiento es influenciado por variables climáticas importantes como la precipitación o temperatura. Del análisis de las cronologías es posible determinar la variación de dichos eventos ambientales en el período completo de vida del arbolado, que puede alcanzar hasta 5 décadas en algunos casos. Las especies del género *Pinus* han sido ampliamente utilizadas en trabajos dendroclimáticos en México y uno de estos se realizó en la zona suroeste de la reserva de la biosfera Sierra Gorda de Querétaro (sitio La Pingüica). Donde se desarrolló una cronología de 138 años (1877 al 2014) y una reconstrucción de la precipitación de invierno-primavera que describe la variabilidad de la lluvia histórica de la zona. Así, surge la pregunta de si cronologías de diferentes especies y zonas de la región presentarán una misma respuesta en su crecimiento anual de acuerdo a la variabilidad histórica de la precipitación y la temperatura. Con el objetivo de realizar un análisis dendroclimático para la región de la Sierra Gorda, se aplicaron técnicas dendrocronológicas estandarizadas. Este se realizó por medio de técnicas dendrocronológicas estandarizadas, con las cuales se dataron y analizaron los anillos de crecimiento de poblaciones de *Pinus greggii*, *Pinus montezumae* y *Pinus cembroides*, distribuidas en seis zonas de la región. Las series de cada sitio se correlacionaron con variables de reanálisis climático: de precipitación, temperatura máxima, media y mínima y se analizó la respuesta común de las series. Los resultados reportaron una base estadística significativa ($p < 0.05$) para el desarrollo de una cronología regional, que cubre 182 años (1841-2023) y se determinaron correlaciones significativas; positiva para la precipitación acumulada de enero-mayo ($r = 0.60$) y negativas para la temperatura máxima del promedio mensual de enero-junio ($r = -0.60$). Estos resultados confirman alta sensibilidad al déficit hídrico y aumento de temperatura. Además, los periodos secos y húmedos coinciden con registros nacionales, lo que otorga validez a la cronología regional.

Palabras clave: Dendroclimatología, variabilidad de la precipitación, Pinos, Sierra Gorda.

ABSTRACT

Dendrochronology analyzes tree-ring growth patterns in order to assign an exact date to each ring and develop a specific chronology for a site or region. Growth patterns are influenced by important climatic variables such as precipitation and temperature. Through the analysis of these chronologies, it is possible to determine the variation of such environmental events throughout the entire lifespan of the trees, which in some cases can reach up to five decades. Species of the genus *Pinus* have been widely used in dendroclimatic studies in Mexico. One of these studies was conducted in the southwestern area of the Sierra Gorda Biosphere Reserve in Querétaro (La Pingüica site), where a 138-year chronology (1877–2014) and a winter–spring precipitation reconstruction were developed, describing the historical rainfall variability of the region. Thus, the question arises as to whether chronologies from different species and locations within the region exhibit a similar response in their annual growth according to the historical variability of precipitation and temperature. In order to conduct a dendroclimatic analysis for the Sierra Gorda region, standardized dendrochronological techniques were applied. Tree rings from populations of *Pinus greggii*, *Pinus montezumae*, and *Pinus cembroides*, distributed across six sites in the region, were dated and analyzed using these methods. The ring-width series from each site were correlated with climatic reanalysis variables, including precipitation, and maximum, mean, and minimum temperature, and the common response among the series was evaluated. The results showed a statistically significant basis ($p < 0.05$) for the development of a regional chronology covering 182 years (1841–2023). Significant correlations were identified: a positive correlation with accumulated precipitation from January to May ($r = 0.60$) and negative correlations with the mean monthly maximum temperature from January to June ($r = -0.60$). These results confirm a high sensitivity of tree growth to water deficit and increasing temperature. In addition, the dry and wet periods coincide with national climatic records, providing further validation for the regional chronology.

Keywords: Dendroclimatology, precipitation variability, Pines, Sierra Gorda.

INTRODUCCIÓN

La dendrocronología se encarga de analizar los crecimientos radiales de los árboles para determinar el año de formación de cada uno, formando series continuas de crecimiento denominadas cronologías (Stokes y Smiley, 1968). El análisis de estas cronologías es útil para el desarrollo de reconstrucción de eventos y parámetros climáticos que influyen en el crecimiento positiva o negativamente, como pueden ser la precipitación o la temperatura. A partir de esto, es posible determinar eventos no registrados por instrumentos de medición, como pueden ser de sequías y escorrentías extremas (Fritts, 1976; Arreola-Ortiz y Nívar-Cháidez, 2010 ; Villanueva-Díaz *et al.*, 2021), procesos geomorfológicos (Franco-Ramos *et al.*, 2019), impacto de material piroclástico derivado de eventos volcánicos (García-Rovés, 2017) y por otro lado la caracterización de la composición química de cada anillo de crecimiento (Panyushkina, 2011) e incluso para el análisis de crecimiento diferencial de los bosques y su respuesta ecológica (Rojas-García *et al.*, 2020).

Las especies del género *Pinus* han sido ampliamente utilizadas en trabajos dendroclimáticos en México (Morales-Estrada, 2022), debido a que este género ha mostrado buena tolerancia a climas extremos (Rzedowski, 2006; Sánchez-González, 2008) y con esto, respuestas positivas a la variabilidad climática regional (Cortés-Barrera *et al.*, 2012; Cardoza-Martínez *et al.*, 2014; Díaz-Ramírez *et al.*, 2016).

Como resultado de diferentes estudios dendrocronológicos en México, se han obtenido 429 cronologías distribuidas en tres provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental, Eje Neovolcánico Transmexicano y Sierra Madre Oriental (Morales-Estrada, 2022). Además, los estados en los que se han desarrollado la mayor parte de estas investigaciones son Durango, Puebla, Chihuahua y el Estado de México (Carlón-Allende *et al.*, 2025). La mayoría de las cronologías y reconstrucciones dendroclimáticas han encontrado una correlación significativa con los registros de precipitación invernal (Villanueva-Díaz *et al.*, 2004).

Tradicionalmente las variables climáticas son monitoreadas por el Servicio Meteorológico Nacional a través de estaciones meteorológicas automáticas (CONAGUA, 2024) y actualmente, también existe una gran variedad de plataformas de reanálisis de datos

climáticos que ofrecen acceso a una gran cantidad de estos, provenientes de satélites y sensores remotos (Abatzoglou *et al.*, 2018; WorldClim, 2024; Lima-Ribeiro *et al.*, 2024; NASA, 2024-a; ECMWF, 2025).

Por otro lado, la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda se encuentra al norte del estado de Querétaro (CONABIO, 2008), en ella se distribuye una amplia variedad de ecosistemas como son los bosques de coníferas, de encinos, bosque de pino-encino y bosque mesófilo de montaña. Así como, matorral xerófilo, selvas caducifolia, perennifolia y vegetación inducida (INEGI, 2022). El clima predominante en la mayor parte de la Sierra Gorda es cálido subhúmedo y abarca las zonas: central, este y oeste (INE, 1999; INEGI, 2017). Es esta región la mayor cantidad de precipitación ocurre en verano en los meses de junio a septiembre con variaciones de intensidad al inicio o final de la temporada (INEGI, 2017). Lo anterior, resalta la importancia de la reserva de la Sierra Gorda en cuanto a su diversidad climática y ecológica, aspectos que representan un escenario ideal para analizar la relación entre variabilidad climática y el comportamiento del crecimiento histórico de especies de *Pinus* que se distribuyen en ella.

A pesar de lo anterior, al suroeste de la Sierra Gorda solo se ha obtenido una reconstrucción dendroclimática de 138 años (Mendoza-Villa *et al.*, 2018) con dos especies de *Pinus* (*P. greggii* Englem. Ex. Parl. (1848), *Pinus montezumae* Lamb. (1832), aportando una reconstrucción valiosa, pero con limitaciones de sitio y especie. Por ello, resulta necesario integrar múltiples sitios y especies en un análisis dendroclimático regional, que permita determinar una misma respuesta entre especies y una variable climática de respuesta regional. Lo que aportará al conocimiento de la reserva, en la dinámica de la respuesta ecológica de los bosques de pino al clima y sobre el uso de recursos maderables, etcétera.

ANTECEDENTES

Aspectos generales del clima, monitoreo y su clasificación

Las condiciones del tiempo atmosférico incluyen fenómenos como lluvias, tornados, ondas tropicales, frentes fríos y huracanes, los cuales ocurren en escalas temporales cortas y forman parte de la variabilidad atmosférica de alta frecuencia (Puente, 2019). Cuando estas condiciones se analizan en periodos prolongados, generalmente de 30 años o más, se define el clima característico de una región, considerado de baja frecuencia y se clasifica en distintos tipos como cálido, seco, semiseco y templado (INEGI, 2020; INEGI, 2023).

En México se han clasificado tres tipos de clima; cálidos, secos y templados, cada uno con sus subcategorías (Fig. 1). De acuerdo a la clasificación de Köppen (1936) modificada por Enriqueta García en 1973 (INEGI, 2020), existe una predominancia de los climas secos mayor que los húmedos, lo que provoca que el 85% del territorio nacional atraviese alguna condición de sequía durante el año (Rzedowski, 2006).



Figura 1. Tipos de climas de México. Fuente: INEGI. Marco Geoestadístico Nacional 2020.

En México el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el encargado de la toma de lecturas y caracterización del tiempo atmosférico y el clima de zonas y regiones particulares, para ello se utilizan los datos registrados periódicamente por Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's). Esta información permite establecer recurrencias, ciclos y tendencias atmosféricas y climáticas (CONAGUA, 2024). De acuerdo con los datos publicados en la página oficial de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), existen en todo el territorio mexicano 403 EMA's, instaladas en puntos estratégicos y conectadas al Sistema de Adquisición, Procesamiento y Almacenamiento de Datos (SAPAD), estas estaciones registran de manera continua las variables meteorológicas que predominan en cada sitio como son presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, temperatura y precipitación (CONAGUA, 2024).

A pesar de lo anterior, existen territorios y regiones donde no se han instalado EMA's o estas presentan periodos incompletos o sin información por mal funcionamiento, para estas situaciones se dispone de una gran variedad de plataformas de reanálisis climático que ofrecen acceso a datos generados a partir de satélites y sensores remotos con información interpolada de alta resolución (Abatzoglou *et al.*, 2018; WorldClim, 2024; Lima-Ribeiro *et al.*, 2024; NASA, 2024-a). Un ejemplo de estas herramientas es ERA5-Land, es un producto de reanálisis climático generado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés), que combina observaciones de diversas fuentes (Estaciones meteorológicas terrestres, satélites, boyas meteorológicas, aviones y barcos equipados con instrumentos meteorológicos) con modelos numéricos para producir una representación coherente y detallada del clima a lo largo del tiempo (ECMWF, 2025), a través de la plataforma de análisis geoespacial *Google Earth Engine* (GEE) que ofrece información climática de libre acceso y alta resolución sobre variables climáticas (Google, 2024). Sin embargo, estos registros cubren periodos de hasta 1950 a la fecha, quedando sin información climática periodos anteriores al monitoreo instrumental.

Desarrollo de la dendrocronología

Las raíces de la palabra “dendrocronología” tienen su origen del griego *dendro*: árbol, *cronos*: tiempo y *logos*: conocimiento. Haciendo alusión al estudio de los anillos de crecimiento de los árboles a lo largo de una secuencia cronológica (Stokes y Smiley, 1968). Esta secuencia o serie dendrocronológica es la base para investigaciones en el análisis de la respuesta de los árboles hacia las variaciones ambientales de su entorno local y regional, permitiendo realizar una reconstrucción de dichas condiciones (Schweingruber, 1996; Gutiérrez, 2009).

La dendrocronología como disciplina inició en el año 1901, en los bosques de coníferas de Arizona, en Estados Unidos, con las observaciones de Andrew Douglas quien asoció las variaciones del ancho de los anillos de crecimiento en los pinos, con la humedad de la zona (Berger, 2011). Este estudio sentó las bases del uso de los anillos de crecimiento como un indicador indirecto (proxy) para inferir las condiciones del pasado (reconstrucciones climáticas), calculando la fecha exacta de formación a cada anillo de crecimiento por medio de la técnica del fechado cruzado (*Crossdating*) (Villanueva-Díaz *et al.*, 2000). A partir de esto, se desarrolló el análisis de los patrones de crecimiento en series dendrocronológicas, considerando que una parte de la variabilidad en el ancho de anillo corresponde a las condiciones locales dominantes en cada sitio, mientras que otra parte de esa variabilidad refleja las condiciones comunes regionales (Fritts, 1976). Como resultado, se establecieron cuatro condicionantes para determinar si una especie posee potencial dendrocronológico: 1) la formación de un solo anillo de crecimiento por año; 2) debe haber un factor ambiental que domine la influencia del crecimiento anual; 3) la variación del ancho de los anillos debe ser sensible a la variación de dicho factor ambiental; y 4) el factor ambiental debe mantenerse constante a lo largo de un periodo temporal igual o mayor a la vida del árbol (Stahle, 1999).

De tal forma, el principal resultado de un análisis dendrocronológico es el desarrollo de una cronología, que es una serie maestra del diámetro promedio de cada anillo de crecimiento de un año determinado, en la extensión de vida del arbolado de un determinado sitio, zona o región (Miranda-Avilés *et al.*, 2007). Esta se obtiene mediante la aplicación de técnicas de datación que actualmente están estandarizadas, las cuales transforman la medición de ancho

de anillo anual en un índice de ancho de anillo (IAA) (Villanueva *et al.*, 2004; Gutiérrez, 2009; Cerano-Paredes *et al.*, 2022).

Las aplicaciones más comunes de las cronologías generadas incluyen el desarrollo de reconstrucción de eventos y parámetros climáticos (Fritts, 1976), como la precipitación y la temperatura, variables que pueden asociarse a la ocurrencia de sequías (dendroclimatología) (Arreola-Ortiz y Návar-Cháidez, 2010). También, se han empleado en la estimación de escorrentías y niveles de cuerpos de agua (dendrohidrología) (Villanueva-Díaz *et al.*, 2021), en la datación de procesos geomorfológicos (dendrogeomorfología) (Franco-Ramos *et al.*, 2019), en la determinación del impacto de material piroclástico o rocas, determinando fechas concretas de eventos telúricos sobre el crecimiento anual de los árboles (dendrovulcanología) (García-Rovés, 2017). Además, también se ha caracterizado la composición química de los anillos de crecimiento (dendroquímica) (Panyushkina, 2011) y analizado la dinámica de crecimiento de los bosques y su respuesta a variables ecológicas (dendroecología) (Rojas-García *et al.*, 2020).

Fundamentos anatómicos de la formación de anillos de crecimiento

La formación de anillos de crecimiento se genera en dos zonas de producción celular llamadas meristemos. La primera está localizada en el ápice de las plántulas y promueve el crecimiento primario (crecimiento vertical), mientras que la segunda, se localiza en el espacio intermedio entre el tallo y la corteza, llamada cambium vascular, en la cual se lleva a cabo el crecimiento secundario (aumento radial) (Villanueva-Díaz *et al.*, 2004). El crecimiento secundario generado por el cambium vascular da origen al tejido llamado xilema, el cual constituye la madera, es un tejido lignificado que está compuesto por células largas y oblongas llamadas traqueidas, que conducen el agua y nutrientes a toda la planta, además de aportar soporte estructural (Giménez *et al.*, 2005). Las células de la madera temprana son comparativamente más grandes y de pared celular más delgada que las de la madera tardía (Villanueva-Díaz *et al.*, 2004). Así, el xilema se diferencia en anillos de crecimiento anual y cada anillo en dos secciones: una de madera temprana con tonos comúnmente claros y el otro de madera tardía de tonos oscuros, los cuales corresponden al crecimiento de primavera y verano, respectivamente (Fritts, 1976).

Distribución de pinos en México

La familia *Pinaceae* está formada por los géneros *Pseudotsuga*, *Abies*, *Picea* y *Pinus* (Rzedowski, 2006), de las cuales las especies del género *Pinus* son comúnmente árboles resinosos, con acículas persistentes (hojas) en forma de aguja y conos leñosos con escamas en espiral (INEGI, 1995). Además, México es considerado como segundo centro de diversidad del género, con 49 de las 120 especies encontradas en el resto del mundo (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014). Así, los bosques de pinos en México presentan una amplia distribución, a lo largo de un gradiente altitudinal que va desde los 1500 msnm hasta el límite superior de 4000 msnm (Yeaton, 1982; Rzedowski, 2006), en casi todos los estados del país, con la excepción de la Península de Yucatán (Rzedowski, 2006). Estos se encuentran en cinco regiones principales; 1) Baja California (Norte y Sur), 2) Sierra Madre Occidental, 3) Sierra Madre Oriental, 4) Eje Neovolcánico Transmexicano y 5) Sierra Madre del Sur (Sánchez-González, 2008). Asimismo, el género posee gran relevancia económica, ecológica y cultural ya que por un lado aporta madera, resinas y servicios ambientales y por otro lado forma parte de tradiciones y prácticas comunitarias en diversas regiones del país (Sánchez-González, 2008).

Dendrocronología en México

En México la mayor parte de los estudios dendrocronológicos se han desarrollado en los bosques templados y subtropicales del noreste del país (Villanueva-Díaz *et al.*, 2000). Estos, comenzaron a desarrollarse en la década de los 40's y 50's (Schulman, 1944; Schulman, 1956) iniciando una serie de estudios exploratorios y descriptivos (Suzán y González, 1985), mientras que otros autores desarrollaron las primeras reconstrucciones climáticas para el país (Huante y Swetnam, 1991; Stahle y Cleaveland, 1993).

En México se han desarrollado 429 cronologías hasta el año 2022, distribuidas en tres provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental (SMOc) con el 44.7% de estas, Eje Neovolcánico Transmexicano (ENT) con el 22.4% y Sierra Madre Oriental (SMO) con el 19.6%. De las cuales los estados con mayor número de estas son Durango, Puebla, Chihuahua y el Estado de México (Morales-Estrada, 2022). En estos estudios han

documentado que el crecimiento de las especies forestales es afectado por factores como el genético, las variables climáticas, la competencia entre individuos, el establecimiento de plagas forestales, enfermedades, incendios o incluso el aprovechamiento mismo del bosque (Villanueva-Díaz *et al.*, 2004).

Las especies más empleadas en estudios dendrocronológicos dentro del país han sido *Pinus hartwegii*, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. Et Cham.) y *Taxodium mucronatum* Tenore (1853) (Carlón-Allende *et al.*, 2025), las cuales han mostrado una buena tolerancia a condiciones climáticas extremas (Rzedowski, 2006; Sánchez-González, 2008), lo que las convierte en un grupo altamente sensible a la variabilidad ambiental y por tanto, de gran utilidad para la construcción de cronologías.

El clima es el factor que regula en mayor medida el crecimiento de los árboles (Giménez *et al.*, 2005). De tal forma, la mayoría de las cronologías y reconstrucciones dendroclimáticas en México han mostrado correlaciones significativas con la precipitación invernal, lo que ha permitido ampliar los registros observados y a entenderlos mejor de forma integral como parte de la variabilidad climática de las regiones estudiadas (Villanueva-Díaz *et al.*, 2004).

Diversos trabajos han documentado respuestas claras a la variabilidad climática en distintas regiones de México por parte de diferentes especies de pinos (Cortés-Barrera *et al.*, 2012; Cardoza-Martínez *et al.*, 2014; Díaz-Ramírez *et al.*, 2016). Además, se han integrado cronologías de diferentes especies con resultados positivos, lo que ha fortalecido las series dendrocronológicas regionales y ha permitido ampliar el rango de aplicación de la disciplina (Chávez-Gándara *et al.*, 2017; Martínez-Sifuentes *et al.*, 2019).

Estudios dendrocronológicos regionales con especies de pinos

El desarrollo de reconstrucciones climáticas a partir de cronologías de especies del género *Pinus* ha mostrado resultados exitosos en diversas regiones, como en el noreste del estado de Guanajuato y la región oriental de Tlaxcala con *P. cembroides* (Cortés-Barrera *et al.*, 2012; Cardoza Martínez, *et al.*, 2014) o para la región hidrológica Presido San Pedro, entre los estados de Sinaloa y Nayarit, con *Pinus durangensis* (Díaz-Ramírez *et al.*, 2016). Además, otras investigaciones integraron bases de datos para el desarrollo de una cronología de más de dos especies con resultados positivos, como son los casos de las especies *Pinus*

durangensis Martínez (1942), *Pinus cooperi* C. E. Blanco (1949) y *Pinus lumholtzii* B.L.Rob. & Fernald, para la región de San Dimas Durango (Chávez-Gándara *et al.*, 2017), las especies *P. cembroides*, *Pinus arizonica* Engelm. (1878), *P. durangensis*, *P. lumholtzii*, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, (1950) y *Picea chihuahuana* Martínez., para la región de la cuenca del Río Conchos, Chihuahua (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2019).

Áreas Naturales protegidas y la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda

En México existen 225 Áreas Naturales Protegidas (ANP's), reguladas por la administración gubernamental en turno, su gestión está enfocada a alcanzar objetivos específicos de conservación, tanto del patrimonio natural (como la diversidad de flora y fauna o, zonas hidrológicas) y el patrimonio cultural, que incluye zonas arqueológicas y comunidades autóctonas (Ocampo *et al.*, 2014).

La ANP La reserva de la biosfera Sierra Gorda (SG) forma parte de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental (Rzedowski, 2006) y presenta altitudes que va desde los 200 msnm hasta los 3,300 msnm en su punto más alto, este espacio se distribuye una amplia variedad de ecosistemas como bosques de coníferas, bosques de encino, bosque mesófilo de montaña, matorral xerófilo, selva caducifolia, selva perennifolia y vegetación inducida (INEGI, 2022). Estos ecosistemas ofrecen servicios ambientales clave como son la recarga aguas subterráneas, regulación del clima y la captura de carbono. Asimismo, constituyen una fuente primaria de producción de alimentos y materias primas para las actividades sociales y económicas (CONANP, 2018).

Clima en la Sierra Gorda

Dentro de la SG la precipitación presenta una distribución en el territorio durante todo el año, la cual es mayor en la zona norte (particularmente el municipio de Jalpan de Serra) y recibe entre 1500 y 3500 mm de lluvia al año. En contraste, el resto del territorio registra solo entre 600 y 1500 mm por año (INEGI, 2022). De forma general, la mayor parte de la precipitación ocurre en verano, entre los meses de junio y septiembre, aunque se presentan variaciones en la intensidad tanto al inicio como al final de la temporada (INEGI, 2017) (Fig. 2-B).

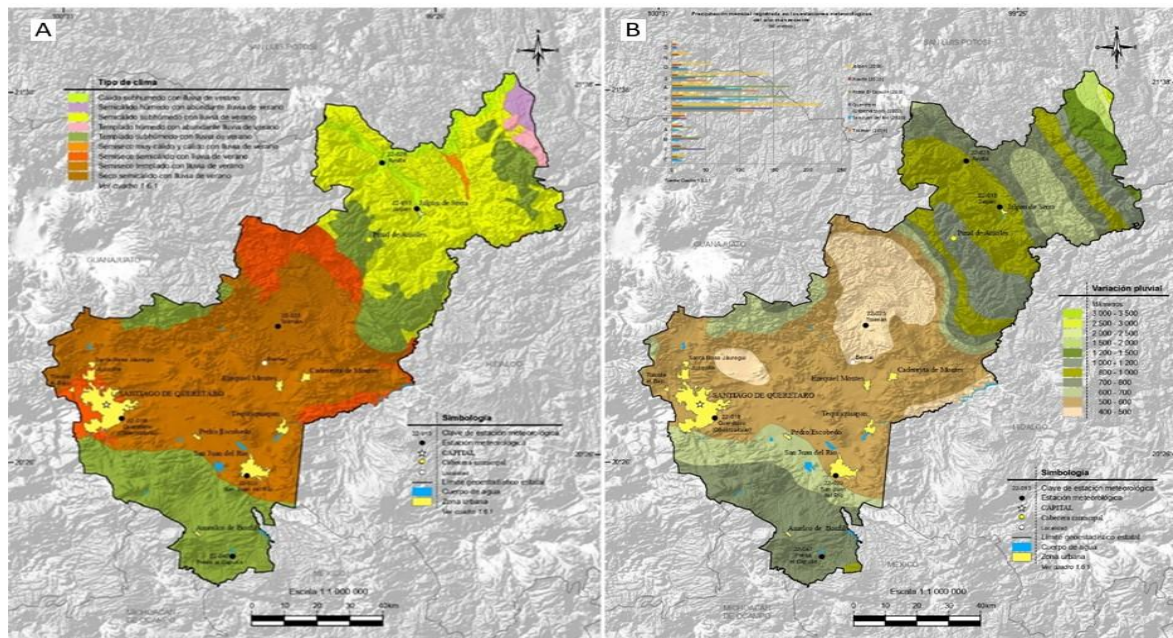


Figura 2. A: tipos de clima y B: distribución de la precipitación del estado de Querétaro. Fuente: INEGI, 2017.

El clima predominante para la región de la SG se ha clasificado de manera general como templado. Sin embargo, en un análisis más detallado el clima predominante en la reserva es cálido subhúmedo y abarca las zonas; centro, este y oeste de la región (INEGI, 2020). El segundo clima predominante es templado subhúmedo y se distribuye en la zona sur y en la porción norte. En menor medida están presentes los tipos de clima cálido subhúmedo y semicálido subhúmedo en secciones proporcionalmente más pequeñas del norte y centro, mientras que el clima templado húmedo se distribuye en las secciones del norte y centro de la reserva (Fig. 2-A) (INE, 1999; INEGI, 2017).

Distribución de pinos en la Sierra Gorda

Los bosques de pinos en la SG forman una comunidad vegetal constituida por diferentes especies del género *Pinus*, asociados a algunas especies de encinos y otras especies. De acuerdo al Programa de manejo de SG, los bosques de pinos cubren una superficie aproximada de 19, 000 ha (INE, 1999).

La distribución de especies de *Pinus* por municipio dentro de la SG ocurre para *P. greggii* en Jalpan de Serra hasta Landa de Matamoros, mientras que en el municipio de Pinal de Amoles se encuentran las especies *Pinus pátula* Schl. et Cham (1831), *P. montezumae*, *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl. y *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. greggii* y *Pinus pinceana* Gordon. Por otro lado, en el municipio de Arroyo Seco se encuentran las especies *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y *P. greggii*, y finalmente, en el municipio de Peñamiller se encuentra la especie *P. cembroides* (INE, 1999; Mendoza-Villa *et al.*, 2018).

Dendrocronología en el estado de Querétaro

En el estado de Querétaro se han realizado estudios dendrocronológicos que han permitido explicar aspectos paleoclimáticos de distinta magnitud y extensión. Un ejemplo es el trabajo desarrollado en el municipio de Amealco de Bonfil, al sur del estado, donde se construyó una cronología de 1,238 años a partir de anillos de crecimiento de ahuehuate (*T. mucronatum*), en el cual, parte de sus conclusiones mencionan que algunos eventos globales han tenido un impacto significativo en el régimen de precipitación de esta zona, desde la época anterior a la conquista española hasta la actualidad (Stahle *et al.*, 2012). Otro estudio con la misma especie reportó sensibilidad a la precipitación estacional. Sin embargo, al intentar integrar resultados de diferentes áreas de estudio ubicadas en Hidalgo, Morelos, Querétaro y el Estado de México, no se obtuvo un resultado positivo (Correa-Díaz *et al.*, 2014). De manera similar, otro trabajo buscó determinar correlaciones entre cronologías de ahuehuate en sitios de Querétaro, el Estado de México y la Ciudad de México. En este caso, tampoco se obtuvieron resultados significativos, atribuyéndose las diferencias a las condiciones climáticas particulares de cada sitio (Villanueva-Díaz *et al.*, 2014).

Finalmente, en el suroeste de la SG se realizó una reconstrucción dendroclimática de 138 años (1877–2014), utilizando dos especies de pinos (*P. greggii* y *P. montezumae*). Este análisis mostró una respuesta estadísticamente significativa ($p \leq 0.001$) a la precipitación estacional de invierno-primavera, e identificó cuatro periodos de sequías intensas y dos de precipitación abundante (Mendoza-Villa *et al.*, 2018). Este estudio constituye el primer acercamiento dendroclimático dentro de la reserva y sienta una base para un análisis más amplio, que permita determinar si cronologías de diferentes especies de pino con distribución dentro de la SG de Querétaro, presentan sincronía en sus patrones de crecimiento y la medida en que se asocian a la variabilidad regional de la precipitación y la temperatura.

Este tipo de análisis dendroclimático proporcionará información importante sobre la SG, como es determinar si hay una diferenciación en la reserva en cuanto a la lluvia como variable de respuesta positiva en el crecimiento de los bosques de pino o si la lluvia estacional de invierno-primavera es igual de importante en la región completa. Además, sentará una base estadística sobre la factibilidad de desarrollar una reconstrucción dendroclimática de la región, que aporte sobre la variabilidad climática histórica en el periodo de vida del arbolado.

HIPÓTESIS

Las especies de pino seleccionadas en la reserva de la biosfera de la Sierra Gorda de Querétaro presentan crecimiento sincrónico en sus patrones de crecimiento anual, significativamente relacionados con la variabilidad climática regional, específicamente con precipitación y temperatura.

OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis dendroclimático en seis sitios en la reserva de la biosfera Sierra Gorda de Querétaro por medio de tres especies de pinos (*P. greggii*, *P. montezumae* y *P. cembroides*) y determinar su relación con variables climáticas, específicamente precipitación y temperatura

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la fecha anual exacta de formación de cada anillo de crecimiento de las muestras dendrocronológicas colectadas.
- Construir cronologías de anillos de crecimiento de cada sitio.
- Construir una cronología regional de acuerdo a la variabilidad común entre los patrones de crecimiento entre sitios y su relación con las variables climáticas.
- Analizar y comparar la relación de la cronología regional con un registro promedio de las variables climáticas de la región, específicamente precipitación y temperatura.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de la región de estudio

La ubicación geográfica de la reserva de la biosfera Sierra Gorda se encuentra entre los paralelos 20° 50' y 21° 45' de latitud norte y los meridianos 98° 50' y 100° 10' de longitud oeste, en la porción centro-norte del estado de Querétaro, México. Además, abarca una superficie de 3, 835.7 km², lo que representa aproximadamente una tercera parte del territorio estatal. Además, colinda al este con el estado de Hidalgo y al oeste con los estados de Guanajuato y San Luis Potosí (INEGI, 2021a). Esta área protegida incluye en su totalidad a los municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, San Joaquín y Landa de Matamoros, y de forma parcial a los municipios de Pinal de Amoles y Peñamiller, con un 88% y 69%, respectivamente (CONABIO, 2008).

Selección de zonas de muestreo

Las zonas de muestreo se seleccionaron con base en criterios de distribución de especies, representatividad regional, parámetros dendroclimáticos y consideraciones generales que se describen a continuación:

- Distribución de bosques de pinos: Se identificaron zonas con cobertura de bosque de pino, así como bosques mixtos de pino-encino y encino-pino (INEGI, 2021), correspondiente a los municipios incluidos en la Sierra Gorda, (Fig. 3).
- Representatividad regional: Con el objetivo de cubrir adecuadamente toda la región, se seleccionaron zonas distribuidas estratégicamente en los sectores norte, sur, este y oeste (Fig. 3).
- Clima: Se empleó el mapa de climas del estado de Querétaro (INEGI, 2017) para seleccionar sitios ubicados en distintas zonas climáticas dentro de la reserva, con el fin de representar la variabilidad climática regional (Fig. 2A).
- Sitio complementario: Se consideró como primer sitio establecido a La estación de microondas La Pingüica, en el municipio de Pinal de Amoles (suroeste de la reserva),

ya que se cuenta con la base de datos original, generada con fines dendroclimáticos mediante técnicas compatibles (Mendoza-Villa *et al.*, 2018).

- Nombre de referencia: A cada zona de muestreo se le asignó el nombre de una comunidad cercana para facilitar su identificación.

En total se establecieron seis zonas de muestreo:

1. Zona sur: Tepozán, municipio de Cadereyta de Montes (Tcm-CM) (Fig. 3 morado).
2. Zona suroeste: Cuatro Palos, municipio de Pinal de Amoles (Cpa-PA) (Fig. 3 verde).
3. Zona este: El Madroño, municipio de Landa de Matamoros (Mad-LM) (Fig. 3 café).
4. Zona norte: San Juan de los Durán, municipio de Jalpan de Serra (Sjd-JS) (Fig. 3 negro).
5. Zona oeste: El Tepozán, municipio de Arroyo Seco (Tep-AS) (Fig. 3 azul).
6. Zona noroeste: La Pingüica, municipio de Pinal de Amoles (Pin-PA) (Fig. 3 rojo).

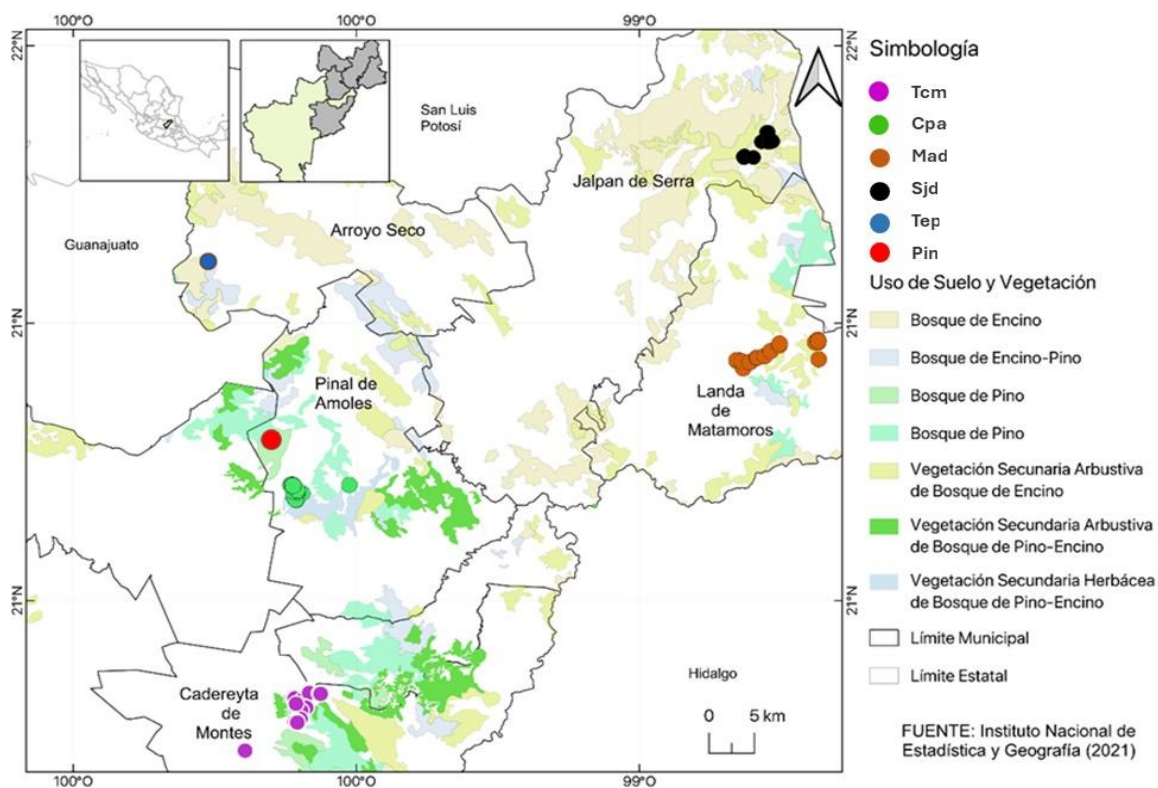


Figura 3. Tipos de vegetación y distribución de las zonas de colecta de muestras en los municipios de la Sierra Gorda de Querétaro, México: Tcm: Tepozán, Cadereyta de Montes (morado), Cpa: Cuatro palos, Pinal de Amoles (verde), Mad: El madroño, Landa de Matamoros (naranja), Sjd: San Juan de los Durán, Jalpan de Serra (naranja) y Tep: El Tepozán, Arroyo Seco (azul), Pin: La Pingüica, Pinal de Amoles (rojo). Elaboración propia.

Especies de pinos seleccionadas

Se seleccionaron tres especies del género *Pinus* con distribución dentro de la reserva: *P. greggii*, *P. montezumae* y *P. cembroides* (INE, 1999), ya que estas especies han sido documentadas en estudios previos y han mostrado sensibilidad adecuada para análisis dendroclimáticos (García-G *et al.*, 2004; Cortés-Barrera *et al.*, 2012; Cardoza-Martínez *et al.*, 2014; Mendoza-Villa *et al.*, 2018; Pérez y Helber, 2021). Se describen las características generales de cada especie a continuación:

Pinus greggii Engelm. ex Parl. (1848): Conocida comúnmente como “pino prieto” o “pino ocote”, es endémica de las zonas semiáridas y semitropicales de México, y forma poblaciones aisladas (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005). En la zona norte de la Sierra Madre Oriental (SMO), se presenta la variedad *P. greggii* var. *greggii*. Por otro lado, en la zona sur se encuentra la variedad *P. greggii* var. *australis*. Finalmente, dentro de la SG se han identificado tres poblaciones: dos al noreste y una al sureste (Donahue y López, 1999).

Las características anatómicas para su identificación en campo son (CONAFOR-CONABIO, 2024a):

- Corteza: delgada y lisa en individuos jóvenes, de color verde oscuro a grisáceo y esta se vuelve más oscura, áspera y agrietada con la edad.
- Acículas (hojas): estas se encuentran en fascículos de tres, son largas (8-15 cm), de color verde claro a verde-azulado y son colgantes como un péndulo.
- Conos (piñas): estos son alargados, cónicos, frecuentemente curvados (7-15 cm) y se presentan en grupos (generalmente de 3 a 5) y persisten cerrados en las ramas durante varios años.

Los requerimientos ambientales de esta especie son los siguientes (CONAFOR-CONABIO, 2024a):

- Altitud: entre 1400 y 3000 msnm, con un óptimo en torno a los 1850 m.s.n.m.
- Temperatura: de -9 °C a 45 °C, con un rango óptimo de 14 °C a 17 °C.
- Precipitación: entre 500 y 2900 mm anuales, con un óptimo entre 900 y 1200 mm/año.

Pinus montezumae Lamb. (1832): Llamado también “pino blanco” u “ocote”, es una especie endémica de México que se distribuye en regiones templadas y subhúmedas del país.

Las características anatómicas para su identificación en campo son (CONAFOR-CONABIO, 2024b):

- Corteza: es gruesa y áspera de color café-rojizo cuando madura, presenta surcos profundos.
- Acículas (hojas): estas se encuentran en fascículos de cinco, son de color verde oscuro y presentan los bordes aserrados, miden de 11 a 20 cm de longitud, son delgadas y flexibles.
- Conos (Piñas): son cónicos a ovoides, miden de 22 a 37 cm de largo, se presentan a menudo colgantes, son de color amarillo a café oscuro y producen mucha resina.

Sus requerimientos ambientales son (CONAFOR-CONABIO, 2024b):

- Altitud: de 1150 a 3200 msnm, con un óptimo a 2500 m s.n.m.
- Temperatura: entre -9 °C y 45 °C, con un rango óptimo de 10 °C a 24 °C.
- Precipitación: entre 800 y 1500 mm/año, con un óptimo alrededor de los 800 mm/año.

Pinus cembroides Zucc. (1832): Conocido comúnmente como “pino piñonero”, es otra especie endémica de México, con amplia distribución en zonas semiáridas templadas, especialmente en la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y el altiplano central y forma grandes extensiones de bosque en estas regiones (Fuentes-Amaro *et al.*, 2019).

Las características anatómicas para su identificación en campo son (CONAFOR-CONABIO, 2024c):

- Corteza: es de color café-rojiza a casi negra, presenta fisuras profundas y desprende escamas más pequeñas.

- Acículas (hojas): se encuentran en fascículos de 2 a 3, miden de 3 a 10 cm de longitud, son de color verde oscuro a azul.
- Conos (piñas): son subglobosos y alcanzan diámetros de entre 5 y 6 cm de ancho, se presenta en un pedúnculo poco visible, pueden presentarse de forma aislada o en grupos de hasta 5 conos. Una característica a considerar es que los conos son de color verde-anaranjados a rojizos cuando maduran y tienden a desprenderse de las ramas con facilidad.

Sus requerimientos ambientales son (CONAFOR-CONABIO, 2024c):

- Altitud: de 1350 a 2800 msnm, sin un registro preciso de altitud óptima.
- Temperatura: entre 7 °C y 45 °C, sin una temperatura óptima claramente establecida.
- Precipitación: de 360 a 800 mm anuales, con un óptimo alrededor de 450 mm/año.

La distribución de las especies seleccionadas dentro de las zonas de muestreo ocurre de la siguiente forma: *P. greggii* se distribuye en todos los sitios a excepción de Tcm, mientras que de *P. cembroides* solo se registra en Tcm y *P. montezumae* se encuentra en los sitios Cpa y Pin. Por otro lado, Tcm es el único sitio que presenta un tipo de clima semiseco templado, mientras que Mad, Sjd y Tep presentan un clima semicálido sub-húmedo, y Pin y Cpa que se encuentran en el mismo municipio, presentan un clima templado sub-húmedo (INE, 1999).

El rango altitudinal cubre mil metros aproximadamente y el sitio a mayor altitud es Pin y se encuentra a 3000 msnm, mientras que los que se encuentran a menor altitud son Sjd a 1298 msnm, seguido por Mad y Tep en el mismo intervalo, con 1870 y 1817 msnm, respectivamente. Mientras que los sitios Tcm y Cpa se encuentran en un intervalo promedio de 2321 y 2624 msnm (Cuadro 1).

Cuadro 1. Información general sobre los sitios seleccionados.; El tepozán, Cadereyta de Montes (Tcm); Cuatro palos, Pinal de Amoles (Cpa); El Madroño, Landa de Matamoros (Mad); San Juan de los Durán, Jalpan de Serra (Sjd); Tepozán, Arrollo Seco (Tep) y La Pingüica, Pinal de Amoles (Pin).

Localidad	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)	Tipo de clima	Vegetación	Especies de <i>Pinus</i>
Tcm	20°53'39.4"N	20°53'39.4"W	2321	Semiseco templado	Bosque de pino-encino	<i>cembroides</i>
Cpa	21° 07'10.9"N	21°07'10.9"W	2624	Templado sub-húmedo	Bosque de encino-pino	<i>greggii</i> <i>montezumae</i> <i>cembroides</i>
Mad	21° 17' 8.6" N	21°17'08.6"W	1870	Semicálido sub-húmedo	Bosque de pino-encino	<i>greggii</i>
Sjd	21° 25'50.9"N	21°28'15" W	1298	Semicálido sub-húmedo	Bosque de encino-pino	<i>greggii</i>
Tep	21°21'56.9"N	21°21'56.9"W	1817	Semicálido sub-húmedo	Bosque de encino-pino	<i>greggii</i>
Pin	21°09'27.5"N	21°09'27.5"W	3000	Templado sub-húmedo	Bosque de pino-encino	<i>greggii</i> <i>montezumae</i>

Selección de ejemplares

La toma de muestras se realizó de manera selectiva, ya que los árboles deben ser aptos para la obtención de núcleos de crecimiento con fines dendroclimáticos (Villanueva-Díaz *et al.*, 2009). La selección se basó en las siguientes características:

- Pertenencia a una de las tres especies de *Pinus* previamente establecidas.
- Árboles con fustes rectos, sin golpes, cicatrices ni deformaciones visibles.
- Ubicación preferentemente aislada, a una distancia aproximada de 20 metros respecto a otros ejemplares.
- Condiciones de estrés hídrico: suelos rocosos o someros, con pendiente pronunciada y sin presencia evidente de fuentes adicionales de humedad (como escurrimientos, arroyos o sombra densa).

Extracción de núcleos de crecimiento

Para la extracción se emplearon taladros de *Pressler* (barrenos forestales) de la marca *Haglöf®* (Fig. 4A), en dos presentaciones: uno de 5 mm de diámetro y 50 cm de largo, y otro de 12 mm de diámetro y 45 cm de largo. Los cuales son desarmables lo que permite ser transportados y asegurados fácilmente (Fig. 4B). Estos al ser presionados y girados en sentido de las manecillas del reloj, se van introduciendo al interior del tronco del árbol, lo que permite extraer un núcleo de crecimiento del interior del árbol, con una parte del taladro llamada bayoneta, de tal forma poder extraer un núcleo de crecimiento del árbol seleccionado (Fig. 4C-D).

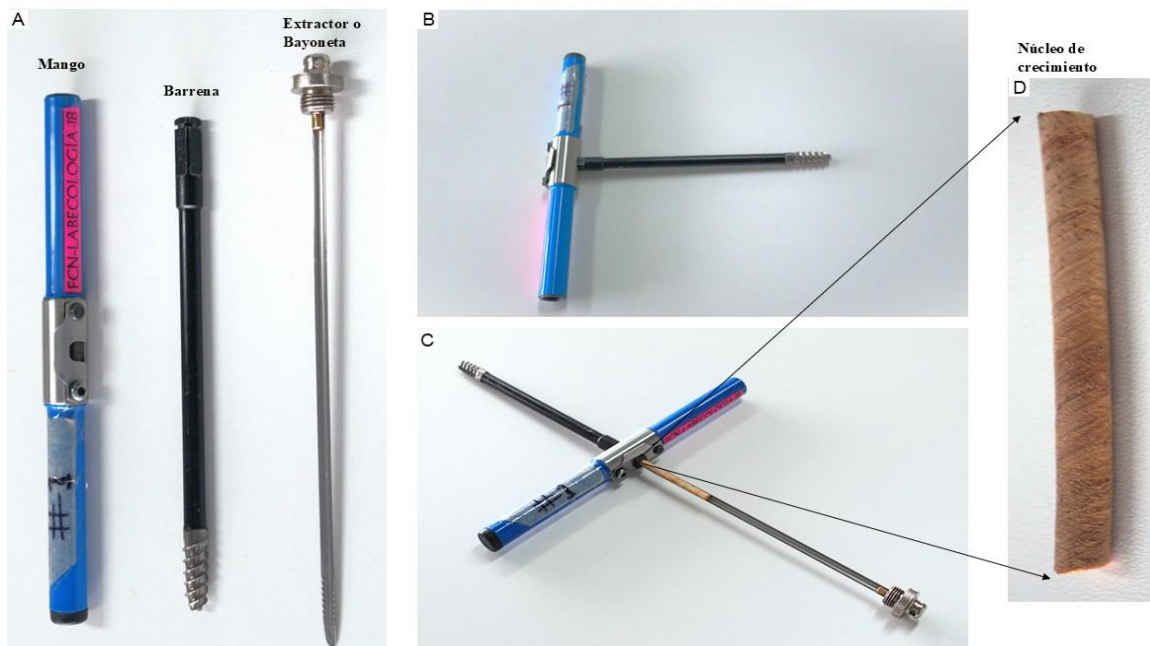


Figura 4. A: Partes de un Taladro de Presler, marca Haglöf®; B: Taladro armado; C: Extracción de un núcleo de crecimiento (C y D) (Imágenes propias).

Con base en el cálculo del tamaño mínimo de muestra, así como en lo reportado por estudios dendrocronológicos similares (Cerano-Paredes *et al.*, 2011-A; Gómez *et al.*, 2015), se determinó la toma de muestras de un rango de 20 a 30 árboles por sitio. A cada árbol se le obtuvieron de dos a tres núcleos de crecimiento, dependiendo de las condiciones meteorológicas durante la colecta, la facilidad o dificultad de ingreso a las zonas de muestreo, la localización de ejemplares adecuados y del proceso de extracción de cada muestra.

Las muestras se extrajeron sobrepasando la mitad del diámetro del fuste del árbol, con el fin de obtener los anillos de crecimiento del centro del árbol (Fig. 5A). Una vez obtenida la muestra, se retiró cuidadosamente la porción final que excedía el centro, procurando mantener intacta la sección central. Esta última se utilizó para taponar el orificio de extracción, el cual posteriormente fue sellado con resina natural del mismo árbol (Fig. 5C-D).

Durante la perforación, se monitoreó constantemente la resistencia al giro del taladro. Un aumento significativo en la fricción indicaba posibles obstrucciones internas, como acumulaciones de resina o nudos (Fig. 5B). En tales casos, se detuvo la perforación para evitar fracturas en el barreno y se seleccionó un nuevo punto de extracción, siguiendo las recomendaciones metodológicas de Villanueva-Díaz *et al.*, (2009).

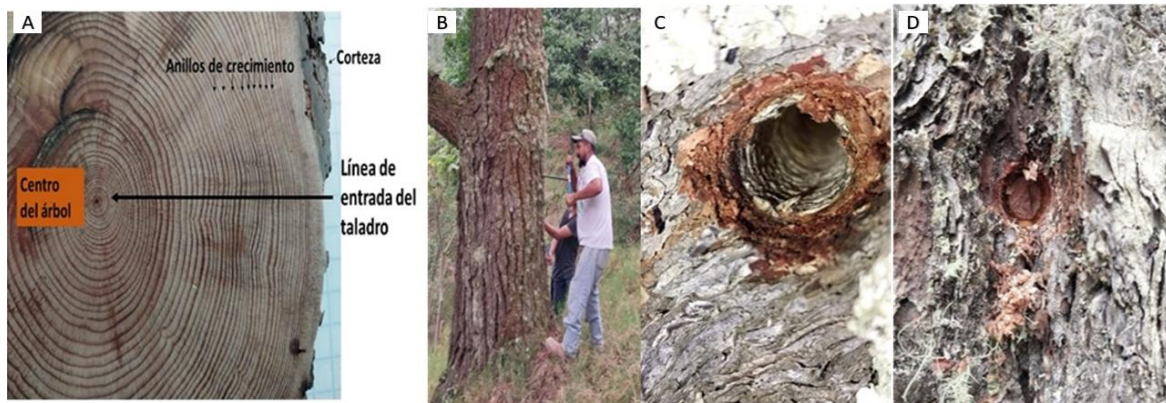


Figura 5. A: selección de zonas de toma de muestras en el fuste del árbol; B: extracción de muestras con taladro de Pressler; C orificio de extracción de muestra; D orificio de extracción de muestra con tapón de la última parte de la muestra (Imágenes propias).

Registro de datos

De cada árbol seleccionado se registró la siguiente información: nombre del sitio de referencia, fecha de muestreo, código alfanumérico asignado a la muestra y al árbol (Ejemplo: 3-a, 3-b, 3-c, 4-a, 4-b ...30-c), especie, coordenadas geográficas, altitud y el diámetro del fuste a la altura del pecho (DAP), medido a 1.30 m sobre el nivel del suelo. En casos particulares, también se documentaron condiciones biológicas o físicas que pudieran afectar el crecimiento de acuerdo por los criterios propuestos aquí, según Villanueva-Díaz *et al* (2009).

Resguardo de muestras

Las muestras obtenidas con el taladro de 5 mm de diámetro fueron resguardadas en popotes de plástico previamente perforados, con el fin de permitir la ventilación y evitar el desarrollo de hongos por acumulación de humedad. Mientras que las muestras extraídas con el taladro de 12 mm fueron envueltas en papel periódico (Fig. 6B).

Ambos tipos de muestra fueron sellados en sus extremos para prevenir desplazamientos o pérdida de material y se etiquetaron con un código alfanumérico que incluyó: la abreviatura del sitio de colecta, el número de árbol, la letra correspondiente a la muestra (a, b o c), la fecha de recolección y la especie correspondiente (Villanueva-Díaz *et al.*, 2009). Además, como complemento al registro se recolectaron también muestras de hojas y conos de los pinos muestreados en cada sitio, con el propósito de verificar que pertenecieran a una de las especies seleccionadas (Fig. 6A).

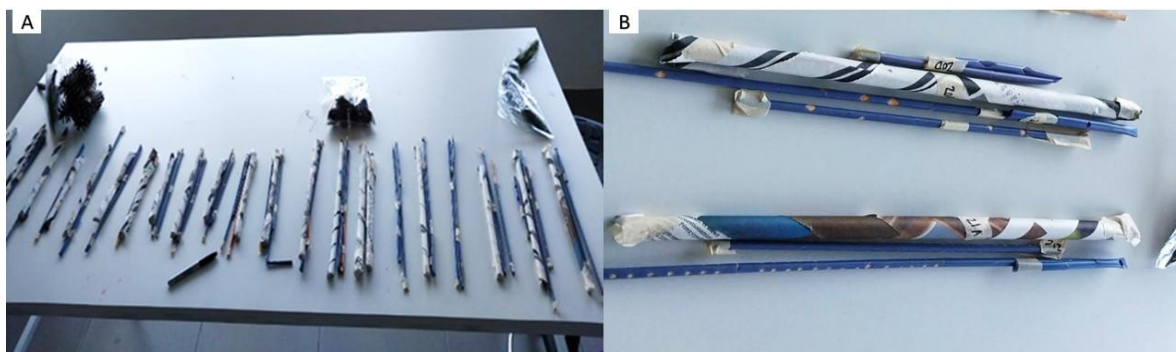


Figura 6. **A:** colección de muestras dendrocronológicas de un sitio específico, junto con muestras de hojas y conos de los pinos muestreados; **B:** resguardo de muestras dendrocronológicas de 8 y 12 mm de diámetro (Imágenes propias).

Preparación de muestras

Cada muestra fue montada y adherida sobre un carril de madera acanalado, asegurando que las traqueidas (células de conducción) quedaran orientadas en posición vertical respecto a la base del carril. El carril fue rotulado con los datos identificativos de la muestra (Fig. 7A) y posteriormente la muestra se fijó con pegamento para madera, manteniéndola en su lugar mediante cinta adhesiva de papel (Villanueva-Díaz *et al.*, 2009).

Una vez seco el adhesivo, se retiró la cinta y se procedió al desbaste de la superficie con una lijadora orbital, eliminando aproximadamente un tercio del volumen horizontal de la muestra (Fig. 7A). Este proceso se realizó en etapas sucesivas utilizando lijas de diferente granulometría: comenzando con lijas de grano grueso (120) y finalizando con lijas de grano fino (800 y 1200). El objetivo fue obtener una superficie pulida que permitiera resaltar con claridad las estructuras de crecimiento anual, facilitando así la observación y análisis bajo microscopio estereoscópico (Fig. 7B) (Stokes y Smiley, 1968).

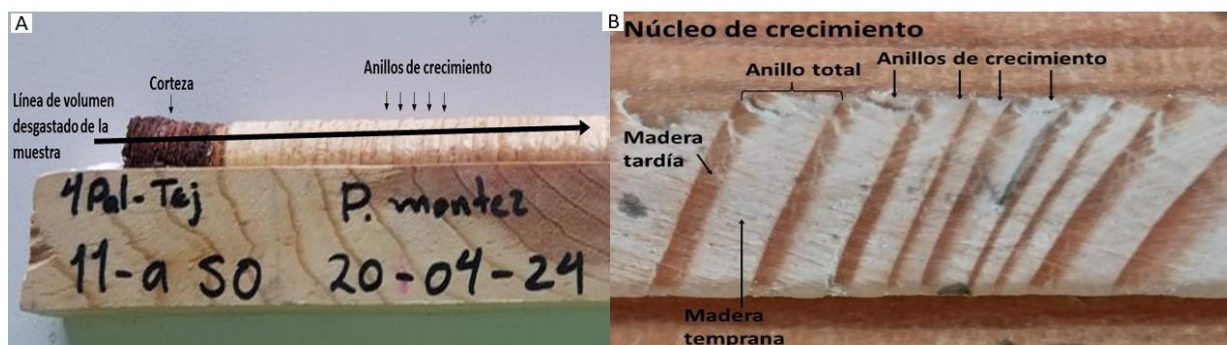


Figura 7. A: vista lateral de muestra pegada sobre carril de madera y línea de desgaste de la muestra; **B:** vista aérea de muestra después del proceso de lijado y pulido, se resaltan las estructuras de crecimiento anual (Imágenes propias).

Datación de núcleos de crecimiento

El proceso de datación de los núcleos de crecimiento comenzó con el pre-fechado, el cual consistió en asignar una fecha inicial a cada anillo de crecimiento, con el fin de facilitar su posterior medición y verificación mediante el software COFECHA®. En esta etapa se realizó un conteo sistemático de los anillos desde el extremo interno de la muestra (más cercano al centro del árbol) hacia la corteza, aplicando el siguiente sistema de notación (Villanueva-Díaz *et al.*, 2009) (Fig. 8A):

- Un punto cada 10 anillos.
- Dos puntos verticales cada 50 anillos.
- Tres puntos verticales cada 100 anillos.
- Anillos falsos (difusos o poco marcados) se cancelaron con una línea diagonal.
- Microanillos (muy estrechos) se marcaron con dos puntos paralelos.
- Anillos perdidos (no visibles) se indicaron con dos puntos en diagonal donde se estima su posición.
- Posteriormente, se aplicó la técnica de *Skeleton Plot* (gráfico esquelético), la cual permitió visualizar y comparar patrones de crecimiento entre muestras. Esta técnica se implementó de la siguiente manera:

- Se prepararon tiras de papel milimétrico de 3 cm de ancho, con la longitud correspondiente a cada muestra (Fig. 8C).
- Se registraron los datos de la muestra en el extremo izquierdo.
- Se marcaron intervalos de 10 años en la parte superior del gráfico.
- Se representaron los anillos más estrechos con líneas cortas y los más anchos con líneas largas, seleccionando de 2 a 3 anillos destacados por década (Fig. 8C).

Una vez graficadas de un tercio a la mitad de las muestras de cada sitio, se compararon entre sí para identificar patrones de crecimiento común y detectar anillos falsos, suprimidos o errores de conteo. Este análisis gráfico facilitó la corrección del prefecchado, confirmando anillos ausentes o adicionales según el patrón compartido entre árboles (Fig. 8A-B-C).

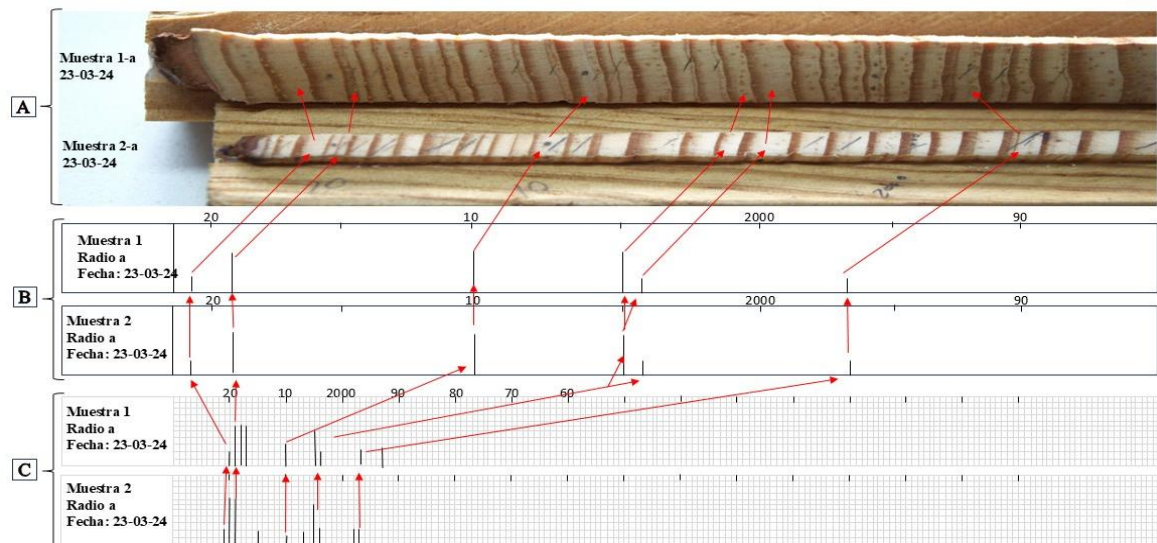


Figura 8. Prefecchado de núcleos de crecimiento por medio de la técnica *Skeleton plot* (gráficos de crecimiento). **A:** comparación de anillos de crecimiento entre dos muestras; **B:** Patrón de crecimiento de ambas muestras; y **C:** Gráficos de crecimiento en los que se marcan los anillo más grandes y delgados (Imágenes propias).

Este procedimiento permitió establecer ritmos de crecimiento coincidentes dentro de un mismo árbol, entre árboles de un mismo sitio y entre distintos sitios, posibilitando así la asignación preliminar de fechas más acertadas a los anillos de crecimiento de cada muestra.

Medición de anillos de crecimiento

Una vez asignada una fecha inicial a cada anillo de crecimiento (Fig. 9A-B), se procedió a la medición de anillos de cada muestra por medio del sistema Velmex, el cual puede realizar mediciones con una precisión de 0.001 mm. Este sistema está conectado a una platina de fase deslizante y un microscopio estereoscópico con un aumento de 35x (Fig. 9D).

Cada anillo de crecimiento se midió en tres fases; madera temprana (de tono claro) y madera tardía (de tono oscuro), conformando la suma de ambas mediciones el diámetro del anillo completo (anillo total) (Fig. 9C), de forma que se obtuvieron tres mediciones. Las mediciones fueron registradas con el software *Measure J2X* y se generaron tres bases de datos de cada muestra, a las cuales se les denomina “series” (Cerano-Paredes *et al.*, 2022).

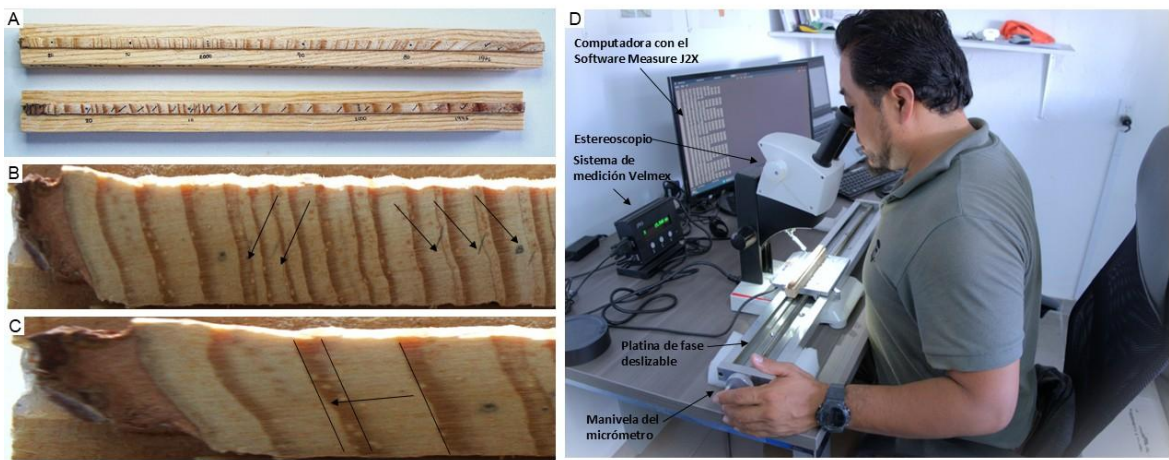


Figura 9. A: Núcleos de crecimiento con notación prefachado; B: Señalización de anillos falsos; C: Sentido de la medición de un anillo de crecimiento, de madera temprana, madera tardía y anillo total, y D: Partes del equipo de medición Velmex y proceso de medición (imágenes propias).

Revisión de la datación

Por medio del software *COFECHA*® se realizó el control de calidad del pre-fechado, por medio de una revisión estadística, orientada a verificar y determinar posibles errores de datación o de medición. Los parámetros utilizados fueron los preestablecidos en el programa, los cuales presentan un 99% de confianza estadística ($p < 0.01$) y un valor mínimo de correlación significativa ($r = 0.33$) (*Laboratory of Tree-Ring Research*, 2023-a).

El proceso se realizó con la base de datos de medición de “anillo total” de las muestras, en la cual el programa realiza una transformación logarítmica a cada serie temporal, donde la varianza de baja frecuencia se elimina mediante una línea de suavizado cúbico (*Spline*) y se aplica un modelado autorregresivo para evaluar equitativamente las diferencias proporcionales de las diferentes series. Así, el programa realiza un análisis estadístico comparativo de cada serie individual, generando valores de correlación en secciones de 50 años, con un traslape cada 25 anillos. Este proceso permite evaluar cada serie independientemente de la longitud y tendencia de crecimiento (Holmes, 1983). El resultado es un valor de correlación con significancia estadística ($p < 0.01$), calculado entre las mediciones de ancho de anillo establecidas con la misma fecha de formación y con la totalidad de series, con el objetivo de establecer el grado de sincronía entre series (Cerano-Paredes *et al.*, 2022).

El programa genera un reporte como archivo de salida del que muestra resultados como generalidades de cada análisis, un histograma de cada serie y una serie maestra, la cantidad de anillos ausentes, el valor de correlación por segmento de cada serie con respecto a la serie maestra, los problemas potenciales y estadísticos descriptivos, el resumen muestra el número de series datadas, periodo, cantidad de años, intercorrelación promedio entre series (valor de referencia: $r = 0.50$) que es una medida de la similitud entre las series, así como de la sensibilidad media entre estas (valor de referencia: $r = 0.20$) que es una medida de la variabilidad promedio entre series, más dos secciones que son de gran utilidad para corregir los posibles errores de fechado (Constante-García *et al.*, 2009-A).

Además, presenta valores de correlación de cada serie por segmentos, en intervalos de 50 años comparada con el resto. De los valores de correlación entre muestras, presenta un apartado de “problemas potenciales”, con cinco posibles diagnósticos, los cuales presentan recomendaciones para eliminar o agregar anillos directamente en la muestra (Constante-García *et al.*, 2009-A).

Las muestras cuyos valores de correlación resultaron bajos fueron reexaminadas para descartar errores en el conteo inicial, en la medición, en la diferenciación de anillos falsos y verdaderos, en la presencia de microanillos o anillos perdidos, y en la determinación de crecimientos homogéneos o supresión de crecimientos anuales atribuibles a las condiciones específicas de cada sitio de colecta (factores bióticos o abióticos). Así, una vez revisado el factor por el cual posiblemente se obtuvo un valor bajo de correlación se midieron nuevamente las muestras e incorporaron a la base de datos del sitio para volver a correr el análisis de correlación y observar si corregido el posible problema, aumenta o disminuye el valor de correlación. Este procedimiento se aplicó en todas las muestras que resultaron con valores bajos de correlación, de esta forma se verificó y corrigió el prefchado (Villanueva-Díaz *et al.*, 2010-b).

Una vez datadas correctamente las muestras de los cinco sitios, se integró una base de datos general, a la que se añadió la base de datos del sitio de La Pingüica del municipio de Pinal de Amoles.

Generación de cronologías

Las series derivadas del cada sitio, presentan características propias, principalmente las diferentes edades de cada individuo ligado con la tendencia biológica propia de la edad. Por ejemplo, en individuos viejos una tendencia negativa exponencial y en individuos jóvenes los primeros anillos serán proporcionalmente más anchos que los últimos en formarse. Este fenómeno dificulta la comparación entre series de individuos de diferentes edades, por lo que la estandarización de dichas series disminuye la variabilidad de las tendencias de crecimiento, permite homogeneizar esa variabilidad de crecimientos, haciéndolas comparables unas con otras (Villanueva-Díaz *et al.*, 2010).

De acuerdo a lo anterior, se generó un índice de ancho de anillo (IAA) estandarizado para cada uno de los sitios de trabajo y para cada una de las tres mediciones de ancho de anillo: madera temprana, madera tardía y anillo total. Esto se realizó por medio de software Estandarización Autorregresiva (*ARSTAN*®, por sus siglas en inglés) (Cook y Kairiukstis, 2013). Este software realiza una discriminación entre las variables que no están relacionadas con el clima, es decir, aquellas que intervienen en el crecimiento debido a la fisiología de la especie como son la edad (visto como una disminución gradual de los crecimientos anuales por mayor diámetro del fuste), el estrés causado por plagas, el crecimiento promedio por especie, etcétera (Villanueva-Díaz *et al.*, 2010-b).

El proceso de estandarización se conoce como *detrending* y elimina las tendencias de crecimiento con la aplicación de modelos matemáticos de acuerdo a la tendencia de crecimiento de cada árbol, como son la curva exponencial negativa, la curva flexible, la línea recta con tendencia positiva o negativa, según sea el caso, para aplicar una estimación al restar el valor de cada anillo al valor medio de cada función y dividirlo entre su desviación estándar (Villanueva-Díaz *et al.*, 2010-b), de forma que se pueden graficar y comparar las cronologías de árboles con diferentes rangos de edad (Fritts, 1976; Constante-García *et al.*, 2009-A).

El software genera tres versiones del IAA, las cuales son las cronologías; Estándar, Residual y Arstan. Estas resultan en la amplificación del crecimiento común y minimización del ruido (tendencias de crecimiento) (Cook y Holmes, 1999; *Laboratory of Tree-Ring Research*, 2023-b).

- La cronología Estándar se genera del proceso de *detrending* y de estandarización del programa *ARSTAN* y en esta se conserva la señal común entre árboles, las tendencias generalizadas entre series, autocorrelación entre series y sirve para visualizar la señal de baja frecuencia, útil en relaciones climáticas sostenidas o de larga duración (ejemplo: estaciones o efecto continuo en un conjunto de meses) (Cook y Holmes, 1999).
- La cronología Residual se genera a partir de los residuos de los modelos autorregresivos aplicados en la estándar. Esta elimina la autocorrelación entre series

y destaca la señal de alta frecuencia, útil en relaciones climáticas de efecto inmediato (ejemplo: eventos climáticos puntuales como lluvias, sequías o heladas) (Cook y Holmes, 1999).

- La cronología Arstan se general al final e incluye ambos procesos de la Estándar y la Residual, ya que combina el *detrending*, el modelo autorregresivo de los residuales de los que hace una restauración selectiva de los componentes de baja frecuencia. Esta robustece la señal común y optimiza la señal climática (Cook y Holmes, 1999).

Análisis de función de respuesta climática por sitio

Obtención de variables climáticas

Se realizó un análisis de respuesta de las cronologías de cada sitio hacia las variables climáticas de precipitación y temperatura de cada zona. Sin embargo, la Sierra Gorda de Querétaro es una región donde algunas de las zonas de muestreo se encuentran lejos de estaciones meteorológicas activas y algunas presentan secciones de varios años sin información (SMN, 2025). Debido a lo anterior, *ERA5-Land* fue seleccionada como una fuente de datos climáticos alternativa con respaldo fiable, al ofrecer datos integrados que combinan observaciones reales con modelos numéricos para generar series completas y con cobertura espacial continua.

ERA-5Land, fue desarrollado por el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos de Mediano Plazo. Este conjunto de datos climático presenta un registro continuo y actualizado desde 1950 hasta 2023, con una resolución espacial de 9 x 9 km y permite realizar una representación homogénea de las condiciones climáticas a nivel regional (ECMWF, 2024). Además, *ERA5Land* ha presentado mejoras a través de los años, demostrando alta consistencia en los resultados de tendencias de temperatura a largo plazo, lo que aumenta su fiabilidad para su uso en estudios climáticos (Muñoz-Sabater *et al.*, 2021; Yilmaz-M, 2023).

A partir de las coordenadas geográficas de cada sitio de colecta, se extrajeron datos mensuales de las variables de precipitación (Prec), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima

(Tmin) y temperatura media (Tmed), mediante la plataforma *Google Earth Engine* (GEE), como un conjunto de datos de reanálisis climático de *ERA-5Land*. Las unidades de origen de las variables de precipitación fueron obtenidas en metros (m) y las de temperatura en grados kelvin (°K), las cuales fueron convertidas a milímetros (mm) y grados Celsius (°C), respectivamente.

Análisis de correlación

Para determinar la relación entre el crecimiento anual del arbolado de cada sitio y la variación de la temperatura y la precipitación, se realizó un análisis de correlación de *Pearson*. Este se realizó de forma cruzada entre los valores de las variables climáticas seleccionadas y las cronologías de cada sitio, tanto para madera temprana, madera tardía y anillo total; en sus tres cronologías (Estándar, Residual y Arstan).

Para determinar qué cronología se correlaciona mejor con qué variable climática y periodo de ésta, se construyeron bases de datos mensuales por sitio y con estas una base de datos regional a partir de la suma de los valores de precipitación y del promedio de los valores de temperatura de la siguiente forma:

- Mensual (Men), comenzado en enero y terminando en diciembre.
- Acumulado mensual (Acu), enero-febrero, enero-febrero-marzo, enero-febrero-marzo-abril y así sucesivamente hasta enero-...-diciembre.
- Estacional (Est), de acuerdo a los meses que integran a las estaciones; primavera (Prim): marzo, abril, mayo; verano (Ver.; junio, julio y agosto); otoño (Oto.; septiembre, octubre y noviembre); e invierno (Inv.; diciembre, enero y febrero).

Análisis de variabilidad común entre series

Determinación de sincronía de crecimiento

Se determinó la existencia de sincronía de crecimiento entre series, en la cual se integraron las bases de datos de ancho de anillo total de los seis sitios en una sola. Posteriormente, por medio del software *R*®, versión 4.4.2, utilizando los paquetes *readxl*; para la lectura de archivos en Excel, *dplyr*; para la manipulación de la base de datos, *ggplot2*; para generar gráficos de crecimiento y *DataExplorer*; para generar reportes de salida (*R Core Team*, 2023), se graficaron los crecimientos anuales, en forma de valores estandarizados de todas las series a lo largo del período completo, desde la fecha más reciente hasta la más antigua. Esto para visualizar patrones de crecimiento común en periodos concretos (Cerano-Paredes *et al.*, 2022).

Correlación entre series

Posteriormente, se realizó un segundo análisis para determinar la magnitud de la relación lineal entre el crecimiento de las series de los seis sitios. De la misma forma, se utilizó el software *R*®, versión 4.4.2 y su paquetería de *readxl*; para la lectura de archivos en Excel, *dplyr*; para la manipulación de la base de datos, *corrplot*; para generar gráficos de correlación y *DataExplorer*; para generar reportes de salida (*R Core Team*, 2023), con los cuales se analizaron las bases de datos de ancho de anillo total de los seis sitios y se determinó el grado de correlación entre series (Cerano-Paredes *et al.*, 2022).

Análisis de componentes principales

Se realizó un análisis de componentes principales (APC), mediante el software *R*®, versión 4.4.2 y su paquetería de *readxl*; para la lectura de archivos en Excel, *dplyr*; para la manipulación de la base de datos, *FactoMineR*; para generar el análisis de componentes principales y *DataExplorer*; para generar reportes de salida (*R Core Team*, 2023). Con el objetivo de establecer si la variabilidad de ancho de anillo presenta un comportamiento regional, sin perder la mayor parte de la información posible, esto con las bases de datos de ancho de anillo total de los seis sitios, para sintetizar la información expresada por el número

de mediciones, series y sitios. Así, los componentes generados son independientes entre sí y representan una combinación de las variables originales. La generación de los componentes se realizó de tal forma que el CP1 integrará la mayor proporción posible de la variabilidad original (ancho de anillo) y el CP2 integró la máxima variabilidad posible no incluida en el primero y así sucesivamente (Grané, 2002). De tal forma, fue posible establecer la proporción de la varianza entre los componentes.

Generación de cronología regional

Una vez determinada la variabilidad común de ancho de anillo entre los seis sitios, para mejorar la calidad de la cronología regional se determinó qué series presentan los mejores valores de intercorrelación. Así, por medio del software *COFECHA*® y con las bases de datos de ancho de anillo total de los seis sitios, se seleccionaron las series con valores estadísticamente significativos ($p < 0.01$; $r \geq 0.33$), mientras que las series y los periodos que presentaron baja correlación fueron eliminadas de la base de datos. Finalizado este proceso de procedió a eliminar las mismas series y periodos de las bases de datos de madera temprana y madera tardía (Cerano-Paredes *et al.*, 2022).

Se estableció el periodo mejor representado y con buen sustento estadístico tomando en cuenta la cantidad de series correspondientes a cada periodo y la sincronía entre estas (Gutiérrez, 2009), ya que cada serie tiene diferente longitud, año de inicio y termino. Además de que algunas presentan un año de inicio y termino diferente, ya que algunas series no pudieron ser datadas por completo, por lo que solo un intervalo del periodo estuvo representado en algunas de las series. De tal forma, se combinaron estas series para crear una cronología regional. La variabilidad de cada serie se dividió en dos partes; variabilidad común y ruido. La variabilidad común es la parte compartida por la mayoría de las series y el ruido es la parte que es única de cada serie. Así, al promediar los valores de las series, la variabilidad común se mantiene y el ruido se reduce (Cerano-Paredes *et al.*, 2022).

Por medio del software *R*®, versión 4.4.2 y su paquetería de *readxl*; para la lectura de archivos en Excel, *dplyr*; para la manipulación de la base de datos y *DataExplorer*; para

generar reportes de salida (*R Core Team, 2023*) y la base de datos de anillo total se determinó el periodo mejor representado con un número de muestras estadísticamente significativo. Así, se graficó el IAA y el tamaño de muestra (n) en el periodo completo de las series. Además, se determinaron los estadísticos de la medida de la autocorrelación entre series (R_{bar}) y la señal expresada por la población (EPS) para la serie regional (*Wigley et al., 1984*).

Análisis de función de respuesta climática regional

De la misma forma que en el análisis de función de respuesta por sitio, se realizó un análisis de correlación de *Pearson*. Para el cual se trabajó con los mismos parámetros; de forma cruzada entre los valores de las variables climáticas (Precipitación: Pp, Temperatura máxima: T-max, mínima: T-min, y media: T-med) y las cronologías generadas de la base de datos regional, tanto para madera temprana, madera tardía y anillo total; en sus tres cronologías (Estándar, Residual y Arstan).

Siguiendo el mismo proceso, para determinar qué cronología se correlaciona mejor con qué variable climática y periodo de ésta, las correlaciones de las variables climáticas se realizaron de la misma forma que en análisis por sitio:

- Mensual (Men), comenzado en enero y terminando en diciembre.
- Acumulado mensual (Acu), de la siguiente forma, enero-febrero, enero-febrero-marzo, enero-febrero-marzo-abril y así sucesivamente hasta enero-...-diciembre.
- Estacional (Est), de acuerdo a los meses que integran a las estaciones; primavera (Prim): marzo, abril, mayo; verano (Ver.; junio, julio y agosto); otoño (Oto.; septiembre, octubre y noviembre); e invierno (Inv.; diciembre, enero y febrero).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datación de núcleos de crecimiento

Los sitios que aportaron mayor cantidad de núcleos de crecimiento fueron Pin y Tcm, con 78 y 71 núcleos, respectivamente. Mientras que el sitio con menor cantidad fue Sjd con 30 núcleos. Los sitios restantes de Cpa, Mad y Tep aportaron 62, 57 y 51, respectivamente (Cuadro 3). En total se colectaron 349 núcleos de crecimiento provenientes de 143 árboles. Sin embargo, algunos núcleos de crecimiento fueron descartados debido a que presentaron valores bajos de correlación ($r < 0.32$). Finalmente, se consideraron 257 núcleos que representan el 73% del total y presentan correlaciones superiores al mínimo requerido ($r > 0.32$; $p < 0.01$).

Se determinó que la población de pinos más longeva corresponde a la especie *P. cembroides* ubicada al sur de la reserva, en el sitio Tcm, con un promedio de edad de 91 años y con individuos que alcanzan edades de 182 años. Mientras que, la especie *P. greggii* presenta los individuos más jóvenes. La población más joven se localiza en el sitio de Sjd, ubicado al norte de la reserva, con una edad promedio de 48 años y con individuos que alcanzan edades de 88 años. Las otras poblaciones de *P. greggii*, presentaron edades intermedias, que son de 60 años en el sitio de Mad, ubicado al este de la reserva y de 74 años para el sitio Tep, ubicado al oeste de la reserva. Finalmente, las poblaciones mixtas de *P. greggii* y *P. montezumae* correspondientes a los sitios de Cpa y Pin, se localizan en la zona central de la reserva y registran edades de 72 y 68 años, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. El madroño, Landa de Matamoros (Mad); San Juan de los Durán, Jalpan de Serra (Sjd); Cuatro palos, Pinal de Amoles (Cpa); Tepozán, Cadereyta de Montes (Tcm); El tepozán, Arrollo Seco (Tep); y La pingüica, Pinal de Amoles (Pin).

Estadísticos descriptivos	Mad	Sjd	Cpa	Tcm	Tep	Pin
Número total de árboles muestreados	21	15	30	30	18	29
Número total de muestras	57	30	62	71	51	78
Número de muestras datadas	29	24	46	32	48	78
Promedio de edad del arbolado	59.9	47.6	72	90.6	73.9	67.6
Edad máxima del arbolado	117	88	120	182	136	138
Longitud de las series	1907-2023	1936-2023	1904-2023	1841-2023	1880-2015	1878-2015

La diferencia entre la edad promedio de las poblaciones de pinos, está relacionada directamente con el aprovechamiento forestal en la región, ya que existe un mayor aprovechamiento maderable para las especies *P. greggii* y *P. montezumae*, y menor para la especie *P. cembroides* (INE, 1999). Otro factor importante son los disturbios asociados a plagas y sequías que han afectado las poblaciones de pinos de forma generalizada en todo el país, desde el año 2020 al 2024 (CONAFOR, 2020; 2024). En los sitios Mad y Sjd, se tiene registro de que las poblaciones de *P. greggii* han sido atacadas por plagas de descortezadores, provocando una disminución importante de ejemplares de pinos en estos sitios (Morales-Rangel *et al.*, 2018).

En comparación con poblaciones de otras regiones de México, las poblaciones de pinos en la reserva son relativamente jóvenes. Por ejemplo, para la especie de *P. cembroides* se han encontrado poblaciones en el noreste de Guanajuato de 223 y 158 años (Cortés-Barrera *et al.*, 2012), en la región oriental de Tlaxcala se reportó una población de 159 años (Cardoza-Martínez *et al.*, 2014) y en el sureste de Coahuila se reportó una población de 410 años (Constante-García *et al.*, 2009-B;). Por otro lado, también se han reportado poblaciones de *P. greggii* más longevas, tal es el caso de la sierra de Zapalinamé en Coahuila, donde se reportó una población de 219 años (Pérez y Helber, 2021) y en el cerro el Potosí en el estado de Nuevo León se identificó una población de 160 años (Villanueva-Díaz *et al.*, 2018-B). Además, para las poblaciones de *P. montezumae* también se han reportado poblaciones

longevas, en Coyuca de Catalán en Guerrero, se reportó una población de 228 años (Cortés-Cortés *et al.*, 2017). En el presente trabajo, estudiar varias especies a la vez, permite generar conocimiento climático en escalas geográficas más amplias y generar bases de datos más robustas que combinadas permitan extender las series dendroclimáticas en el tiempo.

Análisis de función de respuesta climática por sitio

El análisis de correlación entre las variables climáticas y las cronologías (Estándar, Residual y Arstan) de los seis sitios, mostró de forma consistente correlaciones significativas ($p < 0.05$) con la cronología estándar de anillo total, tanto para los análisis climáticos mensual como los mensual acumulado, por lo cual, en el presente documento se muestran y discuten los resultados obtenidos de las cronologías estándar de anillo total de los diferentes sitios, con los registros climáticos que comprenden el periodo de 1951 al 2023.

Tepozán, Cadereyta de Montes (Tcm)

Precipitación

Se determinó una tendencia negativa que comienza en el mes de enero ($r = 0.54$; $p < 0.05$) y disminuye hasta el mes de diciembre con un valor negativo ($r = -0.12$; $p > 0.05$). Se observó que los meses de enero a julio, con excepción del mes de marzo ($r = 0.18$; $p > 0.05$), presentan valores de correlación significativos ($p < 0.05$). El mes que presenta el valor más alto de correlación a nivel mensual fue enero (Fig. 10A).

Para el análisis acumulado mensual se encontró la misma tendencia que para el análisis mensual, aunque con valores más altos y significativos ($p < 0.05$), que inician en el periodo de enero-febrero ($r = 0.61$; $p < 0.05$) y disminuyeron hasta el periodo de enero-diciembre ($r = 0.42$; $p < 0.05$). Sin embargo, se observó un ligero incremento en los valores de correlación para el periodo de enero-julio ($r = 0.57$; $p < 0.05$). Aunque se observó que todos los periodos respondieron positiva y significativamente, el periodo con la correlación más alta fue enero-febrero ($r = 0.61$; $p < 0.05$) (Fig. 10B).

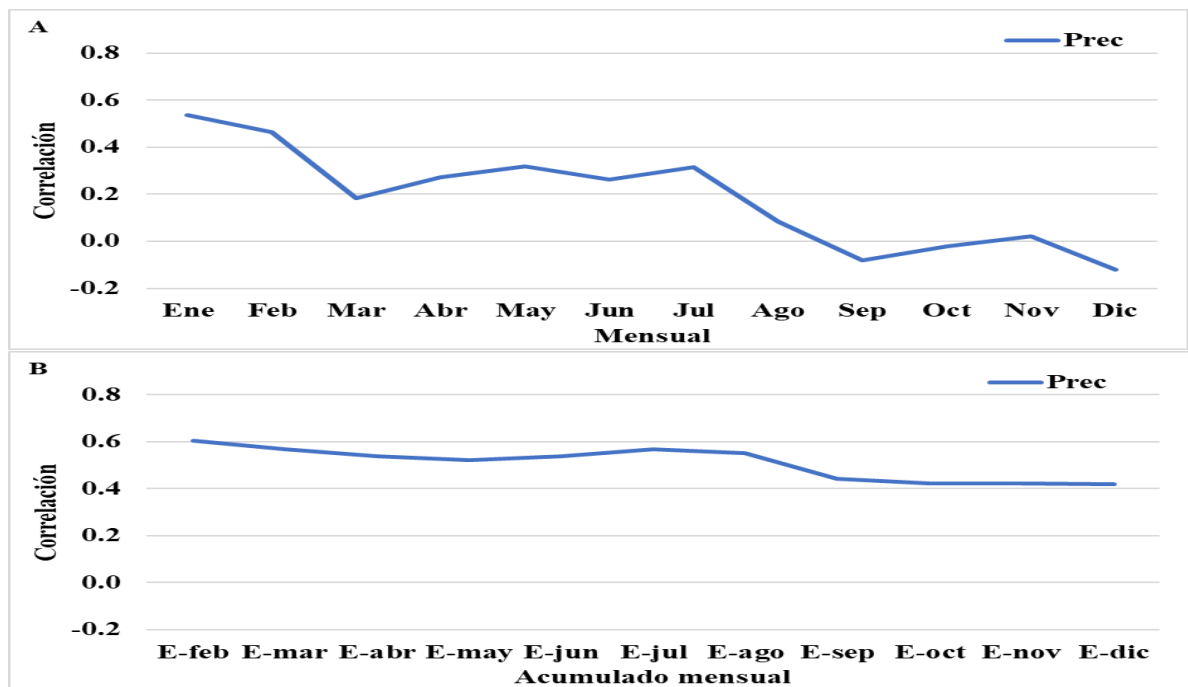


Figura 10. A: Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre la precipitación mensual y **B:** mensual acumulada.

Temperatura

Para el análisis mensual de la temperatura mínima y la máxima, se observó variación a lo largo del año, pero no valores de correlación con significancia estadística ($p > 0.05$). En contraste, la temperatura media registro valores de correlación significativa para los meses de enero ($r = -0.43$; $p < 0.05$) y febrero ($r = -0.27$; $p < 0.05$). El resto de los meses no presentaron valores de correlación significativa ($p > 0.05$) (Fig. 11A).

Para el análisis de la temperatura promedio mensual, la temperatura mínima no presentó valores de correlación significativa ($p > 0.05$) para ninguno de los periodos de análisis. Por otro lado, la temperatura máxima presentó valores de correlación negativa con significancia estadística a partir del periodo de enero-junio ($r = -0.25$; $p < 0.05$), hasta el periodo de enero-diciembre ($r = -0.26$; $p < 0.05$). El periodo con el valor más alto de correlación para la temperatura máxima fue de enero-julio ($r = -0.29$; $p < 0.05$). Sin embargo, la temperatura media presentó valores más altos que la temperatura máxima para todos los periodos. Siendo

el valor más alto de correlación el registrado para el periodo enero-febrero ($r = -0.43$; $p < 0.05$) (Fig. 11B).

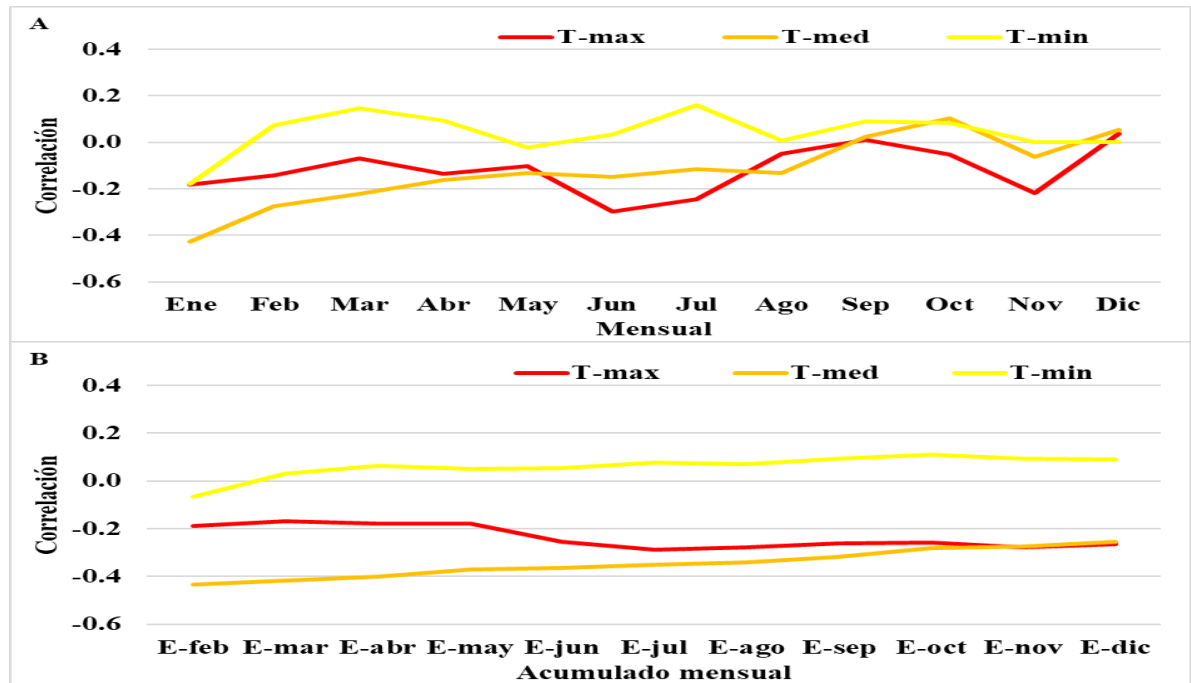


Figura 11. Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre las temperaturas mínima (T-min), media (T-med) y máxima (T-max). A: a nivel mensual y B: promedio mensual.

Cuatro palos, Pinal de Amoles (Cpa)

Precipitación

El análisis de correlación mensual mostró valores con una tendencia descendente, comenzado con valores positivos para los meses de enero a junio y de julio a diciembre valores negativos. Los meses con la más alta correlación positiva y significativa ($p < 0.05$) son enero y abril. El mes con el valor más alto de correlación ($r = 0.41$; $p < 0.05$) fue el mes de enero (Fig. 12A).

El análisis de correlación acumulado mensual muestra la misma tendencia descendente, la precipitación acumulada enero-febrero muestra una correlación significativa ($r = 0.41$; $p < 0.05$) hasta el periodo acumulado enero-julio ($r = 0.23$; $p < 0.05$). Una de las más altas correlaciones se determinó para el periodo de enero-junio ($r = 0.43$; $p < 0.05$), posterior a este periodo la correlación registra un declive. El valor más alto de correlación se determinó para el periodo enero-abril ($r = 0.44$; $p < 0.05$) (Fig. 12B).

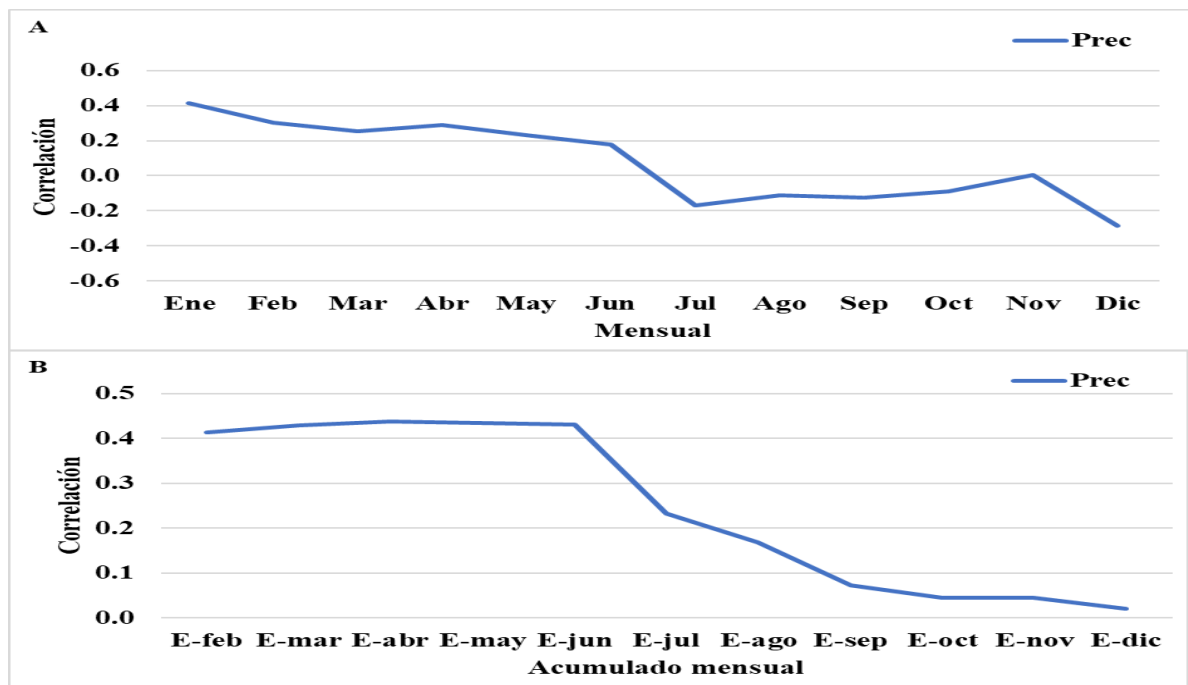


Figura 12. A: Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre la precipitación mensual y B: mensual acumulada.

Temperatura

El análisis de correlación mensual mostró una tendencia ascendente para las tres variables de temperatura. La temperatura mínima no mostró valores de correlación significativa ($p > 0.05$) para ninguno de los meses. Mientras que los valores de correlación de la temperatura media y máxima mostraron tendencias similares. La temperatura media registro valores de correlación negativa significativa ($p < 0.05$) para los meses de enero ($r = -0.41$), abril ($r = -0.23$) y junio ($r = -0.30$). Por otro lado, la temperatura máxima presentó valores de correlación significativa ($p < 0.05$) a partir del mes de marzo ($r = -0.25$) a junio ($r = -0.31$). Finalmente, la temperatura media presentó el valor de correlación más alto en enero ($r = -0.41$; $p < 0.05$) (Fig. 13A).

Para el análisis promedio mensual, la temperatura mínima mostró una tendencia similar a la reportada en el análisis mensual y no presentó valores de correlación significativos ($p > 0.05$). De igual manera, la temperatura media y máxima mostraron una tendencia similar entre ellas, aunque la temperatura media presentó valores negativos más altos que la temperatura

máxima. La temperatura media presentó correlación significativa para todos los periodos promedio analizados en el año, de los cuales el más alto se observó para el promedio del periodo de enero-junio ($r = -0.42$; $p < 0.05$). Mientras que para la temperatura máxima los periodos significativos ($p < 0.05$) van desde enero-abril ($r = -0.27$) hasta enero-agosto ($r = -0.26$). El periodo con el valor más alto de correlación corresponde al promedio del período enero-junio ($r = -0.34$), al igual que con la temperatura media (Fig. 13B).

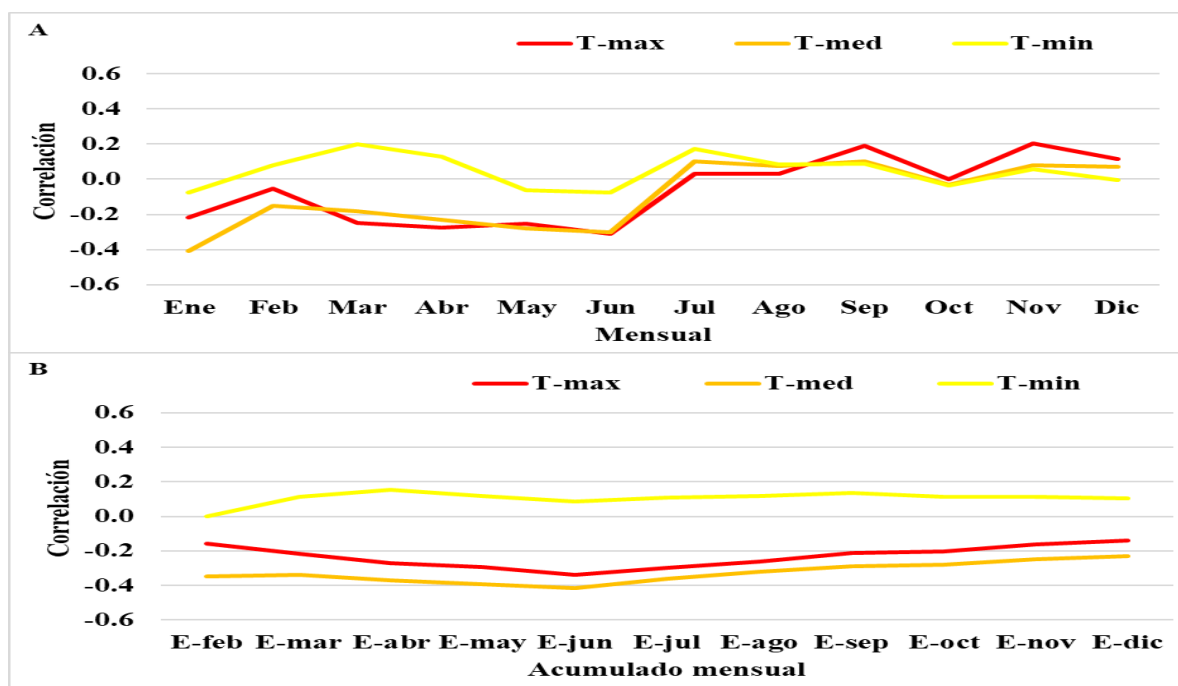


Figura 13. Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre las temperaturas mínima (T-min), media (T-med) y máxima (T-max). **A:** a nivel mensual y **B:** promedio mensual.

El madroño, Landa de Matamoros (Mad)

Precipitación

El análisis mensual mostró una tendencia descendente que comienza en enero con una correlación positiva ($r = 0.47$) y significativa ($p < 0.05$), siendo esta la más alta del periodo. Posteriormente los valores se extendieron hasta febrero, marzo, abril y mayo con correlaciones de $r = 0.35$, 0.21 , 0.40 y 0.27 , respectivamente. Donde a partir de junio ($r = 0.16$) los valores disminuyeron por debajo del valor mínimo de correlación significativa ($r =$

0.23) y presentaron valores negativos en octubre y noviembre con $r = -0.01$ y $r = -0.16$, respectivamente (Fig. 14A).

Por otro lado, el análisis de correlación mensual acumulado muestra la misma tendencia descendente, con valores de correlación positivos y significativos en todos los periodos ($r = 0.23$; $p < 0.05$). Los periodos con significancia estadística comenzaron desde enero-febrero ($r = 0.48$), hasta enero-diciembre ($r = 0.42$). Los periodos que presentan los valores más altos de correlación son enero-abril ($r = 0.52$) y enero-mayo ($r = 0.51$) (Fig. 14B).

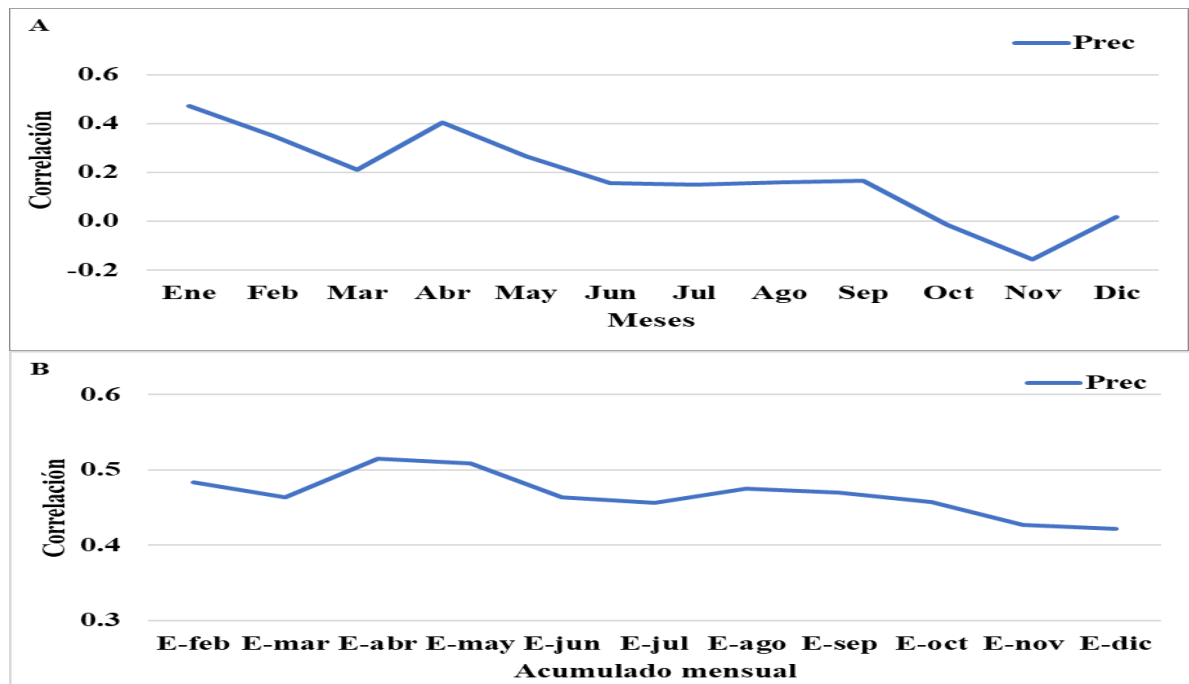


Figura 14. A: Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre la precipitación mensual y B: mensual acumulada.

Temperatura

El análisis de correlación mensual mostró que la temperatura mínima presenta valores de correlación por arriba de la correlación mínima significativa ($r = 0.23$; $p < 0.05$) a lo largo de todo el periodo. Para el caso de la temperatura media, presenta valores de correlación negativa significativa ($p < 0.05$) para los meses de enero ($r = -0.41$), abril ($r = -0.23$) y junio ($r = -0.30$). Para la temperatura máxima se observan valores de correlación significativa ($p <$

0.05) para los meses de marzo, abril, mayo y junio, con valores de correlación de $r = -0.25$, -0.28 , -0.25 y -0.31 , respectivamente (Fig. 15A).

En el análisis de la temperatura promedio por períodos indica que, la temperatura mínima no presenta valores significativos ($p < 0.05$) de correlación para ningún período a lo largo de todo el año. Sin embargo, la temperatura media y máxima presentaron valores negativos con significancia estadística ($p < 0.05$) para la mayoría de los periodos, con excepción del período enero-diciembre ($r = -0.18$) de la temperatura media. La temperatura máxima presenta el valor más alto de correlación, que corresponde al periodo de enero-mayo ($r = -0.44$) (Fig. 15B).

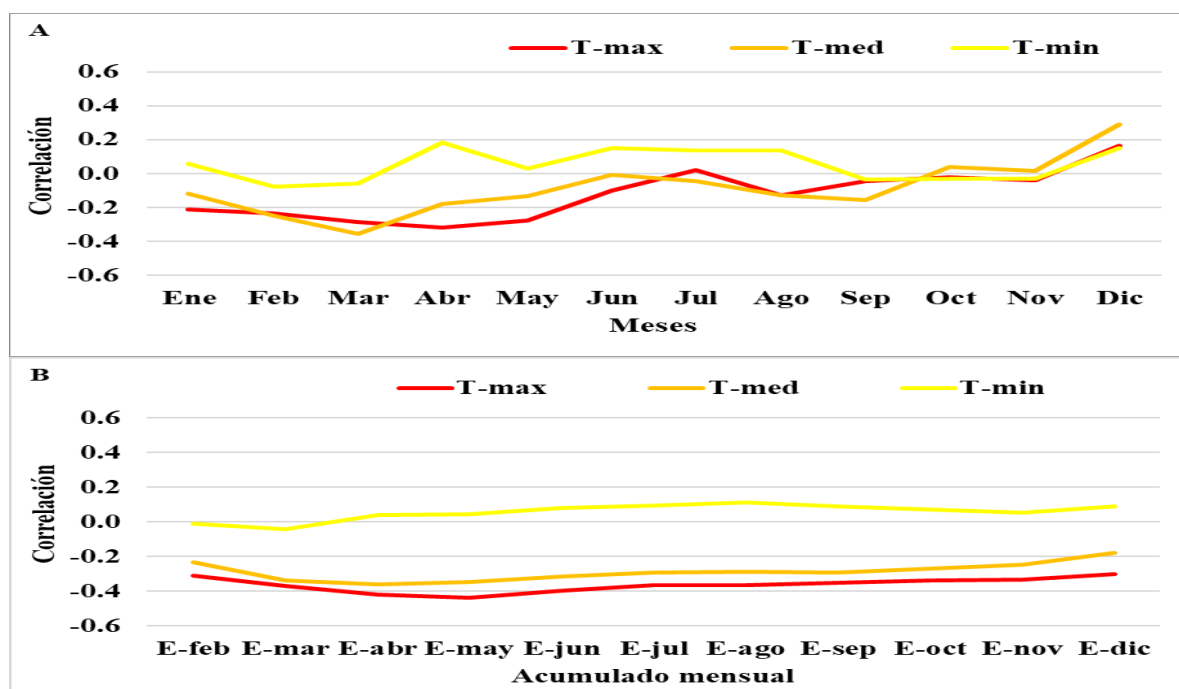


Figura 15. Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre las temperaturas mínima (T-min), media (T-med) y máxima (T-max). **A:** a nivel mensual y **B:** promedio mensual.

San Juan de los Durán, Jalpan de Serra (Sjd)

Precipitación

El análisis de correlación mensual indica una tendencia descendente en los valores de correlación a lo largo del año, con valores de correlación positiva significativa para el mes de enero ($r = 0.31$; $p > 0.05$), hasta correlaciones negativas no significativas en el mes de diciembre ($r = -0.15$). El mes con la correlación positiva significativa más alta es el mes de abril ($r = 0.44$; $p < 0.05$) (Fig. 16A).

El análisis de correlación con la precipitación acumulada mensual, mostró que todos los periodos analizados a lo largo del año presentan correlaciones positivas significativas por arriba de la correlación mínima significativa ($r = 0.23$; $p < 0.05$). El valor más alto de correlación corresponde al periodo enero-abril ($r = 0.48$; $p < 0.05$) (Fig. 16B).

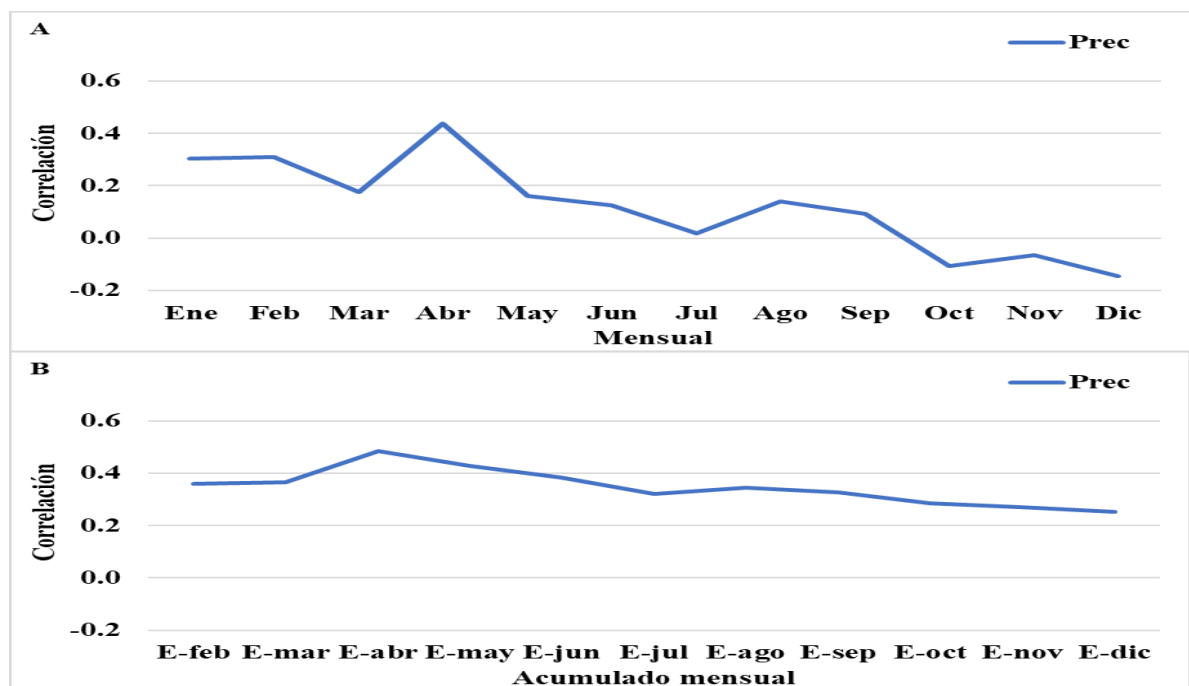


Figura 16. A: Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre la precipitación mensual y B: mensual acumulada.

Temperatura

El análisis de correlación mensual para la temperatura mínima no presenta valores que superen el valor mínimo significativo de correlación ($r = 0.23$; $p < 0.05$) en la mayoría de los meses, a excepción del mes de octubre que presenta una correlación negativa significativa ($r = -0.25$; $p < 0.05$). Sin embargo, la temperatura media y máxima muestran valores de correlación significativa para los meses de febrero ($r = -0.25$; $p < 0.05$) a mayo ($r = -0.26$; $p < 0.05$) y de marzo ($r = -0.26$; $p < 0.05$) a mayo ($r = -0.29$; $p < 0.05$), respectivamente. La temperatura media del mes de marzo indica el valor más alto de correlación ($r = -0.31$; $p < 0.05$). Para la temperatura máxima el mes de mayo representa el valor más alto de correlación ($r = -0.29$; $p < 0.05$) (Fig. 17A).

Finalmente, el análisis de correlación promedio mensual de la temperatura mínima presentó valores de correlación no significativos ($p > 0.05$). A diferencia de la temperatura media y máxima que mostraron valores de correlación negativos significativos para los períodos febrero-mayo ($r = -0.26$; $p < 0.05$) y de marzo-mayo ($r = -0.29$; $p < 0.05$), respectivamente (17B).

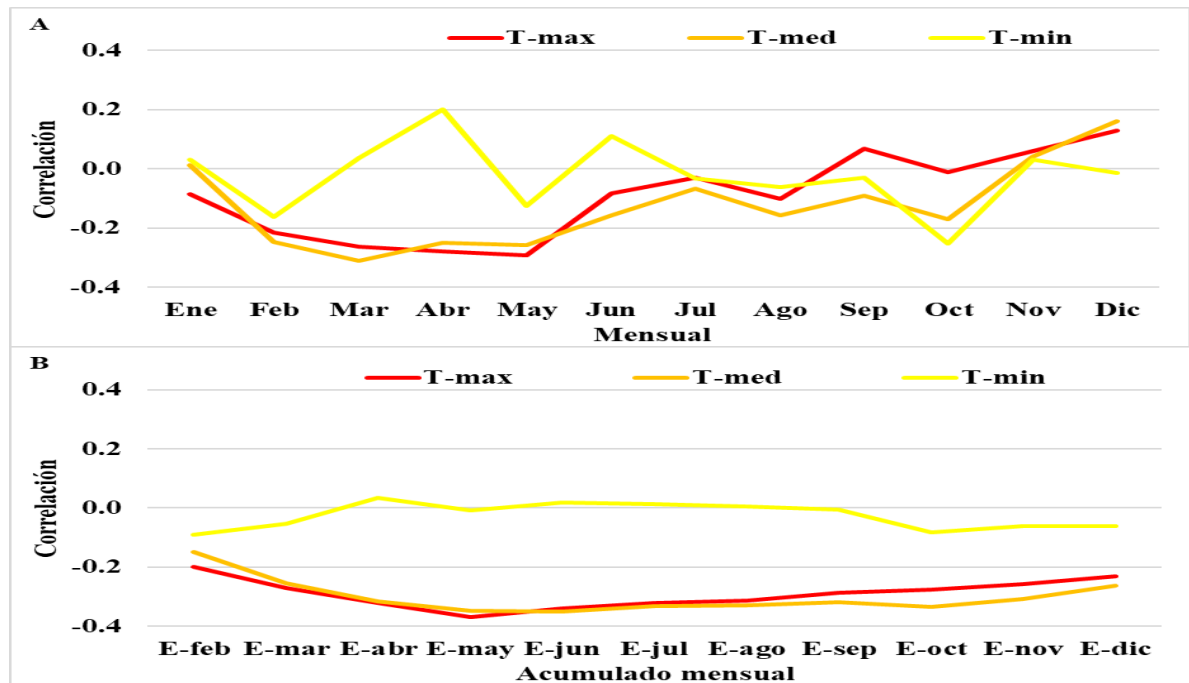


Figura 17. Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre las temperaturas mínima (T-min), media (T-med) y máxima (T-max). A: a nivel mensual y B: promedio mensual.

El tepozán, Arrollo Seco (Tep)

Precipitación

En el análisis de correlación mensual con la precipitación muestra que, los valores siguen una tendencia descendente que va desde el mes de enero ($r = 0.54$; $p < 0.05$) hasta el mes de noviembre ($r = -0.15$; $p > 0.05$), con ligero incremento en el mes de diciembre ($r = -0.04$; $p > 0.05$). El periodo con significancia estadística fue de enero a junio, a excepción de mayo ($r = 0.22$) que presenta un valor marginal al valor significativo ($r = 0.23$; $p < 0.05$) (Fig. 18A).

El análisis de correlación para la precipitación acumulada indica una tendencia descendente que comienza en el periodo enero-febrero ($r = 0.58$; $p < 0.05$) y se mantiene para los periodos enero-marzo y enero-abril (ambos con una $r = 0.59$; $p < 0.05$), posteriormente se observa una disminución en los valores de correlación para los periodos de enero-mayo, enero-junio (ambos con una $r = 0.54$; $p < 0.05$) y enero-julio ($r = 0.53$; $p < 0.05$), hasta alcanzar su valor más bajo en el periodo de enero-diciembre ($r = 0.30$; $p < 0.05$). El periodo con el valor de correlación más alto corresponde al período enero-abril ($r = 0.59$; $p < 0.05$) (Fig. 18B).

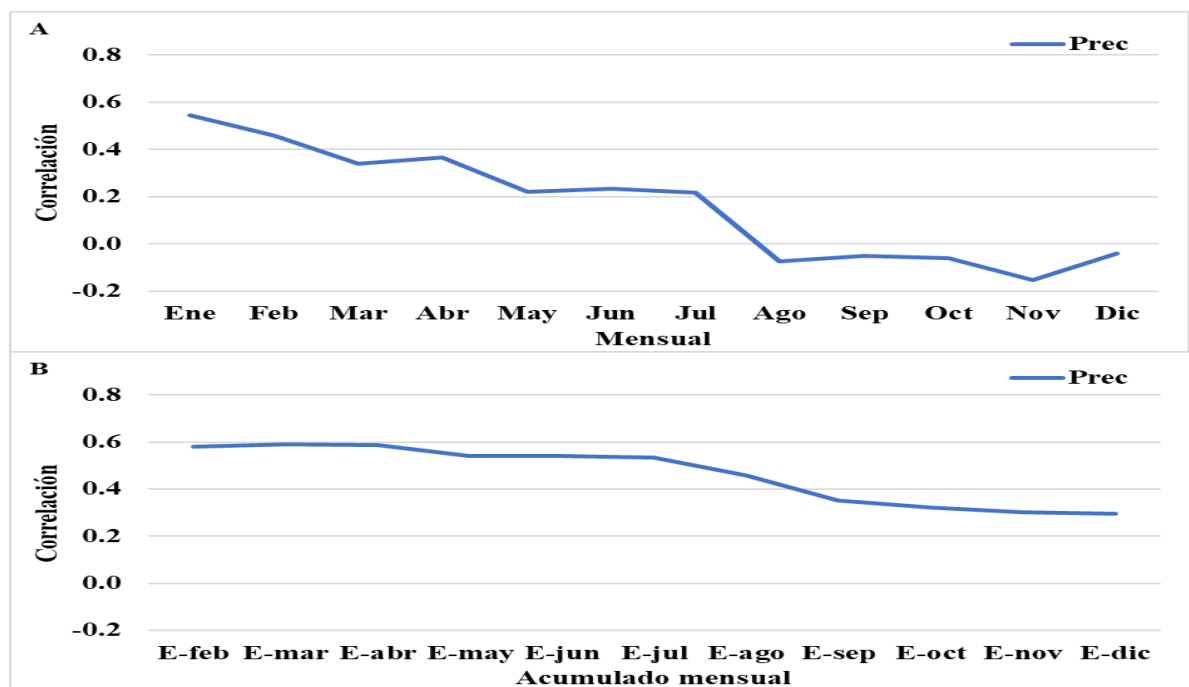


Figura 18. A: Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre la precipitación mensual y B: mensual acumulada.

Temperatura

El análisis de correlación para la temperatura promedio por períodos muestra que, la temperatura mínima registra valores de correlación no significativa ($p > 0.05$) para todos los períodos a lo largo del año. La temperatura media y máxima presentaron una tendencia ascendente en los valores de correlación, comenzando en enero (ambas variables con un valor de $r = 0.49$; $p < 0.05$) y hasta el mes de noviembre (ambas variables con un valor de $r = -0.08$; $p > 0.05$). El valor de correlación más alto se registró para el mes de enero para ambas temperaturas (Fig. 19A).

El análisis de correlación con la temperatura promedio por períodos muestra que, la temperatura mínima no presenta valores de correlación significativos ($p > 0.05$). Sin embargo, la temperatura media presentó los valores más altos de correlación negativa significativa ($p < 0.05$) para los promedios de temperatura de todos los períodos a lo largo del año, por encima de la temperatura máxima. El período con el valor de correlación más alto corresponde al promedio de temperatura enero-julio ($r = -0.68$; $p < 0.05$) (Fig. 19B).

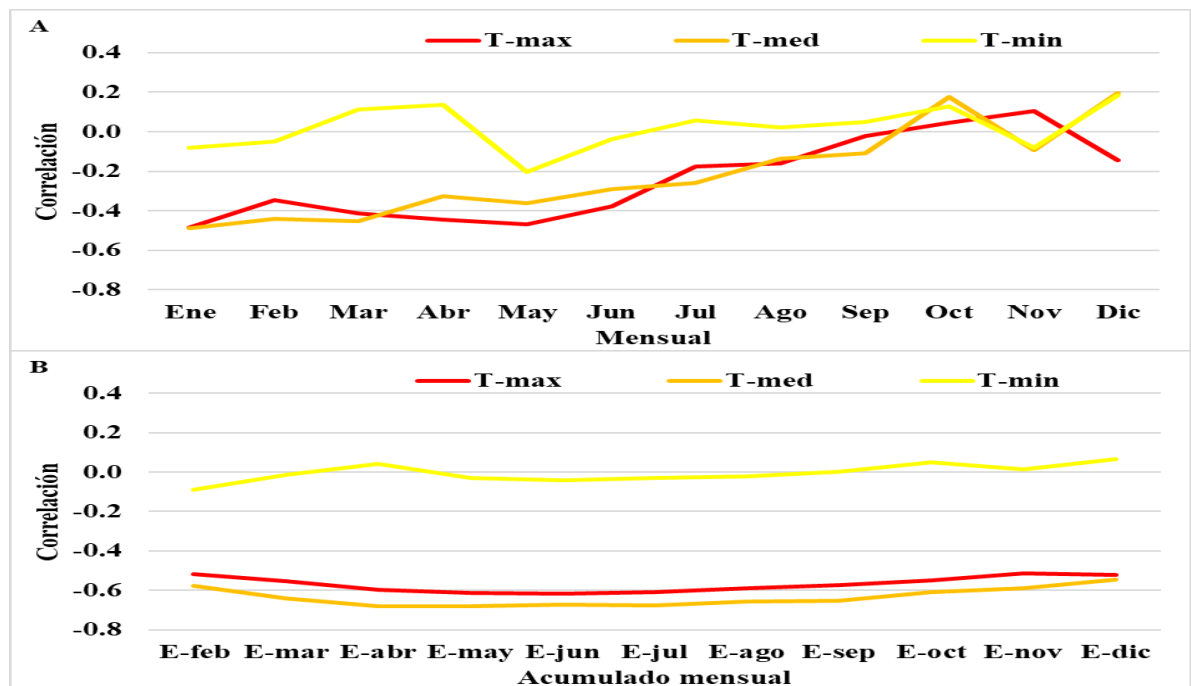


Figura 19. Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre las temperaturas mínima (T-min), media (T-med) y máxima (T-max). **A:** a nivel mensual y **B:** promedio mensual.

La pingüica, Pinal de Amoles (Pin)

Precipitación

El análisis de correlación mensual indica una tendencia descendente en los valores de correlación, el mes de enero con una correlación positiva significativa ($r = 0.42$; $p < 0.05$), la cual disminuye manteniendo niveles de significancia estadística ($p < 0.05$) hasta el mes de mayo (febrero, $r = 0.29$; marzo, $r = 0.25$; abril, $r = 0.52$ y mayo, $r = 0.54$). El mes de mayo registra la máxima correlación, posterior al mes de mayo la correlación disminuye registrando valores de correlación negativos hasta el mes de noviembre. La correlación negativa de los meses de septiembre ($r = -0.28$) y noviembre ($r = -0.33$) presentan significancia estadística ($p < 0.05$) (Fig. 20A).

El análisis de correlación mensual acumulado muestra una tendencia similar a la mensual. Los periodos con significancia estadística ($p < 0.05$) se registran desde el primer período enero-febrero ($r = 0.42$) hasta el período de enero-agosto ($r = 0.31$), donde el periodo con correlación más alta se presenta en enero-mayo ($r = 0.63$; $p < 0.05$) (Fig. 20B).

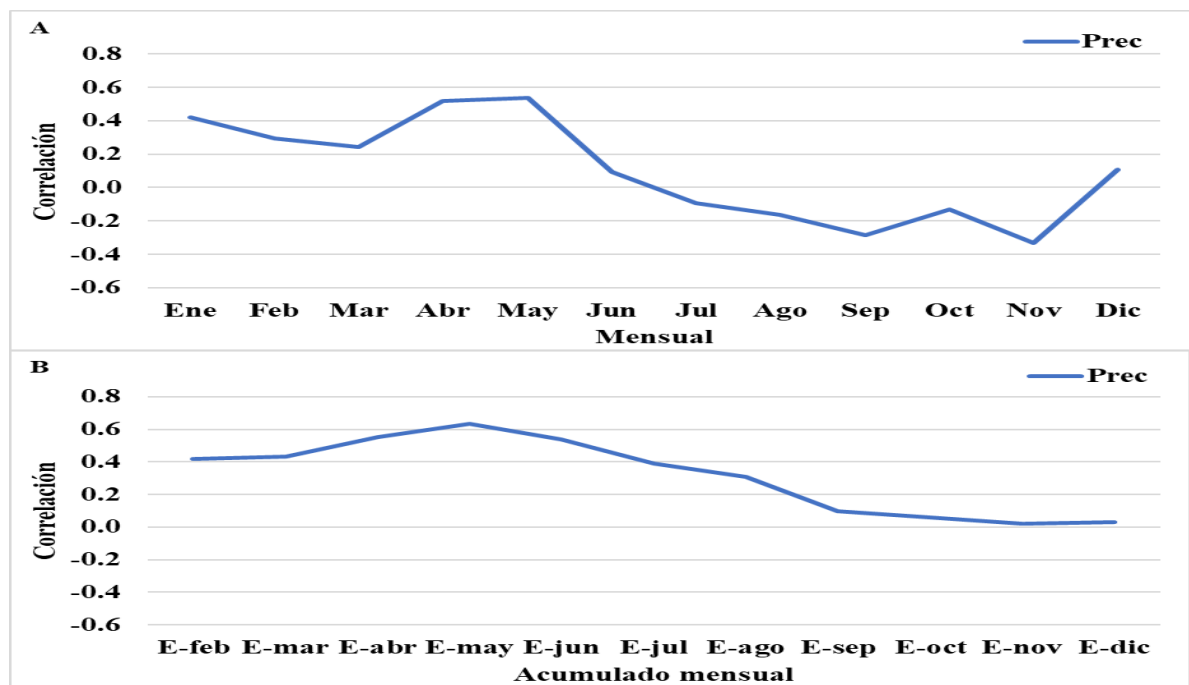


Figura 20. A: Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre la precipitación mensual y B: mensual acumulada.

Temperatura

El análisis de correlación promedio mensual de la temperatura mínima mostró variación durante todo el año, comenzando en enero con un valor negativo ($r = -0.07$) no significativo ($p > 0.05$) y aumentando hasta el mes de mayo ($r = 0.26$), único mes que presentó un valor de correlación con significancia estadística ($p < 0.05$). Los meses restantes presentaron valores que no superan el valor mínimo de correlación significativa ($r \geq 0.23$) (Fig. 14B). Por otro lado, la temperatura media y máxima presentaron su valor más alto para el mes de abril, con valores de correlación de -0.36 y -0.45, respectivamente. La temperatura máxima mostró un valor positivo significativo para el mes de septiembre ($r = 0.28$; $p < 0.05$) (Fig. 21A).

El análisis de correlación para temperatura promedio mensual, muestra que la temperatura mínima registra la misma tendencia observada para el análisis mensual y no supera un valor de correlación significativo ($r \geq 0.23$; $p > 0.05$). En el caso de la temperatura media y máxima, la temperatura media mostró valores más altos que la máxima para el periodo de enero-junio ($r = -0.46$; $p < 0.05$ y -0.45 ; $p < 0.05$, respectivamente) (Fig. 21B).

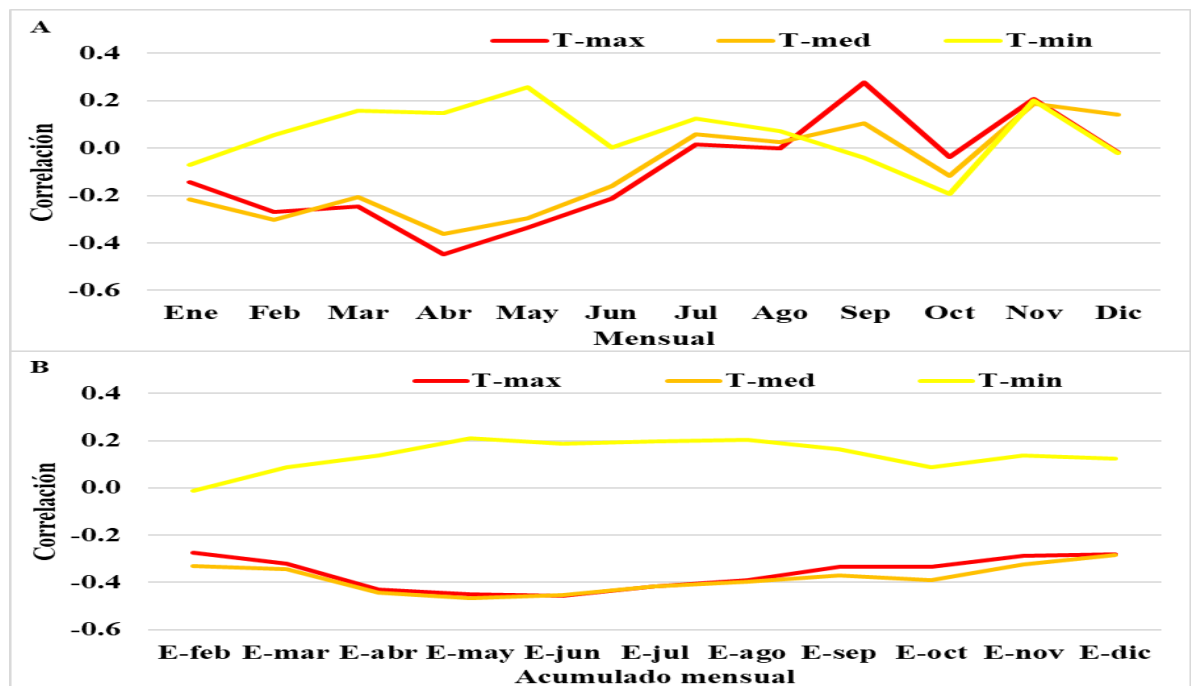


Figura 21. Gráficos de correlación de la cronología estándar de anillo total entre las temperaturas mínima (T-min), media (T-med) y máxima (T-max). **A:** a nivel mensual y **B:** promedio mensual.

De acuerdo a lo anterior, la respuesta positiva y consistente hacia la precipitación en los seis sitios, sugiere que el crecimiento anual de los pinos en la región está fuertemente condicionado por la disponibilidad hídrica en la primera mitad del año, lo que indica que la lluvia invernal que se presenta a inicios del año juega un papel determinante en el inicio del crecimiento. Esto presenta una correspondencia con estudios sobre el crecimiento de primavera, que inicia en bosques boreales, como respuesta fisiológica a la humedad disponible en la temporada invernal (Yung *et al.*, 2018) o estudios de la recarga de humedad en el subsuelo, como proceso del aprovechamiento diferencial de la precipitación estacional en bosques templados (Allens *et al.*, 2019). Además, en México se han realizado estudios dendrocronológicos de ecosistemas semiáridos y templados que presentan la misma respuesta a la lluvia del primer semestre del año, (Morales-Estrada, 2022; Chávez-Gándara *et al.*, 2017; Cerano-Paredes *et al.*, 2014; Constante-García *et al.*, 2009-B).

Por otro parte, la pequeña diferencia entre el periodo de respuesta de cada sitio, indica variación local, que puede estar asociada a otras variables como la capacidad del suelo para retener la humedad (FAO, 2015) o con variaciones climáticas por altitud y condiciones orográficas (INE, 1999), junto con las diferencias fisiológicas propias de cada especie (Gernandt y Pérez, 2014).

Finalmente, la relación entre las cronologías con la temperatura mínima, en general en el análisis mensual y promedio mensual, no mostró valores de correlación significativa ($p > 0.05$) a excepción de los sitios Pin y Sjd. Los cuales presentaron un valor positivo en mayo ($r = 0.26$; $p < 0.05$) y uno negativo en octubre ($r = -0.25$; $p < 0.05$), respectivamente (Fig. 17B y 21B).

De forma similar, en el análisis mensual la temperatura media y máxima se determinó una respuesta negativa con correlación significativa ($p < 0.05$) en la primera mitad del año. Donde la temperatura media presentó los valores más altos en el mes de enero para los sitios de Cpa ($r = -0.41$), Tcm ($r = -0.43$) y Tep ($r = -0.49$). Mientras que para el mes de marzo fueron los sitios Sjd ($r = -0.31$) y Mad ($r = -0.36$). Finalmente, la correlación más alta en el mes de abril se reportó en Pin ($r = -0.36$) (Fig. 11B, 13B, 15B, 17B, 19B y 21B).

En el análisis promedio mensual la temperatura mínima no mostró correlación significativa con ninguno de los periodos ($p > 0.05$). En cambio, para la temperatura media y máxima los valores de correlación aumentaron en comparación con el mensual y se mantuvieron por periodos más largos, como enero-febrero y enero-diciembre con significancia estadística ($p < 0.05$). Además, la temperatura media y la máxima presentaron una tendencia similar y valores de correlación muy cercanos entre sí para los seis sitios. Sin embargo, se observó que la temperatura media presenta mayor influencia negativa en los sitios Cpa para el periodo enero-junio ($r = -0.42$), en Tep para enero-mayo y enero-julio (ambos, $r = -0.68$), en Tcm para el periodo de enero-febrero ($r = -0.43$) y para la temperatura máxima el periodo de enero-mayo en Mad ($r = -0.44$). Finalmente, ambos rangos de temperatura presentan una variación similar en su influencia negativa en los sitios Pin y Sjd, con variaciones que destacan el periodo de enero-mayo para la temperatura media en Pin ($r = -0.47$) y la temperatura máxima en Sjd ($r = -0.37$) (Fig. 11B, 13B, 115B, 17B, 19B y 21B).

La respuesta no significativa ($p > 0.05$) de la temperatura mínima con las cronologías de los seis sitios, se han reportado en trabajos similares en la región central de México, como en la región del Eje Neovolcánico Transmexicano (Manzanilla-Quñones, 2016) y en el estado de San Luis Potosí (Villanueva-Díaz *et al.*, 2020).

Por otro lado, el incremento de la temperatura media y máxima ejerce un efecto negativo consistente, particularmente durante la primera mitad del año y de forma más marcada entre abril y junio. Este patrón concuerda con estudios que documentan una mayor sensibilidad negativa del crecimiento de pinos a temperaturas elevadas (Li *et al.*, 2021; Xue *et al.*, 2023; Manzanilla-Quñones, 2016; Villanueva-Díaz *et al.*, 2020; Morales-Estrada, 2022).

Estos resultados confirman una respuesta generalizada con respecto a la precipitación acumulada y a la temperatura media y máxima, lo que refuerza que las poblaciones de pinos de la Sierra Gorda responden significativamente a un mismo patrón climático regional. La precipitación actúa como factor promotor y las temperaturas altas como factor limitante del crecimiento. Sin embargo, es importante determinar si el crecimiento de todos los sitios presenta variabilidad común de crecimiento anual, con el objetivo de determinar la factibilidad de integrar una cronología regional.

Análisis de variabilidad común entre series

Se determinó un patrón común de crecimiento entre las diferentes series de cada uno de los sitios de trabajo (Fig. 22A), esta variabilidad de común fue validada mediante un análisis de correlación, que mostró que la mayoría de las series presentan una correlación significativa ($p < 0.01$), mientras que solo una pequeña porción presentó valores de correlación no significativa ($p > 0.01$) (Fig. 22B). Sin embargo, esto puede asociarse a perturbaciones ambientales de cada sitio que alteran el crecimiento.

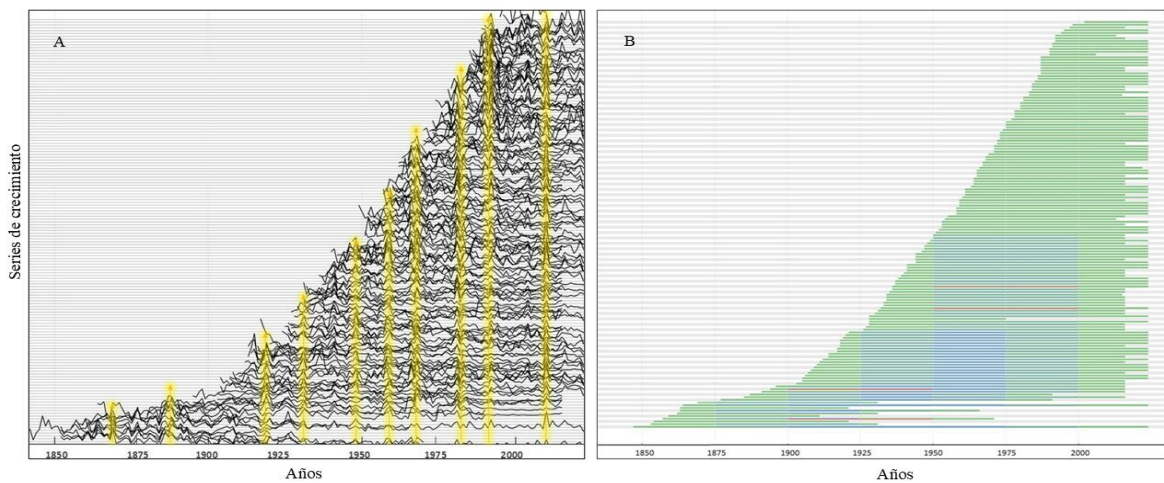


Figura 22. A. Gráfico de comparación de crecimientos entre series de los seis sitios. Las barras amarillas muestran los patrones de crecimiento común entre las diferentes series. **B.** Gráfico de correlación entre crecimientos de las series de los seis sitios. Las barras en color verde y azul indican correlaciones significativas ($p < 0.01$) y las barras rojas correlación no significativa.

El análisis de componentes principales (ACP) mostró que el CP1 explica el 57.4% de la variabilidad total, donde se agrupan las seis cronologías. Mientras que CP2 y CP3 explican individualmente el 13% y 12.3% de la varianza, respectivamente. Finalmente, el resto de componentes explican por debajo de 9.3% de la varianza (Fig. 23). Todas las series dendroclimáticas registran una misma variabilidad al agruparse en un mismo componente, por lo tanto, existe la confiabilidad estadística para integrar una serie regional.

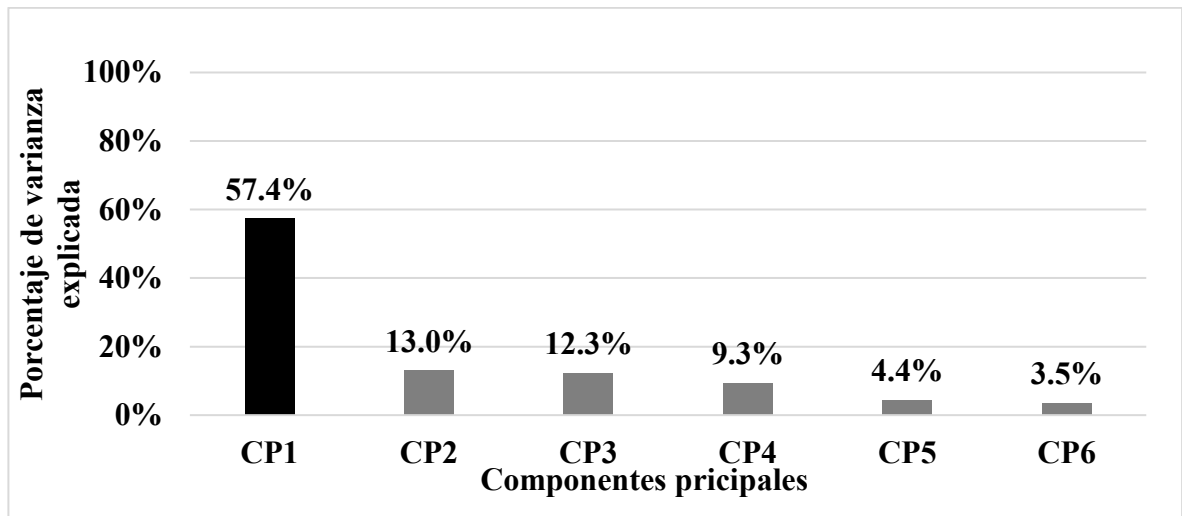


Figura 23. Análisis de componentes principales (ACP). Porcentaje de varianza explicada por cada uno de los componentes.

La respuesta común de las series al agruparse en el CP1, es una evidencia concisa sobre la variabilidad común de todas las series. Este tipo de análisis es común cuando se trabaja con cronologías de diferentes sitios y especies, con el objetivo de analizar la variabilidad climática en escalas geográficas extensas. Los resultados generados son similares a otros realizados en México, por ejemplo, en San Dimas, Durango, se integraron exitosamente diferentes cronologías de tres especies de pinos con el objetivo de analizar la variabilidad de la lluvia a nivel regional (Chávez-Gándara *et al.*, 2017), otros trabajos han sido más extensos cubriendo áreas de Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental con resultados positivos (Cerano *et al.*, 2011-B; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015-A; 2015-B). La integración de una base de datos regional muestra la influencia del clima en una escala geográfica extensa como la Sierra Gorda y la posibilidad de poder analizar en una escala extensa su variabilidad.

Cronología regional

Se desarrolló una cronología regional de 182 años, con 229 series procedentes de 102 árboles con una Intercorrelación entre series significativa ($p < 0.01$). La serie muestra variabilidad de alta y baja frecuencia, que permite analizar la incidencia de sequías e importantes períodos con humedad por arriba del promedio. El periodo de 1863 al 2023 está sustentado estadísticamente con un adecuado tamaño de muestra (Fig. 24B) y registra valores de EPS > 0.85 , valor que se referencia dentro de un umbral aceptable para análisis dendroclimáticos (Wigley *et al.*, 1984).

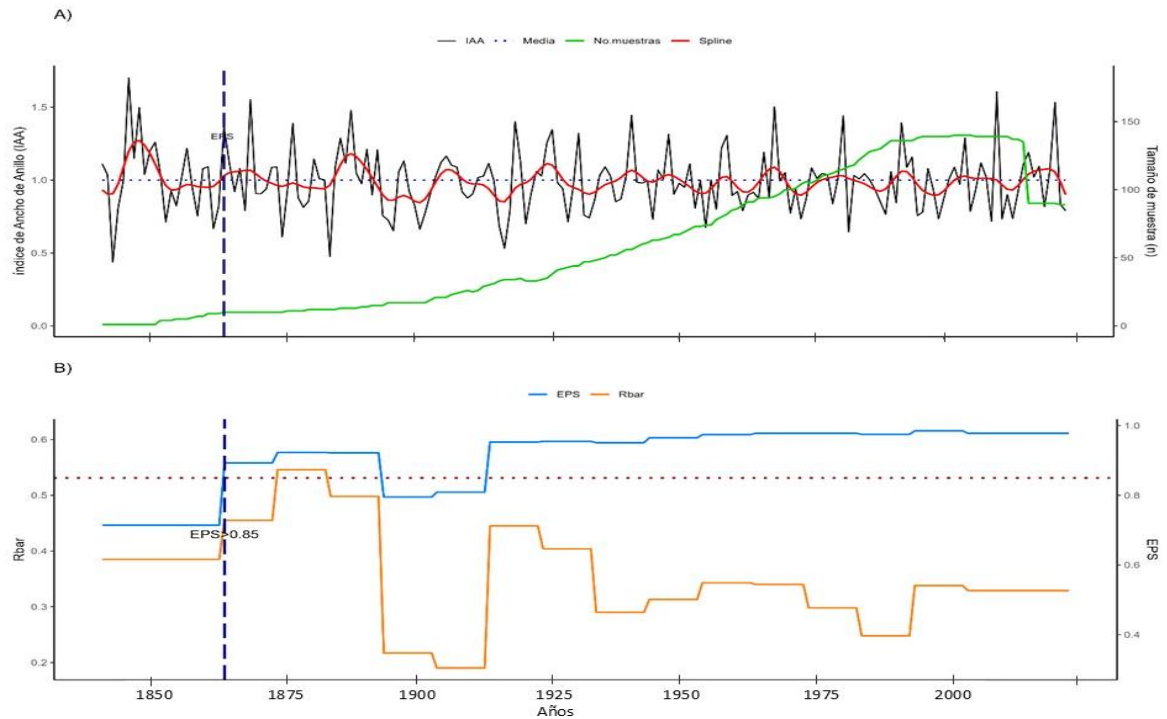


Figura 24. A. Cronología regional de anillos de crecimiento que comprende el periodo de 1841 al 2023 (línea negra sólida). La línea roja representa un *Spline* o curva suavizada de 10 años y la línea verde representa el número de series o muestras que contempla cada segmento de la cronología. B. Línea azul representa la señal expresada de la población (EPS) y la línea en color naranja la media de correlación entre series (Rbar).

Análisis de función de respuesta climática regional

Precipitación

El análisis de correlación muestra tendencias descendentes en los valores de correlación, se determinó una correlación positiva significativa ($p < 0.05$) para los meses de enero a mayo. El mes de enero presenta la correlación más alta ($r = 0.60$; $p < 0.05$) (Fig. 25A).

El análisis de correlación para la lluvia acumulada indica que la mayor correlación corresponde para el periodo de enero-febrero ($r = 0.60$; $p < 0.05$) seguida por el período enero-mayo ($r = 0.57$; $p < 0.05$). Tendencia similar al análisis por sitio, donde se destaca la respuesta al periodo de lluvia aculada enero-mayo (Fig. 25B).

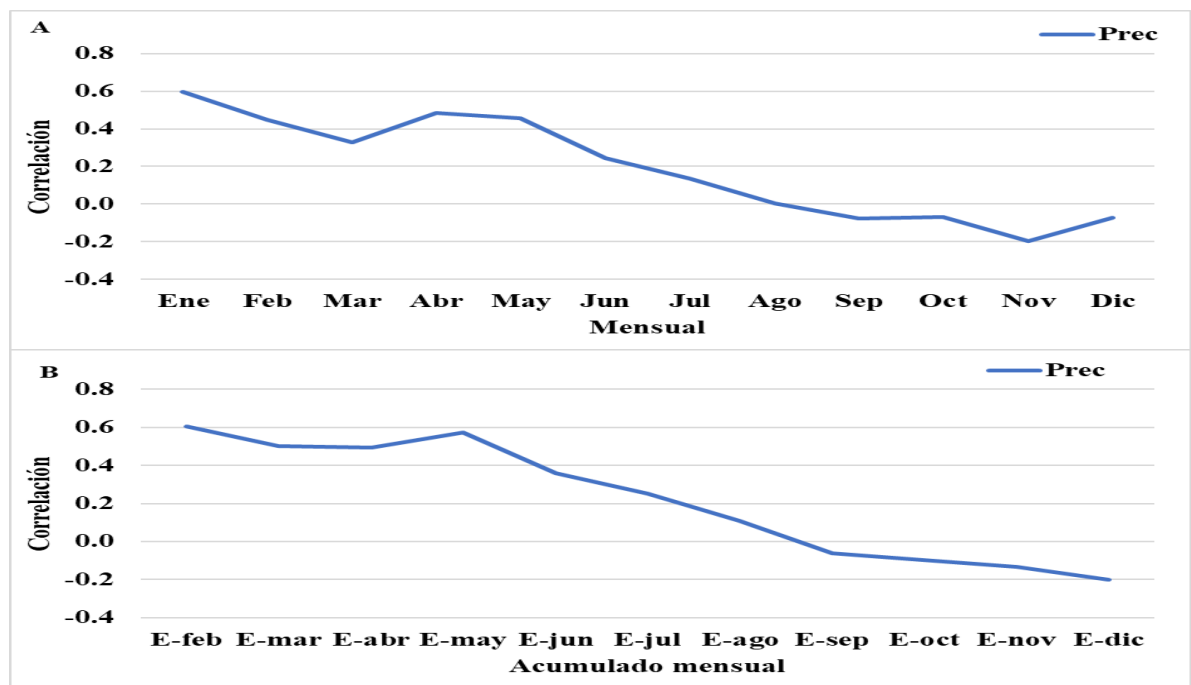


Figura 25. Gráficos de correlación de la cronología regional estándar de anillo total entre la precipitación mensual (A) y mensual acumulada (B).

Las especies seleccionadas responden de forma similar a la lluvia invernal. La lluvia en la temporada invernal se registra en menor cantidad y de forma ligera, lo que permite la saturación del suelo y que sea aprovechada por las plantas al inicio de su crecimiento en las estaciones de invierno y primavera (Fritts, 1976 y 2001; Kerhoulas *et al.*, 2013). Esto

presenta una correspondencia con trabajos relacionados en regiones diferentes de México con especies tanto de *P. cembroides* (Cortés-Barrera *et al.*, 2012; Cardoza Martínez, *et al.*, 2014) y de *P. greggii* (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2019), así como de otras especies de coníferas (Morales-Estrada, 2022; Carlón-Allende *et al.*, 2025).

Temperatura

El análisis de correlación entre la cronología regional y la temperatura mínima no presenta valores de correlación significativos ($p > 0.05$) para ningún mes. Por otro lado, la temperatura media y máxima presentaron valores de correlación negativos significativos ($p < 0.05$) con la cronología regional para la primera mitad del año (enero a junio), donde el mes con el valor más alto de correlación es el mes de abril ($r = -0.46$; $p < 0.05$) (Fig. 26A). Para el análisis promedio mensual con la temperatura máxima, se observó influencia negativa significativa a lo largo de todo el año, registrando su mayor correlación para el promedio que comprende el periodo de enero-junio ($r = -0.60$; $p < 0.05$) (Fig. 26B).

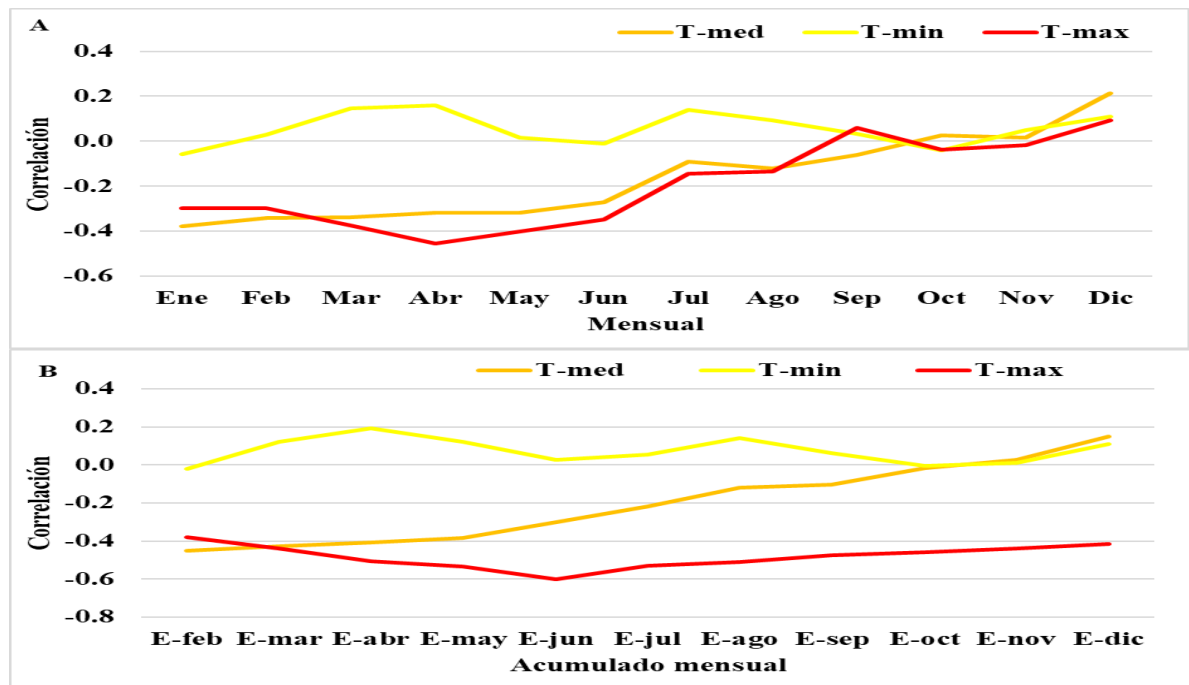


Figura 26. Gráficos de correlación de la cronología regional estándar de anillo total entre las temperaturas mínima (T-min), media (T-med) y máxima (T-max) a nivel mensual (A) y promedio mensual (B).

La influencia positiva y negativa de la temperatura con el crecimiento de los árboles ha sido establecida en otros estudios, donde la temperatura es una variable que influye en el crecimiento radial, fungiendo como iniciador del crecimiento a partir de cierto umbral, aunque con mayor intensidad cuando el arbolado se encuentra en el límite altitudinal o latitudinal de su distribución (Camarero-Martínez *et al.*, 1997).

De forma general, durante la primera mitad del año el arbolado es particularmente vulnerable a déficits de lluvia y al aumento de la temperatura, lo que puede inducir estrés hídrico generalizado (Benavides-Mendoza *et al.*, 2002; Taiz y Zeiger, 2006). Esto se traduce en una reducción del crecimiento y en casos extremos provocar mortalidad (De la Riva *et al.*, 2015). Lo anterior se válida para nuestras áreas de estudio al determinar en su mayoría correlaciones negativas con las temperaturas, ante escenarios de incremento en las temperaturas y disminución de la humeada, lo que se traducirá en estrés fisiológico y disminuciones en crecimiento.

Análisis de la serie regional

La cronología regional muestra variabilidad de baja y alta frecuencia durante los últimos dos siglos, con una extensión total de 182 años (1841 al 2023). Además, representa una asociación positiva con la precipitación y negativa con la temperatura máxima, ambas influyen de manera significativa en el primer semestre del año.

Los periodos más extremos de precipitación se observan en orden cronológico para los periodos de 1845 a 1852 y de 1885 a 1892, que muestran su valor más alto en el año 1846 (1.79) y 1888 (1.83), respectivamente. Por otro lado, los periodos intermedios ocurrieron de 1904 a 1909 y presentan dos años continuos (1907 y 1908) con lluvia por arriba del promedio (1.18 y 1.22, respectivamente). El siguiente periodo se registra de 1924 a 1927 y presenta su año más extremo en 1926 (1.38), de 1964 a 1970 donde el año más extremo es 1968 (1.56), de 1992 a 1994 donde el año más extremo se registra en 1992 (1.48) y finalmente, el periodo de 2015 al 2018, que registra el año más extremo en el 2016 (1.22). Sin embargo, también se destacan años únicos que registran precipitación abundante, 1869 (1.54), 1941 (1.46), 1981 (1.53) y 2010 (1.46) (Fig, 27, columnas azules).

Por otro lado, los periodos asociados a escasa precipitación y temperaturas más altas fueron; de 1841 a 1845 con el año más extremo en 1843 (0.43) siendo este el más extremo de la serie (Fig. 27-1), de 1852 a 1856 y de 1858 a 1864, con los años más extremos en 1853 (0.67) y 1862 (0.54), respectivamente, de 1892 a 1903, dos años extremos en 1896 (0.58) y 1901 (0.64), de 1915 a 1919, con un año extremo en 1917 (0.58), de 1932 a 1935, año más extremo en 1933 (0.73), la década de 1950, que presentó variación anual sin superar la media hasta 1958 y registró dos años extremos, 1953 (0.59) y 1955 (0.57), el periodo de 1969 a 1974, con dos años extremos 1971 y 1973 (ambos, 0.66), el periodo de 1995 al 2004, con dos años extremos en 1995 (0.67) y 1999 (0.66), el periodo de 2012 al 2014, con un año extremo en 2013 (0.65) y finalmente, en los últimos años de la cronología se registra que a partir del año 2022 (0.70) al 2023 (0.60), ocurrió una disminución importante en las condiciones de humedad, más extrema que los tres últimos periodos registrados y ligeramente más extrema que la de la década de 1950. Así mismo, también se destacan los años específicos que presentan valores por debajo de la media, como son 1875 (0.60), 1884 (0.58), 1921 (0.71), 1929 (0.71) y 1945 (0.72) (Fig. 27, columnas amarillas).

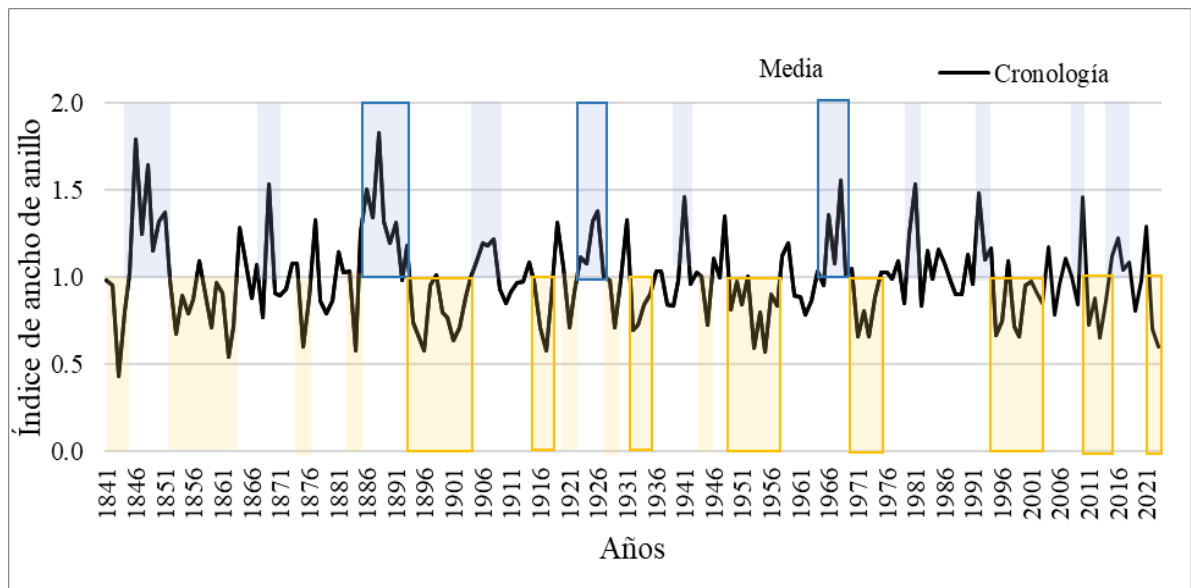


Figura 27. Cronología regional para la reserva Sierra Gorda, Querétaro, México (Línea negra sólida). Que se extiende para el periodo de 1841 a 2023. Media de 1 (línea negra punteada). Periodos húmedos (barras azules) y secos (barras amarillas).

La respuesta de las coníferas a la precipitación de invierno-primavera (enero-mayo), ha sido reportada por diversos estudios dendroclimáticos que trabajaron con especies de pinos (Cerano-Paredes *et al.*, 2014 y 2013; Chávez-Gándara *et al.*, 2017; Villanueva-Díaz *et al.*, 2018; Mendoza-Villa *et al.*, 2018). Este fenómeno ha sido explicado por diversos autores, que argumentan que los bosques de pinos responden de forma similar en su crecimiento a la lluvia de invierno-primavera, debido a que la permeabilidad de la lluvia que cae en esta temporada es mayor que la de las lluvias torrenciales de verano, las lluvias de verano saturan más rápidamente el suelo dando paso a escurrimientos, caso contrario sucede con las lluvias de baja intensidad, ya que estas permiten una mayor infiltración ya que saturando el suelo más lentamente, infiltrándose más profundo en el suelo (Fritts, 1976 y 2001; Kerhoulas *et al.*, 2013).

Por otra parte, algunos de los periodos asociados a precipitación abundante en este estudio presentan una correspondencia con otros trabajos dendroclimáticos, por ejemplo, el período de 1904 a 1909 (Fig, 27-c), con un trabajo realizado en Chihuahua (Cerano-Paredes *et al.*, 2009) y uno en Guanajuato, el periodo de 1924 a 1927 (Fig, 27-d) se reporta en el trabajo de Cortés-Barrera *et al.*, (2014). Finalmente, el periodo de 1964 a 1970 (Fig, 27-e) se reporta en diferentes estudios realizados en Chihuahua, Chiapas, Guanajuato y el estudio previo del sureste de la reserva Sierra Gorda (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Cortés-Barrera *et al.*, 2012; Cerano-Paredes *et al.*, 2014; Mendoza-Villa *et al.*, 2018) (Fig. 27, columnas azules con contorno).

Los periodos asociados con escasa precipitación y temperaturas altas que presentan correspondencia con otros trabajos son, de 1892 a 1903, reportado en diversos trabajos realizados tanto en el norte (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015; Díaz-Ramírez *et al.*, 2016; Chavez-Gándara *et al.*, 2017) como en el centro de México (Cortés-Barrera *et al.*, 2012; Cerano-Paredes *et al.*, 2014). Otros periodos de los que se encontró correspondencia fueron 1915 a 1919, reportado en un trabajo realizado en Chihuahua (Villanueva-Díaz *et al.*, 2015); el periodo de 1932 a 1935 que obtuvo correspondencia con trabajos en el norte de México (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015; Chavez-Gándara *et al.*, 2017); el periodo de 1969 a 1974, presentó una correspondencia con

trabajos del norte (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015) y el centro de México (Cardoza-Martínez *et al.*, 2014); el período de 1995 al 2004 corresponde con lo reportado para Sinaloa y Nayarit (Díaz-Ramírez *et al.*, 2016), y en Chihuahua (Cerano-Paredes *et al.*, 2009) (Fig. 27, columnas amarillas con contorno).

El penúltimo periodo que corresponde del 2012 al 2014 (Fig. 27, columnas amarillas con , contorno) presenta una correspondencia con un trabajo realizado en Durango (Chavez-Gándara *et al.*, 2017) y Chiapas (Cerano-Paredes *et al.*, 2014) de lo que se infiere que fue un evento de sequía de alcance nacional. Finalmente, en los años 2022 y 2023, otros trabajos reportan sequías del 2020 hasta el 2023 (Moreno-Sepúlveda *et al.*, 2022; Valdés-Rodríguez, 2022; Municipio de Querétaro, 2024).

Uno de los periodos clave en la cronología, es el periodo de la de cada de 1950 (1953 a 1955) (Fig. 27, comunas amarillas con contorno), el cual fue un evento de gran magnitud por su alcance internacional (Aboites-Aguilar y Camacho Pichardo, 1996), el cual ha sido reportado por diversos trabajos en México (Cerano-Paredes *et al.*, 2014; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015; Díaz-Ramírez *et al.*, 2016; Chavez-Gándara *et al.*, 2017).

Si bien la reserva con sus valles y montañas amortigua en cierta medida los eventos moderados de sequía, por su variabilidad en las condiciones de humedad (Solsona-Igual, 2024). Los periodos determinados y que presentan correspondencia con otros trabajos, dan robustez y fiabilidad a la cronología, destacando la sensibilidad de los pinos para registrar la variabilidad ambiental a su alrededor. Además, estos trabajos son una referencia histórica de la sensibilidad de estas especies a registrar estos eventos climáticos limitantes y cómo pueden determinarse a través del tiempo para analizar tendencias y recurrencia de eventos hidro climáticos extremos.

CONCLUSIÓN

Los resultados del presente análisis dendroclimático en la Sierra Gorda de Querétaro, confirman que las poblaciones de *P. greggii* y *P. montezumae*, son jóvenes, en comparación con poblaciones del norte y centro del México, ya que no superan los 80 años de edad promedio. Esto está relacionado con el aprovechamiento forestal e historial de disturbios por plagas y sequías en la región. Por otro lado, la población de *P. cembroides*, que supera la edad promedio de 90 años, ubicada al sur de la reserva, es la más longeva de la región. Esto posiblemente se deba por la baja presión de aprovechamiento forestal que tiene la especie. Sin embargo, no se descarta que nuevas investigaciones puedan encontrar poblaciones más longevas que no se encontraron en el presente estudio.

La precipitación es un factor promotor del crecimiento para las poblaciones de los seis sitios y el crecimiento inicia con las lluvias de enero y se extiende hasta finales de la primavera. Sin embargo, la influencia de la precipitación y su periodo son diferentes en cada sitio. Así, los sitios Sjd, Cpa, Pin y Mad son menos sensibles a déficits de lluvia estacional, que los sitios Tcm y Tep, de los cuales la intensidad de la relación con la precipitación es mayor. Por otro lado, el aumento en la temperatura actúa como un factor limitante del crecimiento, desde enero hasta comienzos del verano en junio. De la misma forma que con la precipitación, la influencia de la temperatura presenta variación mensual en cada sitio. El aumento de la temperatura influye en menor medida en los sitios Sjd, Mad y Pin, y en mayor medida en los sitios Cpa y Tcm, y de forma más drástica en Tep. Esto implica que las zonas sur y noroeste de la reserva, donde se ubican los sitios Tcm y Tep, respectivamente, son más vulnerables a déficits de precipitación y aumento de las temperaturas, lo que puede repercutir en el estrés fisiológico del arbolado y hacerlo vulnerable a brotes de plagas forestales que terminen en la muerte de estos.

Los anillos de crecimiento de los pinos de las tres especies estudiadas en los seis sitios de estudio, presentaron un patrón de crecimiento anual, lo que permitió integrar una cronología regional con una extensión 182 años (1841 al 2023). Esta cronología respondió positivamente a la precipitación y negativamente a la temperatura máxima. Para la precipitación el período acumulado más importante fue enero-mayo, mientras que para la temperatura máxima fue

enero-junio. Estos resultados evidencian la sensibilidad del crecimiento de los pinos a condiciones de déficit hídrico y aumento térmico durante la temporada previa y temprana de crecimiento, lo que sugiere una alta vulnerabilidad de estas especies ante escenarios de incremento de temperatura y reducción de precipitación en la región.

Los periodos húmedos y secos identificados en la cronología muestran correspondencia con registros dendroclimáticos de distintas regiones de México, incluyendo eventos de gran magnitud como la sequía de la década de 1950 y las sequías recientes de 2020–2023. Esta similitud espacial y temporal aporta solidez y confiabilidad a la cronología desarrollada, confirmando la sensibilidad de los pinos para registrar la variabilidad hidroclimática regional, así como su utilidad para analizar la recurrencia y tendencia de eventos climáticos extremos en la región.

Esto complementa la información ecológica de los bosques de pino en la reserva y sienta bases robustas para realizar una reconstrucción regional cercana a los dos siglos, ya que la magnitud de la respuesta observada, principalmente frente a la precipitación, muestra potencial para desarrollar una reconstrucción climática regional con una extensión mayor que el periodo de datos instrumentales aquí analizados (72 años). En estudios futuros en la reserva, se recomienda desarrollar una reconstrucción climática específica de la precipitación y la temperatura máxima que permita entender y analizar con mayor detalle la variabilidad histórica en la región. La información generada constituye una base sólida para este tipo de investigaciones y representa una aportación relevante al conocimiento hidroclimático de la reserva de la Biosfera Sierra Gorda, al documentar tanto la sensibilidad de los pinos al clima como la influencia de la variabilidad climática en un área geográfica extensa.

BIBLIOGRAFÍA

- Abatzoglou, J. T., S. Z. Dobrowski, S. A. Parks, K. C. Hegewisch, (2018). *Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015*, *Scientific Data*.
- Aboites Aguilar, L., & Camacho Pichardo, G. (1996). Aproximación al estudio de una sequía en México el caso de Chapala-Guadalajara (1949-1958). En, *Historia y desastres en América Latina* (pp. 259-91).
- Alegria, M. Á. C. (2022). Aproximación al Análisis Temporal de la Variación del Albedo en el Salar de Uyuni, Bolivia, Utilizando Series Temporales Modis 2001-2020 (*Master's thesis*, Pontificia Universidad Católica de Chile).
- Allende, T. C., Díaz, J. V., Castro, G. S., Mendoza, M. E., & Macías, J. L. (2021). *Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico*. *Ecological Indicators*, 120, 106920.
- Allen, S. T., Kirchner, J. W., Braun, S., Siegwolf, R. T., & Goldsmith, G. R. (2019). *Seasonal origins of soil water used by trees*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2), 1199-1210
- Arreola-Ortiz, M. R., & Návar-Cháidez, J. de J. (2010). Análisis de sequías y productividad con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern., y su asociación con El Niño en el nordeste de México. *Investigaciones Geográficas*, 71, 7-20.
- Benavides-Mendoza, A. (2002). *Ecofisiología y bioquímica del estrés en plantas*. Buenavista, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Berger, W. H. (2011). *Discovery of the 5.7-year Douglass cycle: A pioneer's quest for solar cycles in tree-ring records*. *The Open Geography Journal*, 4(1).

- Camarero-Martínez, J. J., Guerrero, J., & Gutiérrez-Merino, E. (1997). Formación del anillo de crecimiento y clima: un ejemplo de modelos para *Pinus uncinata* Ram. y *Pinus sylvestris* L. en los Pirineos Centrales. *Ecología*, 1997, vol. 11, p. 235-254.
- Cardoza-Martínez, G. F., Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Guerra-de la Cruz, V., & Estrada-Ávalos, J. (2014). Reconstrucción de la precipitación anual para la región oriental del estado de Tlaxcala. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(23), 110-127.
- Carlón-Allende, T., Karla, A., Villanueva-Díaz, J., & Macías-Vázquez, J. L. (2025). La investigación dendrocronológica en México: un análisis bibliométrico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31.
- Castorena, G. (1980). Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Centro de Comunicación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Arreola-Ávila, J. G., Sánchez-Cohen, I., & Valdez-Cepeda, R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y bosques*, 15(2), 27-44.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., & Constante-García, V. (2011-A). El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 207-215.
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda, R. D., Méndez González, J., & Constante García, V. (2011-B). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(SPE2), 235-249.

- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Constante-García, V., González-Barrios, J. L., & Estrada-Ávalos, J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la Cuenca de Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 07-23.
- Cerano-Paredes, J., Mendez-Gonzalez, J., Amaro-Sanchez, A., Villanueva-Diaz, J., Cervantes-Martinez, R., & Rubio-Camacho, E. A. (2013). *Reconstruction of winter-spring precipitation with annual rings of Pinus douglasiana in the Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Jalisco*. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(3), 413-423.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Vázquez-Selem, L., Trucios-Caciano, R., & Guerra-de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones geográficas*, (83), 41-54.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Cervantes-Martínez, R., Esquivel-Arriaga, G., Guerra-de la Cruz, V., & Z Fulé, P. (2016). Régimen histórico de incendios y su relación con el clima en un bosque de *Pinus hartwegii* al norte del estado de Puebla, México. *Bosque (Valdivia)*, 37(2), 389-399.
- Cerano-Paredes, J., Szejner, P., Gutiérrez-García, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Villanueva-Díaz, J., ... & Castruita-Esparza, L. U. (2022). *How to extract climate variability from tree-rings. JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (181), e63414.
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., ... & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 38(2), 387-399.

- Cook, E.R. (1985). *A time-series analysis approach to tree ring standardization. Ph. D. dissertation, University of Arizona.*
- Cook, E. R., & Holmes, R. L. (1999). *Users manual for Program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.*
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2024-a). *Pinus greggii* Englem.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2024-b). *Pinus montezumae* Lamb.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2024-c). *Pinus cembroides*. Zucc.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). Diagnóstico fitosanitario 2020 de los ecosistemas forestales de Querétaro.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2024). Programa estatal de sanidad forestal – Diagnóstico estatal 2024: Querétaro.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2018). 100 años de conservación en México: Áreas Naturales Protegidas de México. SEMARNAT-CONANP. México 634 páginas.
- Constante-García V., Villanueva Díaz J., Cerano Paredes J. y Estrada Ávalos J. (2009-A). Medición y calidad de fechado en anillos de árboles. Folleto técnico, (14), 1-48.
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E. H., & Valencia-Manzo, S. (2009-B). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia forestal en México*, 34(106), 17-39.

- Cortés-Cortés, O., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Flores-López, C., & Valencia-Manzo, S. (2017). Relación entre la variabilidad climática y el crecimiento radial de *Pinus montezumae* Lamb. en Coyuca de Catalán, Guerrero. Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente ISSN: 2007-3828
- Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Castruita-Esparza, L. U., Martínez-Trinidad, T., & Cervantes-Martínez, R. (2014). Análisis dendroclimático de ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el centro de México. Agrociencia, 48(5), 537-551.
- Cortés-Barrera, E. N., Villanueva Díaz, J., Nieto de Pascual Pola, C., Estrada Ávalos, J., & Guerra de la Cruz, V. (2012). Reconstrucción de precipitación estacional para el noroeste de Guanajuato. Revista mexicana de ciencias forestales, 3(9), 51-67.
- De la Riva, J., Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., Linares, J. C., Hernández, R., Oliva, J., ... & García-Martín, A. (2015). Papel de los factores bióticos y las sequías en el decaimiento del bosque: aportaciones desde la dendroecología. Ecosistemas, 24(2), 15-23.
- Del-Val, E., & Sáenz-Romero, C. (2017). Insectos descortezadores (*Coleoptera: Curculionidae*) y cambio climático: problemática actual y perspectivas en los bosques templados. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 20(2), 53-60.
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. Madera y bosques, 22(1), 111-123.
- Donahue, J. K., & Upton, J. L. (1999). *A new variety of Pinus greggii (Pinaceae) in Mexico. SIDA, Contributions to Botany*, 1083-1093.
- ECMWF, (2025). *The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*.

- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., & Ballesteros-Cánovas, J. A. (2019). *Reconstruction of debris-flow activity in a temperate mountain forest catchment of central Mexico. Journal of Mountain Science*, 16(9), 2096-2109.
- Fritts H.C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, New York, 567 pp.
- Fritts HC. 2001. *Tree rings and climate*. New Jersey, USA. Blackburn Press Caldwell. 567 p.
- García, A. A. y E. S. González. 1991. Flora y vegetación de la cima del Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana* 13:53-74.
- García-G, R., Gómez, A., López-U, J., Vargas-H, J., & Horwath, W. R. (2004). *Tree growth and $\delta^{13}C$ among populations of Pinus greggii Engelm. at two contrasting sites in central Mexico. Forest ecology and management*, 198(1-3), 237-247.
- García-Rovés J. C. M., (2017). El pino canario y las erupciones de cumbre vieja (1949, La Palma): adaptación al volcanismo (*Doctoral dissertation*, Montes).
- Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de *Pinophyta* (coníferas) en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85, 126-133.
- Giménez A. M, Moglia J. G., Hernandez P. y Gerez R. (2005). Anatomía de la Madera. Universidad Nacional de Santiago del Estero. FCF. E-Book ISBN 978-1676-08-8.
- Grané, A. (2002). Análisis de componentes principales. Madrid: Universidad Carlos III, Departamento de Estadística, 30.
- Google Earth Engine. (2024). Era5-Land.
- Gutiérrez, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones: En Arqueología Náutica Mediterránea. Universidad de Barcelona.
- Holmes R. L. (1983). COFECHA. *A chronological análisis program for tree-ring research*. Versión 6.06P.

- Huante, P., Rincón, E., & Swetnam, T. W. (1991). *Dendrochronology of Abies religiosa in Michoacan, Mexico*.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (1999). Programa de manejo Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, México. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAP.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (1995). Catálogo de herbario INEGI. Tomo I. ISBN 970-13-0282-6. Consultado el 25 de marzo del 2025.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2011).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2022). Aspectos geográficos de Querétaro. Compendio 2022.
- Kerhoulas, L. P., Kolb, T. E., & Koch, G. W. (2013). *Tree size, stand density, and the source of water used across seasons by ponderosa pine in northern Arizona. Forest Ecology and Management*, 289, 425-433.
- Laboratory of Tree-Ring Research (LTRR). (2023-a). COFECHA (Versión 6.06P) [Software de análisis de cronologías de anillos de árboles]. Universidad de Arizona.
- Laboratory of Tree-Ring Research (LTRR). (2023-b). ARSTAN (Versión 6.05P) [Software de desarrollo de cronologías y análisis estadístico]. Universidad de Arizona.
- Li, J., Song, F., Jin, Y., Yun, R., Chen, Z., Lyu, Z., ... & Cui, D. (2021). *Critical temperatures controlling the phenology and radial growth of Pinus sylvestris var. Mongolica on the southern margin of a cold temperate coniferous forest. Ecological Indicators*, 126, 107674.
- Lobato-Sánchez, R., & Mejía-Estrada, P. I. (2021). Perspectiva sobre la sequía actual en México.

- Luna-Robles, A. A. (2020). Aplicación de técnicas dendrocronológicas en *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl para la reconstrucción climática en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (*Doctoral dissertation*, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Manzanilla-Quñones U. (2016). Reconstrucción dendrocronológica de temperatura media y precipitación dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Martínez-Sánchez, J. N., Cuéllar-Rodríguez, L. G., Yerena Yamallel, J. I., Cavazos, M. T., & Gárate-Escamilla, H. A. (2023). Comparación de bases de datos climáticos en la modelación de distribución potencial de *Pinus cembroides* Zucc. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 14(79), 135-158.
- Martínez-Sifuentes, A. R., Villanueva-Díaz, J., Estrada-Ávalos, J., & Castruita-Esparza, L. U. (2019). Reconstrucción de sequías y asociación climática en la cuenca del río Conchos, Chihuahua.
- Mendoza-Villa, O. N., Cambrón-Sandoval, V. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., & Soto-Correa, J. C. (2018). Reconstrucción de la precipitación histórica (1877-2014) para el suroeste de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 371-386.
- Miranda-Avilés, R., Puy-Alquiza, M. J., & Martínez-Reyes, J. (2007). El árbol: Fuente de información en las ciencias de la tierra. *Elementos: Ciencia y cultura*, 14(067), 41-43.
- Morales-Estrada, R. (2022). Análisis espacio-temporal del estudio de la dendrocronología en México (*Doctoral dissertation*, Universidad Autónoma Chapingo).

- Morales-Rangel, A., Cambrón-Sandoval, V. H., Soto-Correa, J. C., Jones, R. W., & Obregón-Zúñiga, J. A. (2018). Efecto de la temperatura en poblaciones de *Dendroctonus frontalis* Zimmerman y *Dendroctonus mexicanus* Hopkins (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) bajo un escenario de cambio climático en la Sierra Gorda Queretana. *Acta zoológica mexicana*, 34.
- Moreno-Sepúlveda, Y., Gutiérrez-Guzmán, U. N., Bustamante-Andrade, A., Esquivel-Romo, A., Ríos-Vega, M. E., & Gutiérrez-Gutiérrez, O. G. (2022). Grados de afectación de la región ecológica Cuchillas de la zarca mediante datos del monitor de sequía de México. in XI Congreso Internacional de Manejo de Pastizales (p. 93).
- Municipio de Querétaro. (2024). Diagnóstico de la sequía en los ecosistemas y vegetación del municipio de Querétaro. Instituto de Ecología y Cambio Climático.
- Muñoz, M. M. (2024). Variabilidad intraespecífica en la respuesta de dos poblaciones de *Nothofagus obliqua* al clima: ajustes en la anatomía del xilema durante décadas recientes.
- Pérez, V., & Helber, A. (2021). Régimen de incendios y estructura del bosque de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* en la sierra de Zapalinamé, Coahuila (*Doctoral dissertation*).
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2005). Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta botánica mexicana*, (72), 1-16.
- R Core Team. (2023). **R: A language and environment for statistical computing* (Versión 4.2.2) [Software]. R Foundation for Statistical Computing.*
- Rojas-García, F., Gómez-Guerrero, A., Gutiérrez García, G., Ángeles Pérez, G., Reyes Hernández, V. J., & De Jong, B. H. (2020). Aplicaciones de la dendroecología en el manejo forestal: una revisión. *Madera y bosques*, 26(3).

- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Agua y suelo: Datos clave para un mundo sediento. FAO.
- Panyushkina I. P. (2011). *Dendrochronology. McGraw Hill Encyclopedia of Science & Technology* Edition: 11th Edition.
- Pardo-Norambuena, D. C. (2023). Relación entre variables climáticas, crecimiento de *Pilgerodendron uviferum* y cambios frontales del Glaciar Lucía en el margen septentrional de Campos de Hielo Sur (48° 14'16" S y 73° 8'39" O).
- Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y bosques*, 14(1), 107-120.
- Schulman, E. 1944. *Dendrochronology in Mexico. Tree-Ring, Bulletin* 10:18 24.
- Schulman, E. 1956. *Dendroclimatic changes in semiarid america. University of Arizona Press, Tucson*. 142 pp.
- Schweingruber, F. H. (1996). *Tree rings and environment dendroecology*. Paul Haupt.
- Solsona-Igual F. (2024). Cambio climático y sequías en Querétaro. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma, Facultad de Ciencias Naturales, Licenciatura en Geografía Ambiental. (30 pp).
- 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.
- Stahle, D. W. (1999). *Useful strategies for the development of tropical tree-ring chronologies. Iawa Journal*, 20(3), 249-253.
- Stahle, D. W., Burnette, D. J., Diaz, J. V., Heim, R. R., Fye, F. K., Paredes, J. C., ... & Cleaveland, M. K. (2012). *Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. Climate Dynamics*, 39, 1431-1446.

- Suzán, H., & González, M. (1985). Estudios autoecológicos-dendrocronológicos en *Pinus nelsonii*. Flores, LJ, Cantú A., CM & Marroquín, J. (Eds.). I Simposium Nacional sobre Pinos piñoneros, Facultad de Silvicultura. UANL Linares, NL México, 137-149.
- Taiz L. y Zieger E. 2006. Fisiología vegetal. Universidad Jaurá I, D.L. Colección Ciencias Experimentales Núm. 10. ISBN 978-84-8021-601-2.
- Valdés-Rodríguez, O. A. (2022). Desastre compuesto: sequía y Covid-19 en Veracruz, México. *Interconectando Saberes*, (14), 15-27.
- Villanueva-Díaz, J. V., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Therrell, M. D. (2000). Estado actual de la dendrocronología en México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 25(88), 5-36.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano, J., Stahle, D., Therrell, M., Cleaveland, M., & Sánchez, I. (2004). Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México. Folleto técnico, (2), 1-37.
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). *Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. Climatic Change*, 83(1), 117-131.
- Villanueva-Díaz, J., Paredes, J. C., & Ávalos, J. E. (2008). Reconstrucción de Precipitación Estacional de *Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco En Sierra La Madera, Cuatrociénegas, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 33(104), 17-35.
- Villanueva-Díaz J., Cerano P. J., Constante G. V., Montes G. L. E., y Vázquez S. L. (2009). Muestreo Dendrocronológico: colecta, preparación y procesamiento de núcleos de crecimiento y secciones transversales. Folleto Técnico No. 13. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. México 49p.

- Villanueva-Díaz, J., Cerano Paredes, J., Stahle, D. W., Constante García, V., Vázquez Salem, L., Estrada Ávalos, J., & Benavides Solorio, J. D. D. (2010-a). Árboles longevos de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 1(2), 7-30.
- Villanueva-Díaz J., Cerano P. J., Stahle D. W., Constante G. V. y Estrada Á. J. (2010-b). Estandarización y Desarrollo de Series Dendrocronológicas en México. Folleto Técnico No. 1. INIFAP CENID-RASPA. Gomez Palacio, Durango. México 55p.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., ... & Caballero, M. (2011). La dendrocronología y reconstrucciones paleoclimáticas en el Norte-Centro de México. *Escenarios de Cambio Climático: Registros del Cuaternario en América Latina*, 47-72.
- Villanueva-Díaz J., Cerano-Paredes, J., Gómez-Guerrero, A., Correa-Díaz, A., Castruita-Esparza, L. U., Cervantes-Martínez, R., ... & Martínez-Sifuentes, A. R. (2014). Cinco Siglos de Historia dendrocronológica de los ahuehuetes (*Taxodium mucronatum* Ten.) del Parque del Contador, San Salvador Atenco, Estado de México. *Agrociencia*, 48(7), 725-737.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés Montaña, C., Vázquez Selem, L., Yocom, L. L., & Ruiz-Corral, J. A. (2015-A). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones geográficas*, (87), 141-153.
- Villanueva-Díaz, J., Paredes-Cerano, J., Selem, L. V., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., ... & Corral, J. A. R. (2015-B). Red dendrocronológica del 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.
- Villanueva-Díaz, J., González-Elizondo, M., Cerano-Paredes, J., Estrada Ávalos, J., Martínez Sifuentes, A. R., & Rosales Mata, S. (2018-A). 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).
- Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Estrada-Ávalos, J., Martínez-Sifuentes, A. R., Cerano-Paredes, J., Canizales-Velázquez, P. A., ... & Reyes-Camarillo, F. D. R. (2018-B). Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(49), 165-187.
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Beramendi-Orosco, L., EstradaÁvalos, J., Martínez-Sifuentes, A. R., Astudillo-Sánchez, C. C., CervantesMartínez, R., & Cerano-Paredes, J. (2020). *The climatic response of baldcypress (Taxodium mucronatum Ten.) in San Luis Potosi, Mexico. Trees*, 34(2), 623-635.
- Villanueva-Díaz J., Sifuentes, A. R. M., Camacho, E. A. R., Durán, Á. C., Solorio, J. D. D. B., Paredes, J. C., & Ávalos, J. E. (2021). Reconstrucción dendrohidrológica de escurrimientos en la subregión hidrológica Coahuayana, estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65).
- Wigley TML, KR Briffa, PD. Jones. 1984. *On the average value of correlated time series, with applications in dendroclima tology and hydrometeorology. Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201-213.
- Xue, R., Jiao, L., Zhang, P., Wei, M., Wang, X., Li, Q., & Qi, C. (2023). *Response sensitivity processes of conifers radial growth to climate factors based on tree ring width variations. Global Ecology and Conservation*, 48, e02743.
- Yeaton, R. I. (1982). *The altitudinal distribution of the genus Pinus in the western United States and México*.
- Yun, J., Jeong, S. J., Ho, C. H., Park, C. E., Park, H., & Kim, J. (2018). *Influence of winter precipitation on spring phenology in boreal forests. Global Change Biology*, 24(11), 5176-5187.