



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Reconstrucción de la variabilidad climática para el oeste de Chihuahua, México, empleando un enfoque dendrocronológico

Ricardo Miranda Briones

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

PROGRAMA DE DOCTORADO EN SOSTENIBILIDAD

Tesis Doctoral

Reconstrucción de la variabilidad climática para el oeste de Chihuahua, México, empleando un enfoque dendrocronológico

Tesis doctoral realizada por:

Ricardo Miranda Briones

Directores

Dr. Jordi Morató Farreras

Cátedra UNESCO de Sostenibilidad – UPC

Dr. Julián Cerano Paredes

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)

Barcelona, España

2021

Ricardo Miranda Briones. 2021.

Reconstrucción de la variabilidad climática para el oeste de Chihuahua, México, empleando un enfoque dendrocronológico.

Tesis Doctoral.

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

BarcelonaTech. España.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2469-5762>

Esta tesis de doctorado fue apoyada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) [Beca de Posgrado en el Extranjero], Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (INIFAP-CENID-RASPA, Gómez Palacio, México) y la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad (UPC).

Esta tesis incluye figuras y fotografías de Ricardo Miranda Briones, a menos de que se indique expresamente lo contrario.



A mi prometida, Margarita

A mis padres biológicos, María del Refugio y Ricardo

A mis padres españoles, Pepy y José

DEDICATORIA

A mi prometida, Margarita Silva Trejo, mi hermosa Brujita, por su amor, su paciencia, su comprensión, sus consejos y por todo su apoyo en estos 5 años que he estado viviendo en Barcelona. A pesar de la distancia, siempre la he sentido cerca de mí y nada de esto hubiera sido posible sin su apoyo. Gracias por ser mi motivación. Gracias por tu amor mi querida Brujita.

A mis padres biológicos, María del Refugio Briones Sánchez y Ricardo Miranda Wong, por todo el amor, apoyo y consejos que me han dado a lo largo de mi vida. Por enseñarme desde la secundaria que, si se tiene paciencia y se trabaja arduamente, los sueños se pueden alcanzar. Ahora comprendo muchas cosas que me decían. Gracias por tanto mamá y papá.

A mis padres españoles, Pepy Canito Flores y José Pascual Tardío Sánchez, por haberme abierto las puertas de su casa y considerarme como su hijo. Mi estancia en Barcelona durante estos años no hubiera sido igual sin ustedes. Gracias por sus enseñanzas, su comprensión y por todos esos momentos inolvidables que pude vivir con ustedes (ya sea en Gavà o en Villaverde de Guadalimar recogiendo la aceituna).

A mis hermanas, Ana Luisa Miranda Briones y Rocío Guadalupe Miranda Briones, por aconsejarme a lo largo de mi vida y estar conmigo siempre. Gracias por ayudarme y preocuparse por mí en todo momento.

A mis amigos, Karla, Isaac, Adrián y Vanessa, por estar conmigo a cada instante. Por todas las llamadas y charlas que hemos tenido por teléfono, las cuales hacían que extrañase un poco menos. Gracias por darme su hermosa amistad y por estar ahí siempre, a pesar de la distancia.

A mis queridas primas Ela y Sonia, por todas las pláticas y risas que tuvimos en todo este tiempo. A mis queridos tíos Nacho, Pepy y Nica por tantos momentos alegres que pase con ustedes.

Gracias a todos ustedes por hacer más feliz mi estancia en Barcelona. Todo esto es por ustedes y para ustedes.

Gracias vida, por todo lo que me has dado.

LISTA DE PUBLICACIONES

- **Miranda-Briones, R.,** Cerano-Paredes, J., Esquivel-Arriaga, G., Morató-Farreras, J., Cervantes-Martínez, R., Sánchez-Cohen, I., & Gómez-Nísino A. Variabilidad de la precipitación (1660-2018) para el oeste de Chihuahua inferida con anillos de árboles. (Bajo Revisión)



- Factor de impacto (2020): 0.712
 - Factor de impacto 5 años: 0.468
 - SCImago Journal Ranking (SJR) (2020): 0.2 (Q3)
-
- **Miranda-Briones, R.,** Cerano-Paredes, J., Sauer, I.J., Esquivel-Arriaga, G., Morató-Farreras, J., & Cervantes-Martínez, R. Climate-growth relationships of tree-ring width of *Pseudotsuga menziesii* and *Pinus arizonica* in northwestern Mexico. (Manuscrito)

LISTA DE ABREVIATURAS

CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (México)
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua (México)
ENSO	El Niño – Oscilación del Sur
EPS	Señal Expresada de la Población
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México)
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (México)
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
PDSI	Índice de Severidad de Sequía de Palmer
RTP	Regiones Terrestres Prioritarias
SMN	Servicio Meteorológico Nacional (México)
VPD	Déficit de Presión de Vapor

ÍNDICE GENERAL

	RESUMEN	I
	ABSTRACT	III
	RESUM	V
1	INTRODUCCIÓN	
1.1	Justificación.....	1
1.2	Objetivo general.....	3
1.3	Objetivos específicos.....	3
2	MARCO TEÓRICO	
2.1	Dendrocronología.....	4
2.1.1	Fundamentos.....	4
2.1.2	Formación del anillo de crecimiento.....	6
2.1.3	Principios y conceptos básicos.....	7
2.1.3.1	Principio de uniformismo.....	7
2.1.3.2	Principio del fechado cruzado.....	8
2.1.3.3	Principio de los factores que influyen en la formación del anillo de crecimiento	9
2.1.3.4	Principio de la selección del sitio.....	10
2.1.3.5	Principio del modelo lineal de agregación del crecimiento de los árboles.....	11
2.1.3.6	Concepto de estandarización.....	12
2.1.3.7	Concepto de calibración y verificación.....	13
2.1.4	Problemas de fechado.....	13
2.1.4.1	Anillos perdidos o ausentes.....	13
2.1.4.2	Anillos falsos o dobles.....	15
2.2	Dendroclimatología.....	16
2.2.1	Fundamentos y aplicaciones en la sustentabilidad.....	16
2.2.2	Reconstrucciones dendroclimáticas en México.....	17
2.3	Dendroecología.....	19
2.3.1	Fundamentos y aplicaciones en la sustentabilidad.....	19
3	MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1	Localización del área de estudio.....	21
3.2	Selección del área de trabajo.....	22
3.3	Relación clima – crecimiento.....	23
3.3.1	Métodos de campo.....	23
3.3.2	Métodos de laboratorio.....	24
3.4	Reconstrucción de la variabilidad climática.....	26
3.4.1	Métodos de campo.....	26
3.4.2	Métodos de laboratorio.....	26

4	RELACIÓN CLIMA-CRECIMIENTO EN EL ANCHO DE ANILLO DE <i>Pseudotsuga menziesii</i> y <i>Pinus arizonica</i> PARA EL OESTE DE CHIHUAHUA	
4.1	Resultados.....	30
4.1.1	Análisis de la evolución temporal de las temperaturas y la precipitación.....	30
4.1.2	Cronologías de ancho anillo de los árboles.....	30
4.1.3	Relación clima-crecimiento.....	32
4.1.4	Estabilidad temporal de la respuesta de crecimiento de los árboles al clima....	35
4.2	Discusión.....	38
4.2.1	Sensibilidad de las series.....	38
4.2.2	Respuesta a las variables climáticas.....	39
4.2.3	Estabilidad temporal.....	40
5	PRECIPITACIÓN INVIERNO-PRIMAVERA (1660-2018) PARA EL OESTE DE CHIHUAHUA INFERIDA CON ANILLOS DE ÁRBOLES	
5.1	Resultados.....	42
5.1.1	Fechado de muestras.....	42
5.1.2	Función de respuesta.....	43
5.1.3	Reconstrucción de la precipitación.....	44
5.1.4	Calibración y verificación del modelo.....	46
5.1.5	Variabilidad de la precipitación reconstruida.....	47
5.1.6	Influencia del ENSO sobre la variabilidad de la lluvia.....	50
5.2	Discusión.....	51
5.2.1	Sensibilidad de las series.....	51
5.2.2	Variabilidad común de las series.....	51
5.2.3	Respuesta de la cronología a la variabilidad de la precipitación.....	51
5.2.4	Sequías reconstruidas.....	52
5.2.5	Influencia del ENSO sobre la precipitación.....	54
6	CONCLUSIONES.....	55
7	BIBLIOGRAFÍA.....	57
8	ANEXOS	
8.1	Anexo I.....	69
8.2	Anexo II.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Patrones de crecimiento de diferentes árboles de <i>P. menziesii</i> del sitio de El Santuario, municipio de Madera, en el estado norteño de Chihuahua.....	6
Figura 2.	Microfotografía que ilustra una secuencia de cuatro anillos de <i>P. menziesii</i> (1871-1874) del suroeste de Nuevo México.....	7
Figura 3.	Ilustración esquemática del Fechado Cruzado.....	8
Figura 4.	Principio de sensibilidad en el crecimiento del anillo del árbol.....	11
Figura 5.	A) Diagrama que ilustra la superficie de secciones en tres niveles diferentes. B) Comparación de patrones de crecimiento entre dos diferentes muestras.....	14
Figura 6.	Anomalías en anillos de crecimiento de <i>P. arizonica</i>	15
Figura 7.	Localización de las reconstrucciones climáticas realizadas en México.....	18
Figura 8.	Localización geográfica de los sitios de estudio en la cuenca del Río Yaqui, en la parte oeste del estado de Chihuahua.....	21
Figura 9.	Ejemplar de un <i>P. arizonica</i> longevo localizado en el área de estudio.....	23
Figura 10.	Extracción de un núcleo de crecimiento (también conocido como viruta) de un <i>P. menziesii</i>	24
Figura 11.	Para extraer la muestra, el taladro Pressler se ubica en lo que se cree puede serla médula del árbol.....	26
Figura 12.	El sistema de medición VELMEX es un instrumento estándar para medir el ancho de los anillos de crecimiento.....	27
Figura 13.	Datos climáticos para el periodo 1957-2015, A) temperatura anual promedio máxima (rojo), media (negra) y mínima (azul), B) precipitación anual.....	30
Figura 14.	Cronología estándar de A) <i>P. menziesii</i> en el sitio El Santuario y B) <i>P. arizonica</i> en el sitio La Norteña.....	31
Figura 15.	Análisis de correlación entre la cronología de ancho de anillo de <i>P. menziesii</i> y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio.....	32
Figura 16.	Análisis de función de respuesta bootstrap entre la cronología de ancho de anillo de <i>P. menziesii</i> y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio.....	33
Figura 17.	Análisis de correlación entre la cronología de ancho de anillo de <i>P. arizonica</i> y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio.....	34
Figura 18.	Análisis de función de respuesta bootstrap entre la cronología de ancho de anillo de <i>P. arizonica</i> y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio.....	35

Figura 19.	Funciones de correlación móvil relacionando el crecimiento de anillo de <i>P. menziesii</i> (izquierda) y <i>P. arizonica</i> (derecha) y la precipitación (A y E), temperatura máxima promedio (B y F), temperatura media promedio (C y G), temperatura mínima promedio (D y H), respectivamente, desde el mes de julio del año anterior hasta diciembre del año actual (18 meses).....	37
Figura 20.	Cronología compuesta de anillo total de <i>P. menziesii</i> , <i>P. arizonica</i> y <i>P. strobiformis</i> para El Santuario y La Norteña.....	42
Figura 21.	Análisis de función de respuesta entre la precipitación mensual y acumulada con la cronología regional estándar (A y B) y residual (C y D).....	44
Figura 22.	Asociación entre A) el índice de anillo total y la precipitación regional octubre-junio del periodo 1980-2015, B) modelo de regresión lineal entre ambas variables y C) comparación de la precipitación reconstruida octubre-junio (línea sólida) y la precipitación observada (línea punteada) (1980-2015), verificación y calibración del modelo de regresión.....	45
Figura 23.	Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera de los últimos 359 años para el oeste de Chihuahua.....	47
Figura 24.	Análisis espectral de la precipitación regional de precipitación reconstruidas para el oeste de Chihuahua.....	49
Figura 25.	Correlación espacial entre la precipitación reconstruida y el PDSI de los meses junio, julio y agosto (JJA) para cuatro eventos extremos de sequía.....	49
Figura 26.	Espectro de ondeleta para A) la precipitación reconstruida y B) el índice ENSO 3.4. C) Análisis de coherencia de ondeletas entre la serie de precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4.....	50

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Estaciones meteorológicas localizadas cerca del área de estudio.....	25
Cuadro 2.	Estaciones climáticas utilizadas para el análisis dendrocronológico.....	28
Cuadro 3.	Parámetros estadísticos de las cronologías.....	32
Cuadro 4.	Coefficientes de correlación más importantes entre los datos climáticos y las cronologías de ancho de anillo de <i>P. menziesii</i> y <i>P. arizonica</i>	38
Cuadro 5.	Parámetros estadísticos de las cronologías.....	43
Cuadro 6.	Calibración para la reconstrucción de la precipitación octubre-junio en el oeste de Chihuahua, México a partir de la cronología estándar regional de ancho de anillo.....	46
Cuadro 7.	Estadísticas de verificación para la reconstrucción de la precipitación de octubre-junio para el oeste de Chihuahua a partir de una cronología estándar regional de ancho de anillo.....	46
Cuadro 8.	Años reconstruidos con ocurrencia de sequías (precipitación inferior a la media reconstruida de 277.4 mm) y periodos húmedos (precipitación superior a la media reconstruida de 277.4 mm) en el área de estudio.....	48

RESUMEN

Los anillos de los árboles juegan un papel relevante en la reconstrucción de variables climáticas en escalas de siglos o milenios. En presencia del cambio climático antropogénico, y en ausencia de registros meteorológicos extensos, los estudios dendrocronológicos en áreas boscosas han cobrado mayor relevancia en las últimas décadas debido a los datos de alta resolución que se pueden obtener de los anillos de los árboles. Lo anterior permite analizar tendencias en las series y la influencia de fenómenos climáticos en su variabilidad para así predecir eventos climáticos extremos y conocer sus posibles impactos tanto en la dinámica de los ecosistemas como en la comunidad social. En el presente trabajo de investigación, se consideraron dos casos de estudio con el objetivo común de reconstruir la variabilidad climática para el oeste de Chihuahua, México.

En el primer caso de estudio, se desarrollaron series dendrocronológicas para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Pinus arizonica* Engelm. con el objetivo tanto de evaluar la influencia de las variables climáticas en el crecimiento total de ambas especies como de examinar posibles cambios en el régimen climático a través de datos instrumentales. Para evaluar la relación entre los datos climáticos y los datos estandarizados de ancho de anillo de ambas especies, se realizaron análisis de correlación y de función de respuesta estáticas basados en coeficientes de regresión parcial de 1000 estimaciones bootstrap. Además, se realizó un análisis de correlación móvil utilizando una ventana de 40 años, con un año de compensación y con una ventana de 18 meses de registros meteorológicos. Se detectó que la precipitación de noviembre a mayo influyó positivamente en el crecimiento de ambas especies, aunque únicamente representó el 20% de la precipitación anual, mientras que la temperatura máxima invierno-primavera afectó negativamente su desarrollo. Por otra parte, la respuesta climática de *P. menziesii* no ha variado con el paso del tiempo en tanto que la de *P. arizonica* ha comenzado a responder de manera similar a la de *P. menziesii* en los últimos años, quizás causado por cambios en los patrones de lluvia. Bajo un escenario de cambio climático derivado de la actividad del ser humano, con menos lluvia y temperaturas más elevadas, ambas especies son susceptibles a sufrir eventos frecuentes de incendios o brotes de insectos, así como ver mermado su desarrollo.

En el segundo caso de estudio, con el objetivo de reconstruir la variabilidad de la precipitación, se desarrollaron dos cronologías, El Santuario con base en los anillos de crecimiento de *P. menziesii*, *P. arizonica* y *Pinus strobiformis* Engelm., y La Norteña con *P. arizonica*. Se determinó una correlación significativa entre las dos series y se desarrolló una cronología regional. Un análisis de función de respuesta determinó que la precipitación octubre-junio es la variable que más influye en el crecimiento, explicando el 52% de la variabilidad. Se reconstruyó la precipitación invierno-primavera de los últimos 359 años (1660-2018). La reconstrucción fue validada con registros de precipitación observada, un análisis de correlación

espacial con índices de sequía e información de archivos históricos. Se detectaron sequías severas para los periodos 1680-1688, 1695-1707, 1817-1822, 1889-1897, 1908-1911, 1925-1930, 1934-1939 y 2011-2018. Las sequías más extremas se registraron en los periodos 1751-1768, 1807-1810 y 1945-1956, las cuales afectaron gran parte del territorio mexicano, provocando daños económicos a millones de personas. El análisis espectral de coherencia de ondeletas indicó que, la variabilidad de la precipitación reconstruida ha estado modulada de forma significativa por el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) a diferentes escalas de tiempo y frecuencias en los últimos 100 años.

Palabras Claves: Dendrocronología, ENSO, Precipitación, Sequías, Variabilidad Climática

ABSTRACT

Tree rings play a relevant role for the reconstruction of climatic variables on centuries or millennia-scale. In the presence of anthropogenic climate change, and in the absence of extensive meteorological records, dendrochronological studies in forested areas have gained more importance in recent decades because of the high-resolution data that can be obtained from tree-rings. These data may allow to analyze trends in the series and the influence of climatic phenomena on their variability in order to predict extreme climate events and to know their possible impacts on both ecosystem dynamics and the social community. In this research project, two case studies were analyzed with the common objective of reconstructing the climatic variability for western Chihuahua, Mexico.

In the first case study, tree-ring chronologies for *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco and *Pinus arizonica* Engelm. were developed with the objective of both evaluating the influence of climatic variables on the total growth of both species and examining possible shifts in climate regime through instrumental data. In order to evaluate the relationships between climate data and the standardized tree-ring width data of both species, static correlation and response functions were computed based on partial regression coefficients from 1000 bootstrapped estimates. Further, a moving correlation analysis was calculated using a 40-year window with 1-year offset and an 18-month window of meteorological records. It was detected that the precipitation from November to May positively influenced the growth of both species even though it only represented the 20% of the annual rainfall while the winter-spring maximum temperature negatively affected their development. Besides climatic response of *P. menziesii* has not varied over time while *P. arizonica* has begun to respond similarly to *P. menziesii* in recent years. In a climate change scenario derived from human activity, with less rain and higher temperatures, it is expected that both species are affected in their growth response and are susceptible to insect outbreaks or fires events

In the second case study, two chronologies were developed in order to reconstruct the variability of precipitation: El Santuario based on the growth rings of *P. menziesii*, *P. arizonica* and *Pinus strobiformis* Engelm., and La Norteña with *P. arizonica*. It was determined a significant correlation between the two series and a regional chronology was developed. Through an analysis of the response function, it was determined that the October-June precipitation was the one that most influenced tree growth, accounting for 52% of the variability. The winter-spring precipitation was reconstructed for the last 359 years (1660-2018). The reconstructed chronology was verified with instrumental climatic data, a spatial correlation analysis with drought indices and historic archives. Severe droughts were detected for the periods 1680-1688, 1695-1707, 1817-1822, 1889-1897, 1908-1911, 1925-1930, 1934-1939 and 2011-2018. The extreme droughts for the periods 1751-1768, 1807-1810 and 1945-1956 stood out as those in which much of the Mexican territory was affected, causing a great economic damage to millions of people. The wavelet coherence analysis

indicated that El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomenon has significantly modulated the variability of the reconstructed precipitation at different time and frequency scales over the last 100 years.

Keywords: Dendrochronology, ENSO, Precipitation, Droughts, Climatic Variability

RESUM

Els anells dels arbres juguen un paper rellevant en la reconstrucció de variables climàtiques a escales de segles o mil·lennis. En presència del canvi climàtic antropogènic i en absència de registres meteorològics extensos, els estudis dendrocronològics en àrees forestals han cobrat més rellevància en les últimes dècades degut a les dades de resolució que es puguin obtenir dels anells dels arbres. L'anterior permet un anàlisi de tendències a les sèries i la influència de fenòmens climàtics en la seva variabilitat per així predir esdeveniments climàtics extrems i conèixer els seus possibles impactes tant en la dinàmica dels ecosistemes com a la comunitat social. En el present treball d'investigació es consideren dos casos d'estudi amb el objectiu comú de reconstruir la variabilitat climàtica per l'oest de Chihuahua, Mèxic.

En el primer cas d'estudi, es van desenvolupar sèries dendrocronològiques per *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco i *Pinus arizonica* Engelm. amb l'objectiu tant d'avaluar la influència de les variables climàtiques en el creixement total de les dues espècies com d'examinar possibles canvis en el règim climàtic a través de dades instrumentals. Per avaluar la relació entre les dades climàtiques i les dades estandarditzades d'ample d'anell de les dues espècies, es van realitzar anàlisis de correlació i de funció de resposta estàtiques basats en coeficients de regressió parcial de 1000 estimacions bootstrap. A més, es va realitzar un anàlisi de correlació mòbil utilitzant una finestra de 40 anys, amb un any de compensació i amb una finestra de 18 mesos de registres meteorològics. Es va detectar que la precipitació de novembre a maig va influir positivament en el creixement de les dues espècies, encara que únicament va representar el 20% de la precipitació anual, mentre que la temperatura màxima hivern-primavera va afectar negativament el seu desenvolupament. D'altra banda, la resposta climàtica de *P. menziesii* no ha variat amb el pas el temps mentre que la de *P. arizonica* ha començat a respondre de manera similar a la de *P. menziesii* en els últims anys, potser causat per canvis en els patrons de pluja. Amb un escenari de canvi climàtic derivat de l'activitat de l'ésser humà, amb menys pluja i temperatures més elevades, les dues espècies són susceptibles a patir esdeveniments freqüents d'incendis o brots d'insectes, així com veure minvat el seu desenvolupament.

En el segon cas d'estudi, amb l'objectiu de reconstruir la variabilitat de la precipitació, es van desenvolupar dues cronologies, El Santuario, amb base en els anells de creixement de *P. menziesii*, *P. arizonica* i *Pinus strobiformis* Engelm., i La Norteña amb *P. arizonica*. Es va determinar una correlació significativa entre les dues sèries i es va desenvolupar una cronologia regional. Una anàlisi de funció de resposta va determinar que la precipitació octubre-juny és la variable que més influeix en el creixement, explicant el 52% de la variabilitat. Es va reconstruir la precipitació hivern-primavera dels últims 359 anys (1660-2018). La reconstrucció va ser validada amb registres de precipitació observada, una anàlisi de correlació espacial amb índexs de sequera i informació d'arxius històrics. Es van detectar sequeres severes per als períodes 1680-1688, 1695-1707, 1817-1822, 1889-1897, 1908-1911, 1925-1930, 1934-1939 i 2011-2018. Les sequeres

més extremes es van registrar en els períodes 1751-1768, 1807-1810 i 1945-1956, les quals van afectar gran part del territori mexicà, provocant danys econòmics a milions de persones. L'anàlisi espectral de coherència de ondeles va indicar que, la variabilitat de la precipitació reconstruïda ha estat modulada de forma significativa pel fenomen El Niño-Oscil·lació del Sud (ENSO) a diferents escales de temps i freqüències en els últims 100 anys.

Paraules Claus: Dendrocronologia, ENSO, Precipitació, Sequeres, Variabilitat Climàtica

1 INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

La influencia humana en el sistema climático es clara y las emisiones de gases de efecto invernadero son las más altas en la historia de la humanidad (IPCC, 2014). Los efectos del cambio climático antropogénico, es decir, el aumento de la temperatura de la atmósfera y de los océanos, los cambios a gran escala de los patrones de precipitación, la disminución de la capa de nieve y hielo y el aumento del nivel del mar están comenzando a tener un impacto generalizado en los sistemas humanos y naturales (Sohar *et al.*, 2016). Esto ha desencadenado una mayor ocurrencia de eventos climáticos extremos que han favorecido o dañado a todos los ecosistemas del planeta (Adams *et al.*, 2017; Seidl *et al.*, 2017).

En cuanto a los ecosistemas forestales, temperaturas más cálidas generalmente incrementan la duración de la temporada de crecimiento y cambian los rangos geográficos de algunas especies de coníferas, lo cual provoca el desplazamiento de ciertas clases de árboles hacia el norte o hacia altitudes mayores (Janetos *et al.*, 2008). Además, el cambio climático probablemente aumentará los eventos de lluvia extrema, promoviendo las tasas de crecimiento de los árboles en regiones donde la precipitación es un factor limitante (Carlón-Allende *et al.*, 2018). No obstante, también se espera que aumente el riesgo de sequías que podrían causar daños importantes, como una disminución en el crecimiento de los árboles debido al estrés hídrico, un aumento del riesgo de incendios forestales ya que los árboles secos proporcionan combustible a los incendios, y un aumento de brotes de insectos y enfermedades debido a una reducción en la capacidad de los árboles para producir savia (Dale *et al.*, 2001; Ryan *et al.*, 2008).

Por las razones antes mencionadas, el crecimiento de los árboles podría ser un bioindicador útil, proporcionando información sobre la sostenibilidad de los bosques, así como conocimiento de las variaciones climáticas naturales históricas (Fritts, 1976). A través de los anillos de crecimiento de muchas especies de árboles, es posible reconstruir una variedad de eventos ambientales pasados que directa o indirectamente han limitado su desarrollo, tales como la temperatura, la lluvia, los brotes de insectos y los incendios, por mencionar solo algunas aplicaciones (Swetnam & Brown, 2010). En presencia del cambio climático antropogénico, y en ausencia de registros meteorológicos extensos, los estudios dendrocronológicos en áreas boscosas han cobrado mayor relevancia en las últimas décadas debido a los datos de alta resolución que se pueden obtener de los anillos de los árboles, los cuales permiten a los científicos predecir eventos climáticos extremos y conocer sus posibles impactos tanto en la dinámica de los ecosistemas como en la comunidad social (Speer, 2010).

La región fronteriza de los estados mexicanos de Chihuahua y Sonora, que se ubica en la parte norte de la Sierra Madre Occidental, tiene un gran valor ambiental debido al nacimiento de varios afluentes, como el

río Fuerte y el río Yaqui, los cuales que permiten la recarga de los acuíferos, y a su alta diversidad de especies, algunas de ellas endémicas (Descroix *et al.*, 2004). De igual forma, constituye un corredor biológico entre los ecosistemas del norte y del sur, por lo que es refugio de una importante variedad de especies de flora y fauna, que brindan diversos servicios ambientales a las comunidades de la zona (Cruz-Maldonado, 2010). Además, alberga importantes bosques de pino-encino, con un grado de perturbación relativamente menor en comparación con otros bosques de coníferas ubicados en la Sierra Madre Occidental, y donde es posible encontrar especies pertenecientes a los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Picea*, *Arbutus*, *Prunus* y *Juniperus* (Lammertink *et al.*, 1996; Fule & Covington, 1997).

En esta región de la Sierra Madre Occidental, *Pinus arizonica* Engelm. domina gran parte de los bosques de altura desde los 2,200 hasta los 2,700 metros (González-Elizondo *et al.*, 2012). Sin embargo, también es posible localizar rodales aislados y dispersos de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y de *Pinus strobiformis* Engelm. en estas altitudes (Cruz-Maldonado, 2010). Estas coníferas tienen la característica de ser especies muy longevas, con una esperanza de vida de más de 400 años, período en el que sus anillos de crecimiento registran las condiciones climáticas imperantes durante su desarrollo, así como los eventos extremos que han ocurrido como incendios, brotes de insectos y enfermedades (Barton *et al.*, 2001; Villanueva Díaz *et al.*, 2008). Con esta información, es concebible conocer la variabilidad histórica del clima y la influencia que tienen los fenómenos de circulación atmosféricos en dicha variabilidad, para estudiar los posibles impactos que podría sufrir el ecosistema ante la presencia de diferentes escenarios de cambio climático, y determinar la disponibilidad de servicios ambientales en esta zona de la Sierra Madre Occidental.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de esta investigación fue reconstruir la variabilidad climática para el oeste de Chihuahua, México, empleando un enfoque dendrocronológico.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar series dendrocronológicas para *P. menziesii* y *P. arizonica* para la zona oeste del estado de Chihuahua.
- Correlacionar los anchos de anillos de cada especie con las precipitaciones y temperaturas mensuales de la región.
- Evaluar la influencia de las variables climáticas en el crecimiento total de ambas especies.
- Examinar posibles cambios en el régimen climático a través de datos instrumentales.
- Reconstruir la variabilidad de la precipitación para la región oeste del estado de Chihuahua con base en los anillos de crecimiento anual de *P. menziesii*, *P. arizonica* y *P. strobiformis*.
- Determinar frecuencias de eventos extremos (sequías).
- Analizar la influencia de fenómenos climáticos de circulación general, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) en la variabilidad histórica del clima.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 DENDROCRONOLOGÍA

2.1.1 FUNDAMENTOS

La dendrocronología, o fechado de anillos de los árboles como también se le conoce, se define como el estudio de la secuencia cronológica de los anillos de crecimiento anuales en los árboles, para la obtención de información sobre eventos y procesos históricos ambientales (Stokes & Smiley, 1996). Es una de las técnicas de registro ambiental más importantes que existen y una de las maneras para detectar los cambios causados por el ser humano al medio ambiente (como contaminación, cambio de patrones climáticos, entre otros) (Speer, 2009). La palabra dendrocronología tiene sus raíces en el idioma griego: “*dendro*” que significa árbol, “*cronos*” tiempo, y “*logos*” estudio o conocimiento de.

El botánico y filósofo griego Teofrasto (371 a.C. – 287 a.C.) fue el primero en mencionar la existencia de los anillos de crecimiento en los árboles (Studhalter, 1955). Sin embargo, no fue hasta finales del siglo XV que Leonardo da Vinci, en su escrito *Trattato della Pittura*, describió la formación anual de dichos anillos y sugirió que su crecimiento podría estar influenciado por las condiciones ambientales del lugar (Stallings, 1937; Sarton, 1954).

A lo largo de los siguientes siglos, científicos de diferentes partes del mundo reconocieron el crecimiento de los anillos en los árboles y realizaron múltiples pruebas para demostrar que éstos se producían de manera anual (Studhalter, 1955; Schweingruber, 1988). No obstante, la ciencia de la dendrocronología moderna tiene sus orígenes a inicios del siglo XX con el astrónomo estadounidense Andrew Ellicott Douglass (Webb, 1983).

Mientras vivía y trabajaba en Flagstaff, Arizona, Douglass se percató no solo de la variación en el ancho de los anillos de los árboles, sino también que dicha variabilidad era similar entre los diferentes árboles de la zona. Años más adelante pudo comprobar que el clima, y más específicamente la precipitación, era el componente ambiental que causaba que los árboles de una misma región mostraran patrones similares en los anillos de crecimiento (Douglass, 1909). Además, concluyó que dichos anillos podían ser fechados para conocer el año exacto de su formación. Así, en 1929, Douglass pudo determinar por primera vez la edad exacta de decenas de ruinas indígenas prehistóricas en el suroeste de los Estados Unidos, al aplicarle a la madera la técnica del fechado cruzado (Becker, 1992).

Con el paso de los años, el número de personas especializadas en el área de la dendrocronología ha aumentado en todo el mundo. Más de un siglo de investigaciones ha dado como resultado toda una red de cronologías de anillos de crecimiento de los árboles la cual abarca todos los continentes (excepto la

Antártida). Dependiendo de su ubicación, las cronologías de anillos de los árboles registran diferentes señales climáticas. Por ejemplo, en regiones semiáridas, la variación en el ancho del anillo de crecimiento es influenciada por la precipitación, mientras que en latitudes altas la temperatura es la que limita el desarrollo (Anchukaitis, 2017).

La dendrocronología es posible por el hecho que, en muchas especies de árboles, los anillos de crecimiento visibles en una sección transversal muestran patrones característicos (Figura 1). De acuerdo con (Stokes & Smiley, 1996), cuatro condiciones son las necesarias para que estos modelos sean utilizados en el fechado de una muestra.

1. Los árboles utilizados deben agregar únicamente un anillo por cada temporada de crecimiento (conocido como anillo anual). Las especies que agregan más de un anillo durante una temporada de crecimiento no pueden ser utilizadas para el proceso de fechado.
2. Aunque el crecimiento estacional total es el resultado de muchos factores interactivos, como genéticos y medioambientales, solo un factor ambiental debe dominar para limitar el crecimiento. Para el noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos, el factor limitante que predomina es la precipitación.
3. El factor climático limitante del crecimiento debe variar en intensidad de un año a otro, reflejando fielmente dicha variación en su anchura los anillos anuales resultantes. Aunque el ancho del anillo no es necesariamente directamente proporcional a la precipitación, los anillos deben ser estrechos en años de sequía y notablemente más anchos en años de lluvia.
4. La variable limitante de crecimiento ambiental debe de ser uniformemente efectiva en una gran área geográfica. Pequeñas diferencias siempre existirán, pero los patrones de los anillos de crecimiento serán lo suficientemente similares para permitir el fechado cruzado entre los árboles aun cuando crezcan a muchos kilómetros de distancia.

Debido a que el árbol se convierte en el instrumento para el monitoreo ambiental, proporciona un bioindicador excelente a largo plazo que se extiende durante toda su vida. La dendrocronología es utilizada, preferentemente, en árboles muy viejos para la obtención de registros a largo plazo de temperaturas pasadas, precipitación, incendios, brotes de insectos, deslizamientos de tierra, huracanes, afluentes de ríos, por nombrar únicamente algunas de sus aplicaciones. Además, la madera de ejemplares muertos es de mucha utilidad para poder extender la cronología de los anillos de crecimiento más atrás en el tiempo. En vista de todo lo mencionado, este tipo de registro proxy es utilizado en el desarrollo del presente trabajo de investigación.



Figura 1. Patrones de crecimiento de diferentes árboles de *P. menziesii* del sitio de El Santuario, municipio de Madera, en el estado norteño de Chihuahua. La variación de los anillos de crecimiento se debe a la influencia del clima regional, procesos ecológicos y fenómenos geológicos. Los diferentes árboles muestran una variabilidad común en el crecimiento, debido a bajas precipitaciones, en los años 1974, 1982, 1989 y 1996, y a abundantes lluvias en los años 1988 y 1991 (Fotografía de Ricardo Miranda Briones).

2.1.2 FORMACIÓN DEL ANILLO DE CRECIMIENTO

Un árbol crece al aumentar su altura (crecimiento apical) y al aumentar su anchura (crecimiento radial). Este crecimiento es el resultado de la actividad celular en los tejidos meristemáticos en las dos regiones de la planta. El meristemo apical forma el tejido primario que hace que el árbol desarrolle la longitud de su tallo y ramas. Por su parte, el meristemo lateral (o también llamado cambium vascular) forma el tejido secundario que resulta en un aumento en el diámetro. Este cambium vascular origina anualmente dos tipos de capas de células adultas conocidas como xilema (parte interior) y floema (parte exterior). Una vez que se ha formado el tejido primario comienza el crecimiento de la xilema, la cual se desarrolla en la parte exterior del año previo, apareciendo como un anillo (Stokes & Smiley, 1996).

En las gimnospermas (plantas que no producen flores como lo son las coníferas) la xilema se compone principalmente de traqueidas, las cuales transportan el agua desde las raíces hasta las hojas. Es en esta clase de árboles en donde se presenta una producción anual de anillos de crecimiento la cual está compuesta en dos partes, madera temprana y madera tardía (Figura 2).

La madera temprana está constituida por traqueidas que tienen un gran lumen (la abertura en el centro de la célula) en relación con las paredes celulares, dando esto un color claro. Por su parte, las traqueidas de la madera tardía tienen un lumen más compacto con respecto a las paredes celulares y, por lo tanto, aparecen más oscuras. Como lo indican sus nombres, la madera temprana generalmente se produce en primavera y principios del verano (época de crecimiento) mientras que la madera tardía se forma a finales del verano (Fritts, 1966). Sin embargo, lo anterior puede variar dependiendo de la especie y de las condiciones climáticas presentes en el lugar. Es en este brusco contraste entre las células de la madera tardía de la última

estación de crecimiento, y las células de la madera temprana de la temporada siguiente lo que delinea el límite de un anillo anual.

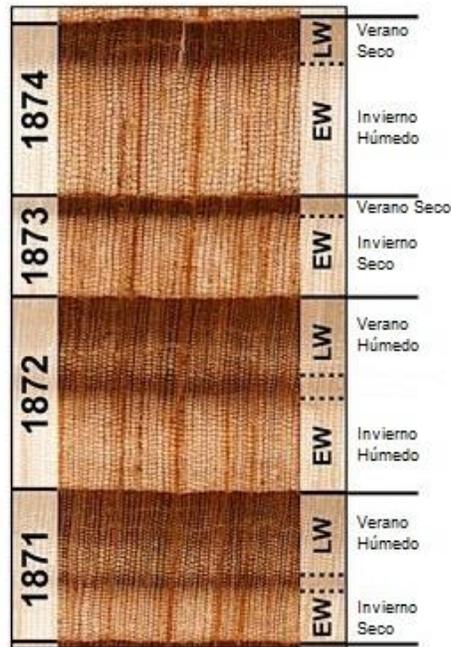


Figura 2. Microfotografía que ilustra una secuencia de cuatro anillos de *P. menziesii*. (1871-1874) del suroeste de Nuevo México. Cada anillo de crecimiento anual está compuesto de madera temprana de color claro (EW) y madera tardía de color oscuro (LW). La variabilidad en el ancho de la EW es una función de la precipitación en la estación fría mientras que la variabilidad en el ancho de la LW corresponde a la precipitación en la estación cálida. Se puede apreciar que los años 1871 y 1872 contienen variaciones de densidad intra-anales conocidos como “anillos falsos”, los cuales son comunes en muchas especies y probablemente son el resultado de una sequía estacional (tomado de Griffin *et al.*, 2013).

2.1.3 PRINCIPIOS Y CONCEPTOS BÁSICOS

2.1.3.1 Principio de Uniformismo

El principio de uniformismo, mencionado por primera vez por el científico James Hutton en 1785, es una presunción básica de la geología y de algunas ciencias naturales, la cual establece que “el presente es la clave del pasado” (Bradley, 2011). Esta conjetura, en las reconstrucciones paleoclimáticas, trae consigo diferentes implicaciones.

La primera de estas es que los procesos físicos y biológicos que relacionan al medio ambiente de hoy, con las variaciones actuales en el crecimiento de los árboles, también estaban ocurriendo en el pasado. Y la segunda, es que se puede inferir que las condiciones ambientales asociadas con las características actuales de los anillos de crecimiento también existieron en el pasado (Fritts & Swetnam, 1989). Este principio no

implica que las condiciones ambientales, o de crecimiento de los árboles, fueran todas las mismas en el pasado que en el presente, solo que las relaciones que los rigen deben haber sido las mismas.

2.1.3.2 Principio del Fechado Cruzado

El fechado cruzado (o crossdating, en inglés) es el principio básico de la dendrocronología. Es la principal herramienta por la cual se determina el año exacto de crecimiento de cada anillo anual (Speer, 2009). Los árboles que crecen en una misma zona responden a factores ambientales externos de una manera similar, dando como resultado patrones de anillos anchos y delgados. El fechado cruzado es el reconocimiento del mismo patrón de anillos en diferentes árboles, de modo que la fecha de crecimiento de cualquier anillo del patrón es la misma en los diferentes árboles, pudiendo llevar una cronología a través de un árbol a otro (Douglass, 1941).

Utilizando tanto árboles vivos como muertos es posible extender una cronología muy atrás en el tiempo (Figura 3), siempre que las diferentes muestras se sobrepongan y se identifiquen patrones similares de variación en el ancho del anillo. Cuando una cronología se extiende a una fecha que es conocida, se puede asignar un año calendario a cada anillo. La cronología más extensa conocida en la actualidad se remonta hasta el año 10,400 a.C. (Friedrich *et al.*, 2004).

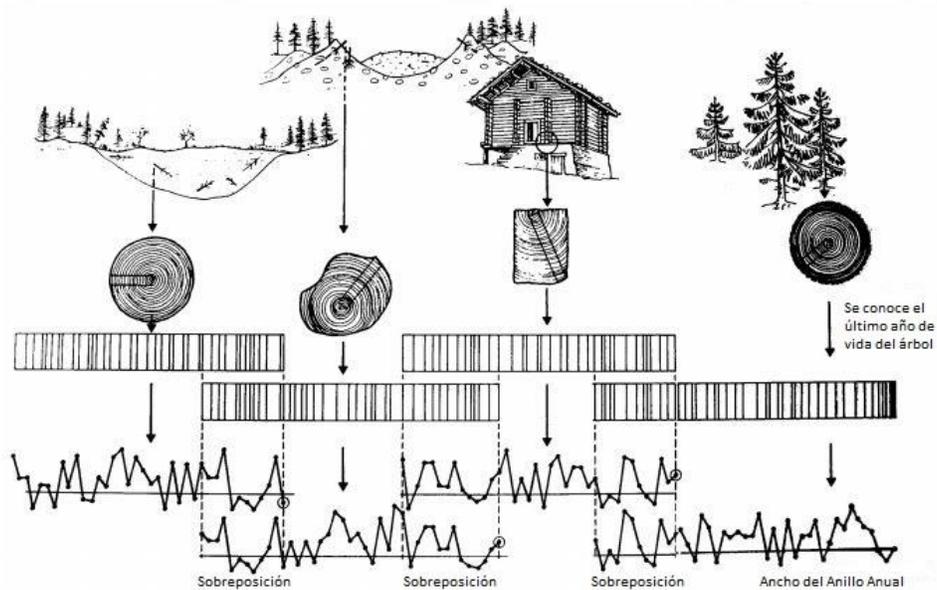


Figura 3. Ilustración esquemática del Fechado Cruzado. Las muestras de diferentes sitios se pueden cruzar cuando los intervalos de tiempo que abarca cada una se sobreponen y se identifican patrones similares de variación en el ancho del anillo. Utilizando árboles vivos y muertos, una serie dendrocronológica es posible extenderla en el tiempo (tomado de Schweingruber, 1988).

El principio del fechado cruzado es de mucha importancia ya que un simple conteo de anillos de crecimiento puede producir errores debido a la presencia de anillos falsos, dobles o ausentes. El fechado cruzado es

imprescindible cuando se comparan las mediciones de anchura de anillo con fenómenos anuales tales como los datos meteorológicos. Sin la datación anual exacta de los anillos de crecimiento de los árboles, la calibración precisa resulta imposible debido a que la cronología estará desfasada por uno o más años (Speer, 2009).

2.1.3.3 Principio de los Factores que Influyen en la Formación del Anillo de Crecimiento

Como ya se ha mencionado, los anillos de crecimiento de los árboles no lucen todos igual. El ancho medio del anillo del árbol es una función de muchas variables, incluidas la especie del árbol, la edad, su disponibilidad de nutrientes del suelo y toda una serie de factores climáticos (Salhab *et al.*, 2018). La precipitación y la temperatura del aire son las dos variables más comúnmente relacionadas con el crecimiento de los árboles; otros factores ambientales como la humedad del suelo, la luz, el viento y la humedad relativa también pueden afectar el crecimiento, pero están asociados con las fluctuaciones en la precipitación y la temperatura del aire (Fritts, 1971). Una limitación en cualquiera de estas variables puede alterar el comienzo y el final del período de crecimiento, la tasa de división celular y la expansión de las células, afectando a su vez el número y el tamaño de las traqueidas que se producen y, por lo tanto, el ancho del anillo (Fritts, 1976).

Temperatura

La temperatura es el factor más importante para el inicio del crecimiento de los anillos de los árboles en climas boreales y templados (Creber & Chaloner, 1984). En latitudes altas, la producción de células nuevas cesa a mediados de agosto, y la duración de la temporada de crecimiento está determinada principalmente por la fecha de inicio de la actividad cambial, la cual tiene lugar en el mes de abril (Mikola, 1962; Briffa *et al.*, 1988). Sin embargo, este comienzo puede retrasarse debido a temperaturas inusualmente frías. Para regiones subárticas se ha encontrado que el aumento de la temperatura y el deshielo de principios de verano son muy importantes para la variación en el crecimiento de los anillos de los árboles (Vaganov *et al.*, 1999). La corta duración de la temporada de crecimiento favorece el desarrollo de anillos estrechos en los árboles. Sin embargo, una temporada de crecimiento más larga de lo normal, debido a las altas temperaturas, aumentará el porcentaje de madera tardía. Lo anterior ha permitido el desarrollo de múltiples reconstrucciones de temperatura de verano en distintas partes del mundo, específicamente, en los países nórdicos (Anchukaitis *et al.*, 2013; Rydval *et al.*, 2017; Fuentes *et al.*, 2017).

Precipitación

El crecimiento de los árboles en las regiones semiáridas, como el noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos, está limitado principalmente por el estrés hídrico y no por la temperatura, siendo

responsable de la variabilidad en el ancho de los anillos de crecimiento (Speer, 2009). Durante un año con escasa precipitación, es probable que el agua sea lo suficientemente deficiente como para limitar el desarrollo celular, provocando la aparición de un anillo estrecho. Por el otro lado, un año en donde la precipitación sea abundante, permitirá la división celular y la expansión de las células, resultando en la formación de un anillo ancho (Fritts, 1976).

2.1.3.4 Principio de la Selección del Sitio

El crecimiento de un árbol depende de una serie compleja de interacciones entre factores genéticos y medioambientales. La composición genética del árbol determina qué ambientes el ejemplar tolerará y controlará la respuesta que dicho árbol tendrá bajo estas condiciones ambientales (Stokes & Smiley, 1996). Por su parte, el medio ambiente suministra los nutrientes, el agua y la energía radiante necesaria para los procesos fotosintéticos y metabólicos. De esta manera, entre más factores ambientales estén presentes en el sitio para el desarrollo del árbol, la variación en el ancho de los anillos de crecimiento será menor. Por el otro lado, cuanto más limitados se encuentren dichos factores ambientales en el lugar, mayor será la variación del ancho entre los anillos de crecimiento del árbol. Debido a eso, a la falta de variabilidad en el ancho de los anillos se le conoce como “complacencia” (o no sensible) y a la existencia de variación en el ancho de los anillos como “sensibilidad” (Fritts, 1976).

La sensibilidad es una característica que se vuelve importante solo en presencia de la técnica del fechado cruzado. Si no hay sensibilidad, no hay patrones en los anillos de crecimiento y, por lo tanto, no puede haber una comparación cruzada con muestras de otros árboles (Douglass, 1941). Los ejemplares útiles para la datación de anillos de árboles crecerán en entornos que producen series "sensibles" de patrones de crecimiento de anillos en los árboles (Figura 4).

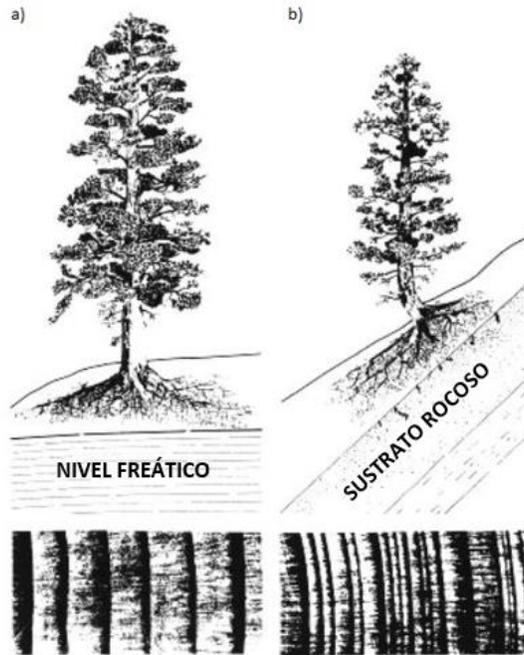


Figura 4. Principio de sensibilidad en el crecimiento del anillo del árbol. Se considera que un árbol es complaciente (o no sensible) a las condiciones ambientales cuando presenta anillos de crecimiento de mismo tamaño (árbol de la izquierda). Por el otro lado, un árbol es considerado sensible a las condiciones ambientales de su entorno cuando presenta mucha variabilidad en el tamaño de los anillos de crecimiento (árbol de la derecha) (tomado de Stokes & Smiley, 1996).

2.1.3.5 Principio del Modelo Lineal de Agregación del Crecimiento de los Árboles

El principio de Agregación del Crecimiento de los Árboles sugiere que los árboles registran todo lo que afecta su desarrollo, traduciéndose al final de cada estación de crecimiento en un incremento radial. Dicho anillo anual o serie de anillos de crecimiento está compuesto por señales y ruidos. La señal es aquella información derivada de los anillos de los árboles que es relevante para el estudio de un problema particular (Speer, 2009). Por su parte, el ruido es aquella información también presente en los anillos de crecimiento pero que resulta irrelevante para el problema que se está estudiando (Cook & Briffa, 1990). Visto de esta manera, una serie de anillos de crecimiento es un conjunto de señales que se convierten en señal o en ruido dependiendo del contexto en que se realice su aplicación.

El Modelo Lineal de Agregación del Crecimiento de los Árboles, desarrollado por Cook (1985), se utiliza para conceptualizar esta respuesta, y para comprender de mejor forma las diferentes variables que pueden afectar el desarrollo del árbol [1].

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t \quad [1]$$

Donde:

- R_t = Ancho del anillo de crecimiento en un año determinado (t)
- A_t = Tendencia de crecimiento, relacionada con la edad en el ancho del anillo.
- C_t = Señal climática relacionada.
- $D1_t$ = Ocurrencia de factores de disturbio dentro del rodal (disturbios endógenos).
- $D2_t$ = Ocurrencia de factores de disturbio fuera del rodal (disturbios exógenos).
- E_t = Variabilidad no explicada, no relacionada con las otras señales.

Los deltas (δ) asociados con $D1_t$ y $D2_t$ son indicadores binarios de la presencia ($\delta = 1$) o ausencia ($\delta = 0$) de disturbios en un año determinado t en las series de crecimiento. Este modelo lineal demuestra que el ancho del anillo, para cada año, depende de una serie de variables que contribuyen al crecimiento. Así, podemos asumir que A_t , C_t y E_t siempre estarán presentes en R_t , mientras que $D1_t$ y $D2_t$ pueden no estar, dependiendo si hubo la ocurrencia de algún disturbio en el año t .

Finalmente, algo que se debe de tener en consideración es la influencia del crecimiento debido a la edad. Cuando se examina una sección transversal del árbol, a menudo el ancho del anillo va disminuyendo de tamaño conforme el ejemplar va envejeciendo (lo anterior puede ser modelado con una curva exponencial negativa). Esta influencia del crecimiento debido a la edad puede ser eliminada de una cronología mediante la estandarización de los datos, el cual es el paso más importante para la generación de índices dendrocronológicos (Cook, 1987; Speer, 2010).

2.1.3.6 *Concepto de Estandarización*

El potencial de crecimiento de un árbol, y su capacidad de ir respondiendo al clima, va cambiando lentamente conforme el ejemplar va creciendo y madurando. Estos cambios afectan el carácter de los anillos de crecimiento, principalmente de los árboles más jóvenes. Duff y Nolan (1953) demostraron que los anillos son más anchos cerca de la base y porciones centrales del tallo, y que dicha anchura disminuye al aumentar la edad del cambium y al disminuir las cantidades de crecimiento apical. Estos cambios producen una tendencia descendente en el ancho del anillo que se deben a factores intrínsecos, como el envejecimiento y los cambios en la geometría del tronco (Fritts & Swetnam, 1989). Para poder estudiar los cambios en el entorno de los árboles, y así realizar los análisis estadísticos necesarios, las series de tiempo deben primero transformarse.

La estandarización elimina el crecimiento atribuido a la edad, haciendo posible la generación de series de tiempo dendrocronológicas que captan de mejor manera la señal deseada (Douglass, 1919). Este procedimiento transforma los anchos de los anillos de crecimiento en una serie de índices que tienen una media definida de 1 y una varianza constante (Cook, 1987). La técnica más empleada de estandarización es la curva exponencial negativa, ya que es común en el crecimiento de muchos árboles y tiene un orden

geométrico al agregar el mismo volumen de madera en la superficie del tronco cada vez mayor (Speer, 2009). Sin embargo, existen diversos modelos de crecimiento que pueden ajustarse a una serie con fines dendrocronológicos, entre ellos las funciones de incremento (Warren, 1980), modelos polinomiales con filtros especiales (Cook & Kairiukstis, 1990), transformaciones de potencia Box-Cox (Liutsko, 2008), entre otros.

2.1.3.7 *Concepto de Calibración y Verificación*

El proceso de calibración consiste en comparar un registro de alguna variable ambiental conocida con la cronología de los anillos de crecimiento, con el objetivo de determinar la repuesta de crecimiento de los árboles a esa variable (Stahle *et al.*, 1998a). Usualmente se utilizan datos meteorológicos (por ejemplo, la temperatura máxima o mínima, la precipitación o el Índice de Severidad de Sequía de Palmer) como conjunto de datos de calibración para la reconstrucción climática. Una vez que se desarrolla el modelo (normalmente con un análisis de regresión lineal), proporciona una mejor comprensión de cómo responden los árboles a la variable climática de interés (Duvick & Blasing, 1981).

La verificación se obtiene utilizando datos del análisis de calibración. Los coeficientes de la ecuación de calibración se aplican a un conjunto de datos predictores para un período de tiempo diferentes a los utilizados en el proceso de calibración. Los datos utilizados en el proceso de calibración original se le conocen como conjunto de datos dependientes, mientras que los utilizados para la verificación son el conjunto de datos independientes. La verificación se realiza cuando las estimaciones derivadas del conjunto de predictores independientes se asemejan al conjunto predictivos independientes. Dicha operación puede repetirse varias veces, según los datos disponibles. Si la relación se mantiene repetidamente cuando se prueba con conjuntos independientes, la calibración se acepta como apropiada para la relación particular (Fritts, 1976).

El proceso de calibración y verificación es de suma importancia para determinar cuán precisas pueden ser las reconstrucciones. Si este procedimiento cumple con los requisitos estadísticos del estudio, entonces se puede completar una reconstrucción climática significativa para la duración de la cronología, repitiendo la calibración en toda la superposición de datos climáticos y de anillos de crecimiento, y sustituyendo el valor del índice de ancho de anillo en la ecuación de la regresión lineal.

2.1.4 **PROBLEMAS DE FECHADO**

2.1.4.1 *Anillos Perdidos o Ausentes*

Los árboles continúan con su crecimiento a lo largo del año, desarrollándose las distintas partes que lo conforman en épocas diferentes. Durante los años de buenas condiciones medioambientales, las hormonas

de crecimiento de los árboles (como la auxina, la citoquinina y la giberelina) se producen en abundancia y se transportan por el tallo, iniciando de esta manera el crecimiento a lo largo del cambium (Speer, 2009). Sin embargo, en los años en donde las condiciones medioambientales no son favorables la producción de hormona de crecimiento disminuye, provocando que, en algunas partes del tallo (especialmente cerca de la base del árbol), no inicie el crecimiento (Figura 5A).

Los problemas surgen cuando se encuentran anillos de crecimiento en años muy secos. Como se ha mencionado en otros apartados, un anillo se forma por cada estación de crecimiento (un año). No obstante, en años en donde el crecimiento es extremadamente pequeño, el anillo puede que no se forme en la parte del tronco del árbol y únicamente ocurra dicho desarrollo en las partes cercanas a las ramas (Stokes & Smiley, 1996). Debido a que esas partes del árbol son regularmente evitadas, es posible obtener núcleos en donde no se vean varios anillos.

Estos anillos perdidos se pueden detectar con relativa facilidad durante el proceso del fechado cruzado (Figura 5B). Al utilizar esta técnica se podrá apreciar cómo los patrones de los anillos de crecimiento coincidirán hasta el año en donde hace falta un anillo en una de las muestras. Para estos casos, se efectúa una corrección insertando un anillo en el lugar adecuado de la secuencia. Si no se realiza lo anterior, se tendrá un desfase y las cronologías no coincidirán (Fritts, 1976).

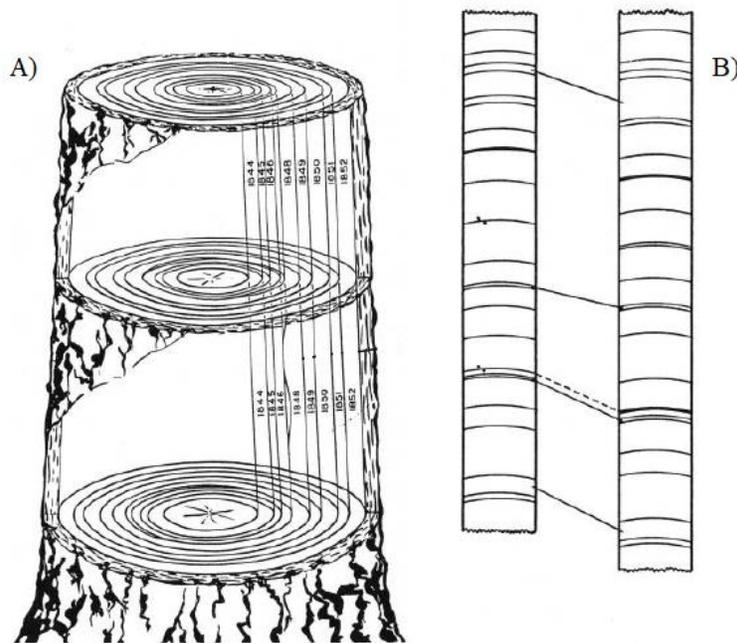


Figura 5. A) Diagrama que ilustra la superficie de secciones en tres niveles diferentes. Los anillos están conectados por una línea vertical. El anillo que representa el año 1847 se encuentra ausente en la sección inferior del árbol. B) Comparación de patrones de crecimiento entre dos diferentes muestras. Se puede apreciar como en la parte superior existe un anillo perdido (tomado de Stokes & Smiley, 1996).

2.1.4.2 Anillos Falsos o Dobles

Otra complicación que surge durante el conteo y prefchado de los anillos de crecimiento es la presencia ocasional de anillos falsos (o anillos dobles como también se le conoce) en las muestras que se están datando. Éstos generalmente se presentan debido a la ocurrencia de condiciones ambientales extremas como sequías o temperaturas frías (Schweingruber, 1988; Wimmer *et al.*, 2000) durante la temporada de crecimiento, causando la formación de bandas difusas de células más pequeñas de paredes gruesas (las cuales dan la apariencia de ser madera tardía). No obstante, cuando las condiciones ambientales vuelven a la normalidad, el desarrollo del árbol continúa, quedándose dichas bandas difusas en la mitad del anillo de crecimiento (Figura 6) (Norton & Ogden, 1990).

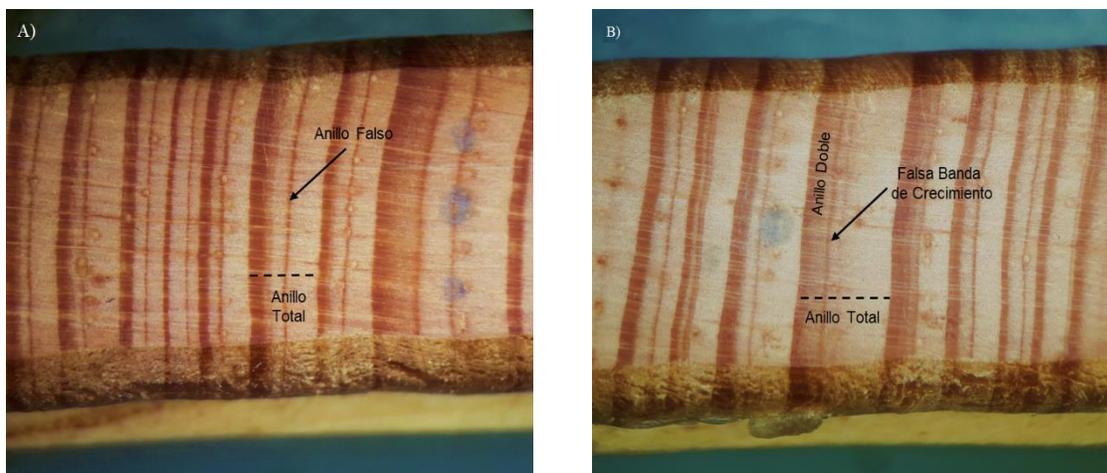


Figura 6. Anomalías en anillos de crecimiento de *P. arizonica*. Los árboles pueden llegar a producir toda una serie de anillos anormales que deben de identificarse para una datación cruzada exitosa. Los anillos falsos (A) o dobles (B) se forman cuando el crecimiento del árbol comienza a detenerse debido a una escasez de los recursos ambientales durante la época de crecimiento. Sin embargo, cuando los recursos ambientales vuelven a la normalidad, el desarrollo del árbol continúa, quedando dichas bandas a la mitad del anillo total (Fotografías de Ricardo Miranda Briones).

Existen distintas formas de detectar un anillo falso. Con regularidad, la madera tardía que se forma en un anillo falso no está claramente delineada puesto que se mezcla gradualmente con la madera temprana de color claro. Esta transición gradual en el borde exterior de un anillo falso, en contraste con el cambio abrupto de madera tardía a madera temprana en los anillos normales (Schweingruber, 2007), es la principal característica distintiva de los anillos falsos.

Otra de las maneras de detectar un anillo falso es cuando se tienen muestras en donde la madera tardía presenta conductos de resina. En estos casos se observa cómo la madera tardía falsa termina en un conducto mientras que la madera tardía verdadera la rodea, incorporando dicho conducto en el anillo anual. Cabe mencionar que este método de detección de un anillo falso únicamente es aplicable a ciertas especies de árboles (Stokes & Smiley, 1996).

Sin embargo, cuando estos métodos de identificación fracasan, los anillos falsos pueden ser identificados cuando a las muestras del mismo sitio se les aplica la técnica del fechado cruzado (Speer, 2009). Es importante señalar que el no detectar los anillos falsos puede provocar sobreestimaciones importantes en la edad del árbol, haciendo que no coincidan las cronologías.

2.2 DENDROCLIMATOLOGÍA

2.2.1 FUNDAMENTOS Y APLICACIONES EN LA SUSTENTABILIDAD

La dendroclimatología, como subcampo de la dendrocronología, trata de estimar el clima que existió en cierta región más allá de los primeros registros meteorológicos modernos. Dicha variación natural del sistema climático (como la temperatura, la precipitación, las sequías, entre otras) puede ser reconstruida a partir de una evaluación a detalle de los anillos de los árboles (Morgan *et al.*, 1994). De esta manera, las reconstrucciones climáticas proporcionan información importante sobre el clima en el pasado, permite conocer la frecuencia de eventos extremos y ayuda a comprender el cómo podría ser el clima en el futuro.

La dendroclimatología tiene múltiples aplicaciones en diferentes áreas. Con la reducción de la brecha entre la oferta y la demanda de agua en muchas cuencas hidrográficas alrededor del mundo, debido al incremento constante de la población, ha aumentado el interés en varios sectores económicos como la agricultura y la industria, y en grupos políticos como los ayuntamientos, por conocer las fluctuaciones climáticas (Meko & Woodhouse, 2011). Lo anterior permite el desarrollo de planes de gestión, así como darle un uso sustentable al recurso hídrico. Un ejemplo de esto se puede ver en el área metropolitana de Denver, quienes desarrollaron un plan de gestión de agua utilizando la información climática generada por Potts (1962).

Por otra parte, Stockton & Jacoby (1976) reconstruyeron el flujo del río Colorado en los últimos 450 años utilizando series de tiempo provenientes de análisis de anillos de los árboles. Esto permitió corregir un error que existía en la asignación de agua entre algunos territorios de los Estados Unidos y México, los cuales se vieron en la necesidad de aprovechar de una manera más sustentable el recurso hídrico.

A escala global, el cambio climático está atrayendo un interés sustancial en el área de la investigación, así como también en grupos políticos y medios de comunicación. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) periódicamente actualiza sus datos y sus informes recientes consideran las reconstrucciones dendroclimáticas, en particular, aquellas que permiten conocer la evolución de la temperatura en el hemisferio norte (Sheppard, 2010). Combinando la información generada por los anillos de los árboles con otros registros proxy (como sedimentos marinos o núcleos de hielo), además del uso de documentación histórica, ha permitido llegar a la conclusión que durante el siglo

XX y los años que lleva el siglo XXI, las condiciones cálidas han estado por encima de lo normal (IPCC, 2007).

2.2.2 RECONSTRUCCIONES DENDROCLIMÁTICAS EN MÉXICO

Las primeras cronologías de anillos de árboles en México se produjeron en la década de 1940 con el dendrocronólogo Edmund Schulman (1944) quien desarrolló una cronología exitosa de 300 años de *P. menziesii* cerca de la población de El Salto, Durango. Posteriormente, Stuart D. Scott (1966) generó una cronología de 468 años al medir y utilizar más de 400 muestras de madera y carbón recolectadas en las ruinas arqueológicas de Casas Grandes, Chihuahua, quedando datadas entre los años 850 a 1336. En la década de 1970, como parte del “Proyecto Mexicano de Anillos de Árboles” dirigido por M. A. Stokes y T. H. Naylor de la Universidad de Arizona, se generaron múltiples cronologías de árboles para la región de la Sierra Madre Occidental.

Suzan & Franco (1981) descubrieron que *Pinus hartwegii* Lindl. localizado en los bosques del Eje Volcánico Transversal, en el centro de México, podía ser fechado, desarrollando de esta forma una cronología de 200 años (1780-1980). Más adelante, Suzan & González (1984) investigaron la respuesta climática de *Pinus nelsonii* Shaw. en Tamaulipas, desarrollando cronologías cortas. Por otra parte, Huante *et al.*, (1991) demostraron el buen potencial dendrocronológico de *Abies religiosa*, construyendo la primera cronología de anillos de esta especie datada (1922-1986) en el estado de Michoacán. Sin embargo, fue Villanueva-Díaz & McPherson (1996) quienes desarrollaron las primeras reconstrucciones dendroclimáticas de precipitación para el área fronteriza de Sonora y Nuevo México.

A partir de la última década, se han realizado varias cronologías de anillos de árboles y reconstrucciones climáticas en México (Figura 7). En virtud de que *P. menziesii* es la especie que tiene el potencial dendroclimático más alto detectado en el país, y que es una conífera que llega a vivir varios siglos (Villanueva Díaz *et al.*, 2008), múltiples cronologías se han realizado tanto en la Sierra Madre Occidental como en la Sierra Madre Oriental, lo cual ha permitido observar la variabilidad climática en esas regiones en los últimos siglos (González-Elizondo *et al.*, 2005; Constante-García *et al.*, 2009; Villanueva-Díaz *et al.*, 2009; Cerano-Paredes *et al.*, 2011a). Asimismo, se ha podido conocer la influencia que tiene patrones climáticos, como ENSO en la variabilidad del clima sobre el territorio nacional, incluso pudiéndose relacionar con eventos extremos como sequías (Stahle *et al.*, 1998; Arreola-Ortíz & Nívar-Cháidez, 2010).

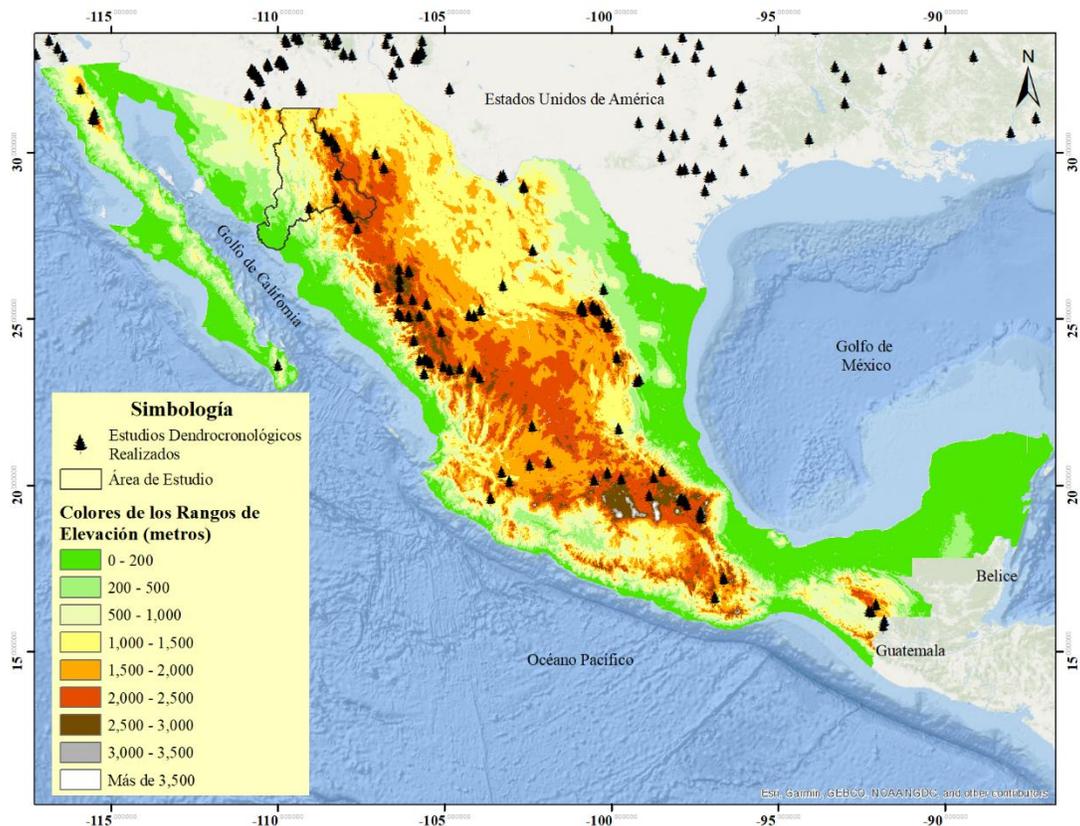


Figura 7. Localización de las reconstrucciones climáticas realizadas en México. El área delimitada corresponde a la cuenca hidrológica del Río Yaqui (Elaboración propia a partir de información obtenida del International Tree-Ring Data Bank).

Otra de las especies con la que se han realizado reconstrucciones climáticas es *Taxodium mucronatum* Ten. el cual es considerado el árbol nacional de México. Stahle *et al.* (2011) desarrollaron una cronología 1238 años el cual les permitió identificar las sequías más severas que se han registrado en el centro del país. Villanueva-Díaz *et al.* (2010) lograron realizar una cronología de 500 años para la parte baja de la cuenca del Río Nazas, en donde detectaron tanto los años de sequías como eventos húmedos con precipitación muy por encima a la media. Cortés-Barrera *et al.* (2010) crearon una cronología regional de precipitación que abarca desde 1700 hasta el 2007 para la parte centro y sur del estado de Guanajuato.

Distintas especies han demostrado tener buen potencial dendroclimático. Díaz *et al.* (2001) desarrollaron la primera cronología de anillos de árboles de *Pinus cembroides* Zucc. para la parte sur de la península de Baja California, la cual utilizaron para reconstruir la variabilidad histórica de la precipitación. Chávez-Gándara *et al.* (2017) emplearon muestras de anillos de árboles de rodales de *Pinus durangensis* Martinez., *Pinus cooperi* Blanco. y *Pinus lumholtzii* Rob. et Fern., para generar cronologías y así poder reconstruir y analizar la variabilidad hidroclimática histórica para la región de San Dimas, Durango, desarrollando una serie regional de 294 años. A pesar de los trabajos que se han realizado, existen muchas regiones del país por explorar en donde sería de gran importancia desarrollar reconstrucciones de variables climáticas, las cuales

permitan analizar tendencias y recurrencia de eventos extremos que preparen tanto a los tomadores de decisiones como a la población en general.

2.3 DENDROECOLOGÍA

2.3.1 FUNDAMENTOS Y APLICACIONES EN LA SUSTENTABILIDAD

El término dendroecología se refiere a todos aquellos estudios dendrocronológicos que abordan, específicamente, problemas ecológicos presentes y pasados en entornos locales (Fritts, 1971). Debido a que los árboles son una característica funcional de suma importancia en muchos ecosistemas, se pueden usar como un registro natural de los procesos ecológicos que suceden en el lugar. Estos procesos naturales pueden ser el desplazamiento del límite de crecimiento de los árboles, procesos sucesivos a través del nacimiento y muerte de los árboles, brotes de insectos (dendroentomología), ocurrencia de incendios (dendropirocronología), fructificación sincrónica en árboles (dendromastecología) o movimiento de especies de árboles invasoras (Speer, 2009).

Los estudios dendroecológicos tienen mucha utilidad ya que abarcan una amplia variedad de temas de investigación los cuales proporcionan información muy importante a las personas encargadas de la gestión de recursos forestales, vida silvestre y pesca. La combinación del estudio de los anillos de los árboles y la ecología puede ayudar a que se comprenda, de mejor manera, la dinámica que existe de los procesos naturales (como las perturbaciones y las interacciones existentes entre distintos fenómenos naturales) (Fritts & Swetnam, 1989). Por consiguiente, en los últimos años se han multiplicado el número de estudios dendroecológicos en diferentes partes del mundo.

En África, es escaso el conocimiento que se tiene sobre el crecimiento, dinámica de la población y rango de variabilidad climática natural de las especies arbóreas. Sin embargo, en los últimos años se han realizado estudios en este continente utilizando los anillos de los árboles los cuales han permitido reconstruir las tendencias climáticas y la influencia que tienen los patrones de circulación atmosféricos (Gebrekirstos *et al.*, 2014). Se ha logrado conocer por medio de los anillos de crecimiento que la estación seca crítica es cada vez más larga en Tanzania, posiblemente debido a una retroalimentación positiva relacionada a la deforestación (Williamson *et al.*, 2014). Esta información obtenida de los anillos de los árboles es de vital importancia para tener un manejo sustentable de los bosques naturales y para apoyar las decisiones en los esfuerzos de reforestación.

Recientemente en México se han empezado a realizar reconstrucciones de los regímenes históricos de incendios empleando las cicatrices que registran los anillos de los árboles (Cerano-Paredes *et al.*, 2010,

2016, 2019). Estos estudios llevados a cabo en diversas regiones del país han señalado que los eventos de incendios suelen ocurrir en años de sequía y en la estación de primavera, cuando existe una mayor acumulación de materia orgánica. Asimismo, se ha encontrado una modificación de la frecuencia natural de los incendios a partir de la década de 1950 debido a cambios de uso de suelo, lo cual repercute de manera negativa a la salud de los ecosistemas, aumentando el riesgo de ocurrencia de un incendio severo. Con esta información disponible, es posible desarrollar estrategias para ejecutar acciones de manejo del fuego, de forma que se puedan obtener beneficios ecológicos, garantizar la permanencia y la sustentabilidad de los bosques y reducir el riesgo de incendios severos.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de conservación El Santuario de la Cotorra Serrana ($29^{\circ} 19' 25''$ N, $108^{\circ} 12' 49''$ W) y el sitio La Norteña ($29^{\circ} 39' 08''$ N, $108^{\circ} 28' 20''$ W), este último correspondiente al Área de Conservación de Flora y Fauna “Campo Verde”, se localizan en el municipio de Madera, Chihuahua, en un gradiente de elevación de 2,500 a 3,000 msnm (Figura 8). Ambos sitios se ubican en la cuenca del Río Yaqui, que a su vez pertenece a la Región Hidrológica 9 Sonora Sur, con una superficie de 72,859.05 km² y un perímetro de 2,333.03 km, dentro de la Sierra Madre Occidental (INEGI, 2019). Asimismo, los dos sitios pertenecen a Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) de México. El Santuario de la Cotorra Serrana forma parte del RTP-34 conocida como Babícora, mientras que La Norteña pertenece al RTP-44 Bavispe-El Tigre (CONABIO, 2019).

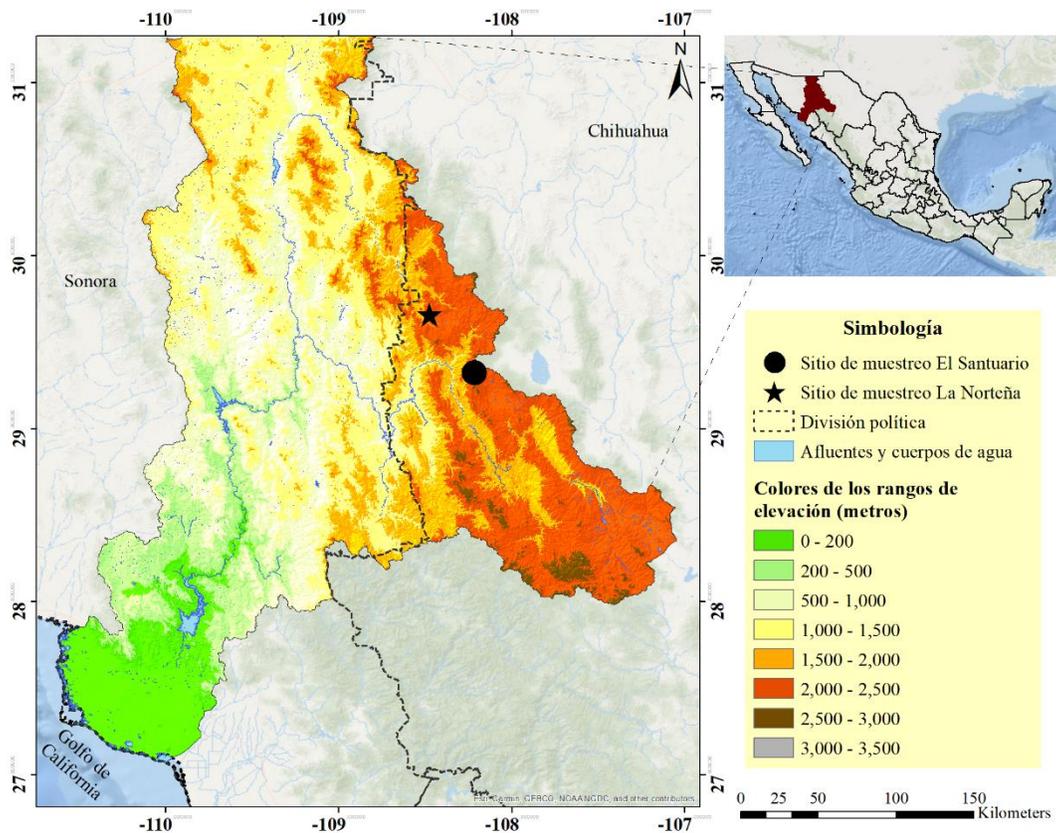


Figura 8. Localización geográfica de los sitios de estudio en la cuenca del Río Yaqui, en la parte oeste del estado de Chihuahua.

El clima predominante en el área de estudio de acuerdo a la clasificación de Köppen modificado a las condiciones de México por García (1998), es semifrío-subhúmedo, con verano fresco largo (Cb'(w2)x'). La precipitación media anual oscila entre los 650 y los 700 mm, llegando a representar la lluvia de invierno el 20% (130 mm) anual, mientras que la precipitación de verano constituye el 70% (450 mm) del total anual. La temperatura media anual es de 11°C, registrándose temperaturas máximas mensuales de 28°C en los meses de junio y julio, y temperaturas mínimas mensuales de -9°C en los meses de diciembre y enero (SMN, 2019). El tipo de vegetación dominante corresponde a un bosque de clima templado-frío de coníferas y encinos, mientras que el suelo existente es del tipo Feozem (CONABIO, 2019). Ambos sitios tienen una enorme importancia ecológica debido al papel que juegan en la recarga de agua subterránea y escorrentía para la Cuenca del Río Yaqui.

3.2 SELECCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

El primer aspecto a tomarse en cuenta para el desarrollo de esta investigación fue la selección del sitio. Ya se ha mencionado que en sitios en donde la disponibilidad de humedad limita el crecimiento de los árboles, los anillos de los árboles se pueden usar para reconstruir la precipitación, mientras que en sitios donde la temperatura de la estación de crecimiento limita el desarrollo de los árboles, los anillos de los árboles se pueden usar para reconstruir la temperatura (Fritts, 1974).

Con base en recorridos de campo se seleccionaron dos áreas de trabajo. El primer sitio, localizado al sur y conocido como El Santuario de la Cotorra Serrana, es un bosque mixto con presencia de ejemplares de *P. menziesii*, *P. arizonica* y *P. strobiformis*. En lo que respecta al segundo sitio, conocido como La Norteña, el cual se ubica en la parte norte, domina únicamente la especie de *P. arizonica*.

En ambos sitios, se identificaron los individuos con las características adecuadas para el desarrollo de estudios dendroclimáticos tales como: árboles lo más longevos posibles (caracterizados por un fuste o ramas en forma espiral, corteza delgada, copa reducida con ramas gruesas colgantes) y que hayan sufrido el menor disturbio posible (incendios, terremotos, animales silvestres o la acción del ser humano), de forma que maximice la señal de la variable climática buscada (Figura 9). El sistema de muestreo empleado para la toma de muestras fue selectivo. Para esto, se seleccionaron en cada uno de los dos sitios estudiados especímenes con características fenotípicas determinadas para cumplir con los objetivos planteados en el trabajo de investigación.



Figura 9. Ejemplar de un *P. arizonica* longevo localizado en el área de estudio. Su corteza delgada y copa reducida con ramas gruesas colgantes son características inconfundibles de árboles longevos. (Fotografía de Julián Cerano Paredes).

3.3 RELACIÓN CLIMA - CRECIMIENTO

3.3.1 MÉTODOS DE CAMPO

Los núcleos de crecimiento se obtuvieron empleando un taladro de Pressler de 5 y 12 mm de diámetro y longitudes variables (Hägloff) (Figura 10). Se seleccionó una parte sana y sólida del tronco, generalmente a la altura del pecho (1.30 m) y se extrajeron dos y tres muestras por individuo. Para un mejor control del muestreo e interpretación de los resultados en el laboratorio, a cada una de las muestras se le escribió la clave del sitio, número de muestra, fecha de la toma de la misma, ubicación geográfica, diámetro normal, daños físicos, orientación del individuo y otras observaciones adicionales.

Se obtuvieron un total de 39 núcleos de crecimiento pertenecientes a 18 árboles de *P. menziesii* en el sitio El Santuario. En lo que se refiere al sitio La Norteña, se muestrearon 60 árboles de *P. arizonica* extrayendo un total de 132 núcleos de crecimiento.



Figura 10. Extracción de un núcleo de crecimiento (también conocido como viruta) de un *P. menziesii*. (Fotografía de Julián Cerano Paredes).

3.3.2 MÉTODOS DE LABORATORIO

En el laboratorio, las muestras se colocaron al aire libre para su secado y se montaron en molduras de madera para darles mayor firmeza y evitar cualquier daño durante el proceso de fechado. Una vez montadas correctamente, en el laboratorio de Dendrocronología del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria – Relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el municipio de Gómez Palacio, Durango, México, las muestras se pulieron con lijas de diferentes granos (120 a 1,200 granos cm^2) permitiendo la identificación adecuada de los límites de los anillos. Con el apoyo de un microscopio estereoscópico de resolución 10 a 30X, los anillos fueron contados y fechados con técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes & Smiley, 1996). El ancho del anillo se midió utilizando un sistema de medición Velmex de fase deslizante y con precisión de 0.001 mm (Robinson & Evans, 1980).

La datación y la exactitud de la medición se verificó estadísticamente con el programa COFECHA, que correlaciona períodos de 50 años con traslape entre ellos de 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Las tendencias biológicas (competencia, supresión, liberación) y geométricas (incremento en el área de fuste con la edad) no relacionadas con el clima se eliminaron con el programa ARSTAN (Cook, 1987), el cual realiza la estandarización de la serie individual de cada muestra insertando una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y dividiendo cada valor anual por el valor obtenido de la curva, generando índices normalizados (cronologías) con media 1.0 y varianza homogénea (Fritts, 1991).

Los datos meteorológicos de las temperaturas máximas, mínimas y medias mensuales se obtuvieron de diez estaciones de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) cercanas al área de estudio (Cuadro 1). Para la precipitación mensual, se emplearon los datos de los cuadrantes “51934” y “53212”, que incluyen parte de

las estaciones climáticas ubicadas al oeste del estado de Chihuahua y al este del estado de Sonora (Terán-Cuevas *et al.*, 2010). Debido a que muchas de estas estaciones meteorológicas tienen datos faltantes en algunos meses o años, éstos se estimaron promediando los registros recopilados de otras estaciones cercanas. De esa manera, se generó una serie regional anual y mensual de temperaturas y precipitaciones para el período 1957-2015 (59 años) la cual se utilizó para analizar la influencia entre estas variables climáticas y el crecimiento anual de *P. menziesii* y *P. arizonica*.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas localizadas cerca del área de estudio.

Estaciones climáticas	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m.s.n.m.)	Periodo
Madera Campo Uno - 8015	29° 09' 07"	108° 22' 17"	1980	1969-1983
Madera Campo Dos - 8016	29° 38' 49"	108° 11' 33"	2264	1972-1983
Colonia García – 8034	29° 35' 17"	108° 19' 52"	2180	1970-1986
El Poleo - 8055	29° 24' 00"	108° 28' 00"	1392	1965-1986
Madera - 8097	29° 11' 24"	108° 08' 29"	2100	1957-2006
Mesa del Huracán - 8103	29° 38' 00"	108° 14' 00"	2165	1958-1990
Madera Campo Cinco - 8117	29° 18' 00"	108° 18' 00"	1900	1971-1980
San Juan de Arriba - 8125	29° 48' 01"	108° 18' 15"	2280	1961-1986
Vivero Madera - 8160	29° 10' 00"	108° 08' 00"	2095	1969-1983
Peñitas - 8219	29° 15' 07"	108° 05' 34"	2135	1973-2015
Cuadrante 51934	29° 19' 22"	108° 13' 01"	---	1957-2015
Cuadrante 53212	29° 39' 08"	108° 28' 22"	---	1957-2015

Para evaluar la relación entre los datos climáticos y los datos estandarizados de ancho de anillo de *P. menziesii* y *P. arizonica*, se realizaron tanto análisis de correlación de Pearson (r) como de función de respuesta (R) durante el periodo común 1957-2015 utilizando el paquete Treeclim (Zang & Biondi, 2014) del software estadístico R versión 3.6.1 (R Development Core Team, 2019). Este paquete evaluó los intervalos de confianza y la significancia estadística ($P < 0.05$) de los coeficientes de correlación y de función respuesta basados en coeficientes de regresión parcial de 1000 estimaciones bootstrap. Además, se realizó un análisis de correlación móvil utilizando una ventana de 40 años, con un año de compensación y con una ventana de 18 meses de registros meteorológicos, comenzando desde el mes de julio del año anterior hasta diciembre del año actual.

3.4 RECONSTRUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

3.4.1 MÉTODOS DE CAMPO

Las muestras de árboles vivos se obtuvieron empleando un taladro de Pressler de 5 y 12 mm de diámetro y longitudes variables (Hägloff). Se seleccionó una parte sana y sólida del tronco, generalmente a la altura del pecho (1.30 m) y se extrajeron dos y tres muestras por individuo (Figura 11). Una vez extraídas las virutas, se almacenaron en popotes de plástico para evitar un posible daño durante su traslado. Para un mejor control del muestreo e interpretación de los resultados en el laboratorio, a cada una de las muestras se le escribió la clave del sitio, número de muestra, fecha de la toma de la misma, ubicación geográfica, diámetro normal, daños físicos, orientación del individuo y otras observaciones adicionales.

En total se muestrearon 40 árboles en el sitio El Santuario, 18 de *P. menziesii*, 15 de *P. arizonica* y 7 de *P. strobiformis*, extrayéndose 91 muestras en total. Para el sitio La Norteña, se muestrearon 60 árboles de *P. arizonica* y se extrajeron 132 muestras en total.



Figura 11. Para extraer la muestra, el taladro Pressler se ubica en lo que se cree puede ser la médula del árbol. Para iniciar la extracción de la viruta, la punta de la barrena del taladro se presiona firmemente contra la corteza, colocada en ángulo recto (90°), perpendicular al tronco, y el mango se gira en el sentido de las manecillas del reloj. Una vez que la punta de la barrena se fija firmemente en la madera, sólo se necesita presión para seguir girando el mango. (Fotografías de Julián Cerano).

3.4.2 MÉTODOS DE LABORATORIO

Los núcleos extraídos de los árboles son pequeños y frágiles, por lo que se montaron en molduras de madera para darles una mayor resistencia y prevenir que sufran cualquier daño durante el proceso de fechado. Los núcleos que aún se encontraban húmedos, debido a la resina de los árboles, se dejaron al aire libre durante

unos días para su secado, evitando de esa forma que se encojan y se separen de la moldura. Una vez montadas correctamente, en el laboratorio de Dendrocronología del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria – Relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en el municipio de Gómez Palacio, Durango, México, las muestras se pulieron con lijas de diferentes granos (120 a 1,200 granos cm^2) con el objetivo de resaltar sus estructuras de crecimiento anual. Con el apoyo de un estereomicroscopio de resolución 10 a 30X, se contó cada uno de los anillos de crecimiento y, con base en técnicas dendrocronológicas, se prefegó cada uno de los crecimientos (Stokes & Smiley, 1996).

Para las muestras prefegadas, se midió cada uno de los crecimientos anuales (anillo total, madera temprana y tardía) empleando un sistema de medición VELMEX de fase deslizante y con precisión de 0.001 mm (Robinson & Evans, 1980) (Figura 12). El fechado cruzado y exactitud de la medición se verificó con el programa COFECHA, el cual correlaciona períodos de 50 años con traslape entre ellos de 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Sólo las series que presentaron valores de intercorrelación > 0.328 ($P < 0.01$) fueron incluidas en la construcción de la cronología final (Holmes, 1983). Las cronologías o índices de crecimiento se generaron con el programa ARSTAN (Cook, 1987). Esto creó tres cronologías (estándar, residual y arstan) con media de 1.0 y varianza homogénea, en el cual se maximiza la señal climática (Fritts, 1991). Para este trabajo empleamos la versión estándar y residual de la cronología porque proporcionan la mejor asociación con la precipitación.



Figura 12. El sistema de medición VELMEX es un instrumento estándar para medir el ancho de los anillos de crecimiento. Este equipo consta de una platina de fase deslizante, la cual está conectada a una computadora que tiene instalado el programa Measure J2X versión 4.2. Con la ayuda de un microscopio, que tiene una retícula graduada en forma de cruz en uno de los oculares, se marca el inicio del anillo de crecimiento, así como el límite de la madera temprana y la madera tardía. Este procedimiento se repite en cada uno de los anillos. Finalmente, el programa genera tres bases de datos, los cuales tendrán los valores de medición de anillo total, madera temprana y madera tardía (Fotografía de Ricardo Miranda Briones).

Un análisis de correlación de Pearson, mostró que ambos sitios registran una misma variabilidad y se desarrolló una cronología regional. Se corrió un análisis de correlación entre los índices de crecimiento y los datos climáticos de precipitación. Para esto, se emplearon datos de los cuadrantes de precipitación regional “51934” y “53212” (Cuadro 2), que incluyen parte de las estaciones climáticas ubicadas al oeste del estado de Chihuahua y al este del estado de Sonora (Terán-Cuevas *et al.*, 2010). Asimismo, por su cercanía al área de estudio y extensión de registros climáticos, se obtuvo información de las estaciones climatológicas Madera y Mesa del Huracán (Cuadro 2), localizadas en el municipio de Madera, Chihuahua (SMN, 2019). Dado que los datos climáticos tanto de los cuadrantes como de las estaciones mostraron una correlación significativa ($P < 0.05$) con los índices de anillo de la cronología regional, se trabajó con datos promedio regionales de precipitación.

Cuadro 2. Estaciones climáticas utilizadas para el análisis dendrocronológico.

Estaciones climáticas	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m.s.n.m)	Periodo
Madera 8097	29° 11' 24"	108° 08' 29"	2,102	1957-2007
Mesa del Huracán 8103	29° 38' 00"	108° 14' 01"	2,107	1957-1990
Cuadrante 51934	29° 19' 22"	108° 13' 01"	---	1950-2015
Cuadrante 53212	29° 39' 08"	108° 28' 22"	---	1950-2015

La relación entre la precipitación mensual y los índices de ancho de anillo total, madera temprana y tardía, se evaluó mediante análisis de correlación. Se consideraron 18 meses de datos (6 meses antes y 12 meses durante la temporada de crecimiento). La lógica de este procedimiento está respaldada por el hecho de que las condiciones climáticas dominantes presentes antes de dar inicio de la temporada de crecimiento influyen en el desarrollo de los anillos de crecimiento anual (Cleaveland *et al.*, 2003).

Se desarrolló una ecuación de transferencia entre los datos observados de precipitación regional y el índice de anillo total regional, utilizando para ello el programa R versión 3.6.1 (R Development Core Team, 2019). Con este modelo se reconstruyó la precipitación para el lapso que cubren los registros observados y, con la subrutina VERYFY5 del paquete de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés), se aplicó una prueba de calibración a la mitad de los datos climáticos, tanto observados como reconstruidos (1998-2015, $n = 18$), para examinar la relación entre ambas variables; en una etapa posterior, a la mitad restante (1980-1997, $n = 17$) se le asignó una prueba de verificación (Fritts,

1991). En virtud de que ambos subperiodos, tanto la calibración como la verificación del modelo, mostraron una asociación significativa, el modelo de regresión obtenido para el periodo 1980-2015 se consideró estadísticamente válido. De esta manera, la ecuación generada se aplicó para desarrollar la reconstrucción de la precipitación en el periodo total de la serie dendrocronológica regional. A la reconstrucción de precipitación de resolución anual o serie de alta frecuencia, se le ajustó una curva o Spline de 10 años, para resaltar los eventos secos y lluviosos presentes en la reconstrucción (Cook & Peters, 1981).

Se aplicó un análisis espectral a las series de precipitación reconstruida y por medio del gráfico de densidad espectral versus frecuencia, se identificaron recurrencias de anomalías dominantes en la serie paleoclimática. Para los eventos de sequía más severos, se realizó un análisis de correlación espacial entre la precipitación reconstruida y el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI por sus siglas en inglés) utilizando los datos del Atlas de Sequías para México (MXDA) (Stahle *et al.*, 2016). Los periodos de sequía detectados en la reconstrucción y en el análisis de correlación espacial se validaron con documentos históricos y un análisis espectral a la serie de precipitación reconstruida. Finalmente, con el objetivo de analizar el impacto de ENSO en la variabilidad hidroclimática de esta región del estado de Chihuahua, se relacionaron los índices de ancho de anillo y los índices de El Niño 3.4 SST (Rayner *et al.*, 2003) mediante el programa MATLAB versión 8.5 (The MathWorks Inc., 2015). Para tal efecto, se utilizaron gráficos de resolución anual de espectros de ondeleta y gráficos de coherencia de ondeleta.

4 RELACIÓN CLIMA-CRECIMIENTO EN EL ANCHO DE ANILLO DE *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus arizonica* PARA EL OESTE DE CHIHUAHUA

4.1 RESULTADOS

4.1.1 ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS TEMPERATURAS Y LA PRECIPITACIÓN

Los datos de la temperatura para el periodo 1957-2015 no mostraron una tendencia clara de aumento o disminución a largo plazo (Figura 13A). Sin embargo, se observa cómo las temperaturas han fluctuado durante ese lapso de tiempo, dando como resultados periodos templados (1965-1985, 2007-2015) y cálidos (1993-2000). Por otro lado, la precipitación media anual durante el periodo observado fue de 695 mm, siendo 1978, 1981, 1983, 1984 y 1986 los años más húmedos y 1996, 1999, 2001, 2002 y 2003 los más secos (Figura 13B). Aun cuando la precipitación ha variado a lo largo de los años, se aprecia una disminución significativa de la misma desde mediados de la década de 1990.

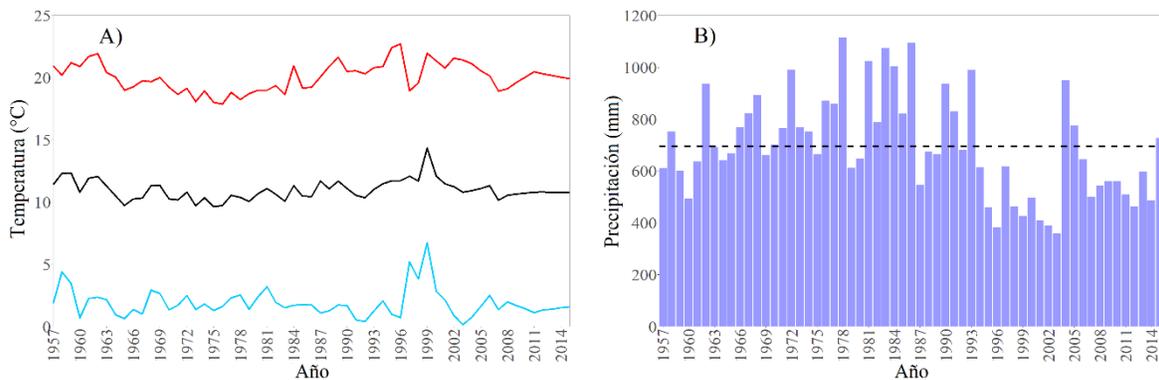


Figura 13. Datos climáticos para el periodo 1957-2015, A) temperatura anual promedio máxima (rojo), media (negra) y mínima (azul), B) precipitación anual, la línea horizontal punteada indica la precipitación anual promedio durante el periodo observado.

4.1.2 CRONOLOGÍAS DE ANCHO ANILLO DE LOS ÁRBOLES

De las muestras obtenidas en el sitio El Santuario, 34 núcleos de crecimiento de 16 árboles de *P. menziesii* fueron fechados al año exacto de su formación. En cuanto a *P. arizonica* ubicados en el sitio La Norteña, fue posible fechar 91 núcleos de crecimiento correspondientes a 43 ejemplares. Las muestras que no se

podieron datar fueron porque presentaban daños en su estructura o periodos de supresión que dificultaron un fechado confiable.

Las series de ancho de anillo de *P. menziesii* y *P. arizonica* mostraron una correlación estadísticamente significativa de 0.600 ($P < 0.01$) y 0.605 ($P < 0.01$) (Cuadro 3) respectivamente. Esto permitió generar dos cronologías que indican una gran variabilidad climática interanual y multianual (Figura 14). La cronología del ancho de anillo de *P. menziesii* presentó una longitud de 156 años (1863-2018), una edad media de los árboles de 100 años y una señal expresada de la población (EPS, por sus siglas en inglés) de 0,92 con más de 10 muestras desde el año 1874 (Figura 14A). Por otro lado, la cronología de ancho de anillo de *P. arizonica* presentó una longitud de 359 años (1660-2018) con una edad media de los árboles de 179 años y un EPS de 0,78 con más de 10 núcleos desde 1737 (Figura 14B). Es importante señalar que, para el desarrollo de estas dos cronologías, se utilizó la versión estándar debido a que se obtuvieron correlaciones más altas que con la versión residual.

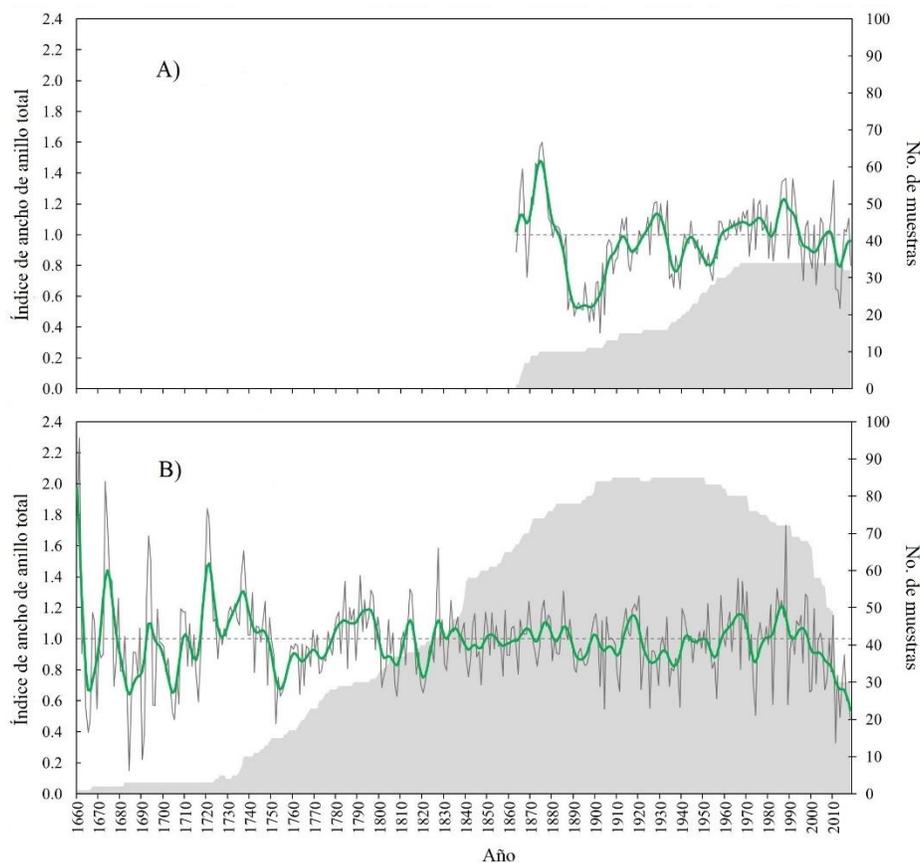


Figura 14. Cronología estándar de A) *P. menziesii* en el sitio El Santuario y B) *P. arizonica* en el sitio La Norteña. La línea de color negro de fondo representa la variabilidad anual, la línea horizontal punteada la media, la línea resaltada en color verde es un Spline de 10 años, que permite observar eventos de baja frecuencia y el área en color gris indica el tamaño de muestra para cada una de las especies.

Cuadro 3. Parámetros estadísticos de las cronologías.

Especies	Número de árboles datados	Número de núcleos de crecimiento datados	Periodo	Correlación de anillo total	Sensibilidad
<i>P. menziesii</i>	16	34	1863-2018	0.600 ($P < 0.01$)	0.233
<i>P. arizonica</i>	43	91	1660-2018	0.605 ($P < 0.01$)	0.313

4.1.3 RELACIÓN CLIMA-CRECIMIENTO

En el sitio El Santuario, el análisis de correlación (período 1957-2015) mostró asociaciones positivas significativas ($P < 0.05$) entre la serie de *P. menziesii* y la precipitación desde octubre del año anterior hasta mayo del año actual ($r > 0.30$; Figura 15A), mientras que la temperatura máxima mensual promedio presentó correlaciones negativas significativas ($P < 0.05$) de agosto a noviembre del año previo y desde enero hasta junio del año actual ($r < -0.24$; Figura 15B). Con respecto a la temperatura media mensual promedio, se encontraron asociaciones negativas significativas ($P < 0.05$) en los meses de enero, marzo, abril y junio del año en curso ($r < -0.28$; Figura 15C). En contraste, la temperatura mínima mensual promedio únicamente presentó una correlación positiva significativa ($P < 0.05$) en agosto del presente año ($r = 0.25$; Figura 15D).

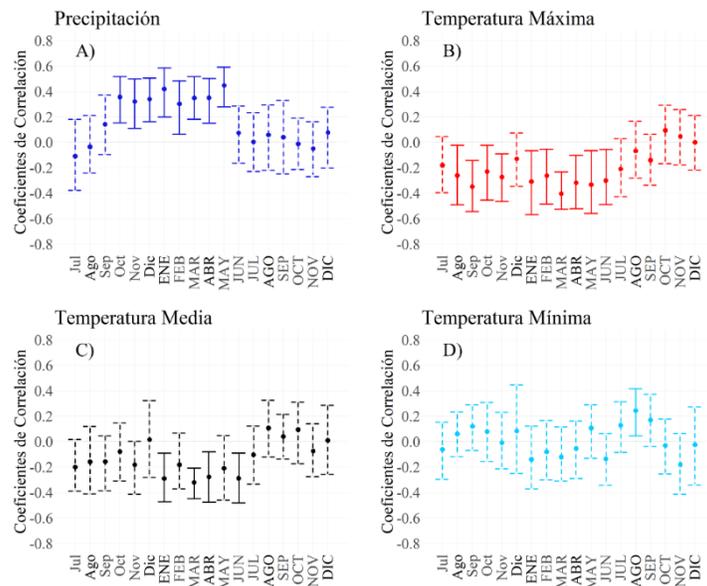


Figura 15. Análisis de correlación entre la cronología de ancho de anillo de *P. menziesii* y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio. Las líneas sólidas indican meses con correlaciones significativas ($P < 0.05$). Los meses correspondientes al año anterior están escritas en letras minúsculas mientras que los meses del año actual están en letras mayúsculas.

El análisis de función de respuesta indicó que el crecimiento de los anillos de *P. menziesii* respondieron positivamente ($P < 0.05$) a la precipitación desde marzo hasta mayo del año actual ($r > 0.15$; Figura 16A) y a la temperatura máxima mensual promedio de octubre del año en curso ($r = 0.21$; Figura 16B). Por el contrario, los anillos de crecimiento de esta especie respondieron negativamente ($P < 0.05$) a la temperatura media mensual promedio de marzo del año actual ($r = -0.18$; Figura 16C) mientras que para la temperatura mínima mensual promedio no hubo una respuesta significativa ($P > 0.05$; Figura 16D).

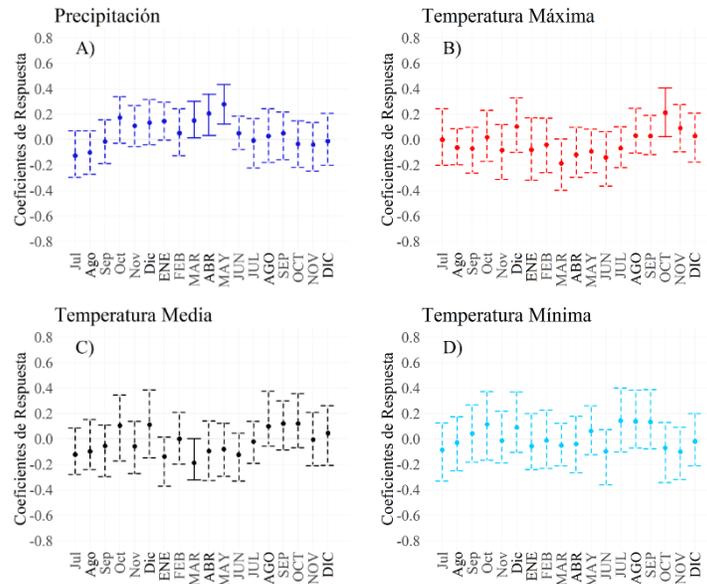


Figura 16. Análisis de función de respuesta bootstrap entre la cronología de ancho de anillo de *P. menziesii* y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio. Las líneas sólidas indican meses con correlaciones significativas ($P < 0.05$). Los meses correspondientes al año anterior están escritas en letras minúsculas mientras que los meses del año actual están en letras mayúsculas.

Con relación al sitio La Norteña, las estimaciones de correlación (período 1957-2015) encontraron asociaciones positivas significativas ($P < 0.05$) entre el crecimiento de *P. arizonica* y la precipitación desde noviembre del año anterior hasta enero del año en curso y desde marzo hasta mayo del año actual ($r > 0.20$; Figura 17A), y una correlación negativa ($P < 0.05$) en julio del año anterior ($r = -0.26$). En contraste, la temperatura máxima mensual promedio presentó correlaciones negativas significativas ($P < 0.05$) en noviembre del año anterior y en marzo y abril del año actual ($r < -0.29$; Figura 17B) y asociaciones positivas ($P < 0.05$) en julio del año anterior y en agosto del año en curso ($r > 0.20$). Con respecto a la temperatura media mensual promedio, los coeficientes de correlación revelaron que el crecimiento de *P. arizonica* fue influenciado negativamente ($P < 0.05$) en noviembre del año anterior y en marzo y abril del año actual ($r < -0.24$; Figura 17C), pero positivamente influenciado ($P < 0.05$) en agosto y septiembre del año en curso (r

> 0.30) mientras que la temperatura mínima mensual promedio influyó positivamente ($P < 0.05$) en su crecimiento en los meses de mayo, agosto y septiembre del año actual ($r > 0.25$; Figura 17D).

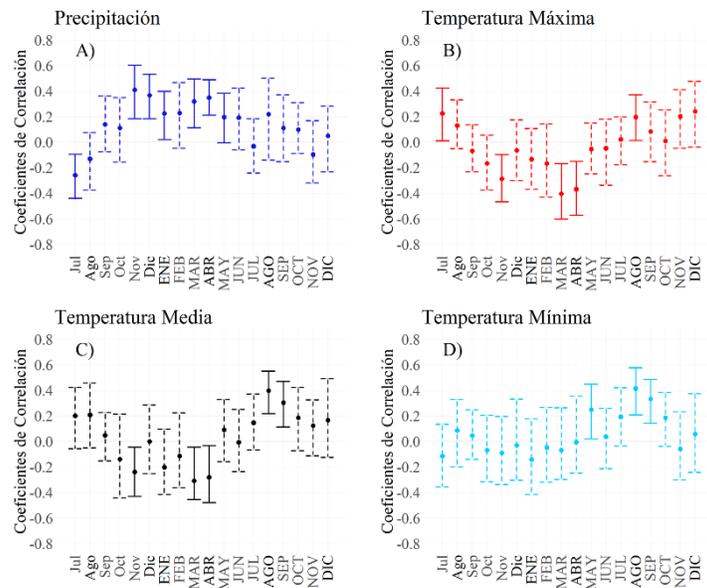


Figura 17. Análisis de correlación entre la cronología de ancho de anillo de *P. arizonica* y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio. Las líneas sólidas indican meses con correlaciones significativas ($P < 0.05$). Los meses correspondientes al año anterior están escritas en letras minúsculas mientras que los meses del año actual están en letras mayúsculas.

El análisis de función de respuesta mostró que el crecimiento de los anillos de *P. arizonica* respondieron negativamente ($P < 0.05$) a la precipitación de julio del año anterior ($r = -0.27$; Figura 18A) pero fue positivamente influenciado ($P < 0.05$) en noviembre y diciembre del año anterior ($r > 0.20$; Figura 18A). Con respecto a la temperatura máxima mensual promedio, se encontraron respuestas negativas ($P < 0.05$) en marzo y abril del año en curso ($r < -0.22$; Figura 18B). Por el contrario, los anillos de crecimiento de *P. arizonica* no presentaron respuestas significativas ($P > 0.05$) ni a la temperatura media mensual promedio (Figura 18C) ni tampoco a la temperatura mínima mensual promedio (Figura 18D).

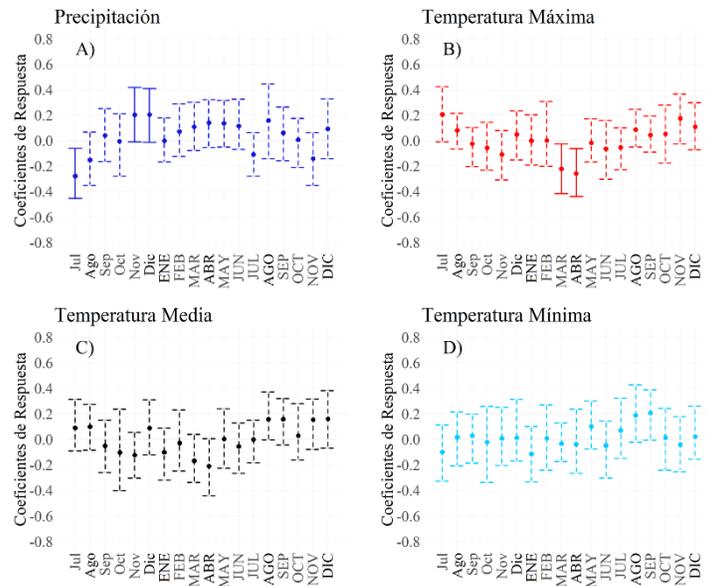


Figura 18. Análisis de función de respuesta bootstrap entre la cronología de ancho de anillo de *P. arizonica* y A) precipitación B) temperatura máxima mensual promedio, C) temperatura media mensual promedio, D) temperatura mínima mensual promedio. Las líneas sólidas indican meses con correlaciones significativas ($P < 0.05$). Los meses correspondientes al año anterior están escritas en letras minúsculas mientras que los meses del año actual están en letras mayúsculas.

4.1.4 ESTABILIDAD TEMPORAL DE LA RESPUESTA DE CRECIMIENTO DE LOS ÁRBOLES AL CLIMA

Las funciones de correlación móvil mostraron una estabilidad temporal sin cambios estacionales importantes en la respuesta de crecimiento de *P. menziesii*. Se encontraron asociaciones positivas significativas ($P < 0.05$) entre la serie de ancho de anillo y la precipitación desde septiembre del año anterior hasta enero del año actual y desde marzo a mayo del año en curso ($r > 0.25$; Figura 19A, Cuadro 4). Con respecto a la temperatura máxima mensual promedio, correlaciones negativas significativas ($P < 0.05$) se identificaron particularmente en los meses de agosto, septiembre, noviembre y diciembre del año anterior y desde enero hasta junio del año actual ($r < -0.26$; Figura 19B, Cuadro 4). Además, la temperatura media mensual promedio también presentó correlaciones negativas significativas ($P < 0.05$) en enero y de marzo a junio del año en curso ($r < -0.25$; Figura 19C, Cuadro 4). En contraste, se pudo apreciar que la temperatura mínima mensual promedio únicamente influyó positivamente ($P < 0.05$) en el índice de ancho de anillo durante el mes de agosto del año actual ($r > 0.26$; Figura 19D, Cuadro 4).

Con respecto a *P. arizonica*, las estimaciones de correlación móvil indicaron una estabilidad temporal con la precipitación, no siendo así con las variables de temperatura en donde fue más inestable. El crecimiento de anillos de los árboles respondió positivamente ($P < 0.05$) a la precipitación de los meses de noviembre y diciembre del año anterior y abril del año en curso ($r > 0.31$; Figura 19E, Cuadro 4). En contraste, la

temperatura máxima mensual promedio tuvo una influencia negativa significativa ($P < 0.05$) principalmente durante los meses de noviembre del año anterior y en marzo y abril del año actual ($r < -0.27$; Figura 19F, Cuadro 4). Sin embargo, se encontraron correlaciones positivas significativas ($P < 0.05$) durante julio del año anterior y en noviembre y diciembre del año actual ($r > 0.27$; Figura 19F, Cuadro 4). Con respecto a la temperatura media mensual promedio, observamos tanto asociaciones positivas ($P < 0.05$) en agosto y septiembre del año en curso ($r > 0.27$; Figura 19G, Cuadro 4) como correlaciones negativas ($P < 0.05$) durante los meses de noviembre del año anterior y abril del año actual ($r < -0.24$; Figura 19G, Cuadro 4). Por el contrario, la temperatura mínima mensual promedio tuvo una influencia positiva ($P < 0.05$) en el crecimiento de *P. arizonica* durante el mes de agosto del año en curso ($r > 0.26$; Figura 19H, Cuadro 4). Ambas especies aún no han registrado un cambio en la estabilidad temporal. Sin embargo, en cuanto a la precipitación, en los últimos años *P. arizonica* ha comenzado a responder de manera similar a *P. menziesii*, al tener correlaciones positivas significativas en los meses de enero, marzo y mayo del año en curso. En cuanto a las temperaturas máximas y medias, ambas variables impactan negativamente en el crecimiento tanto de *P. menziesii* como de *P. arizonica*, aunque la respuesta es más intensa en la primera.

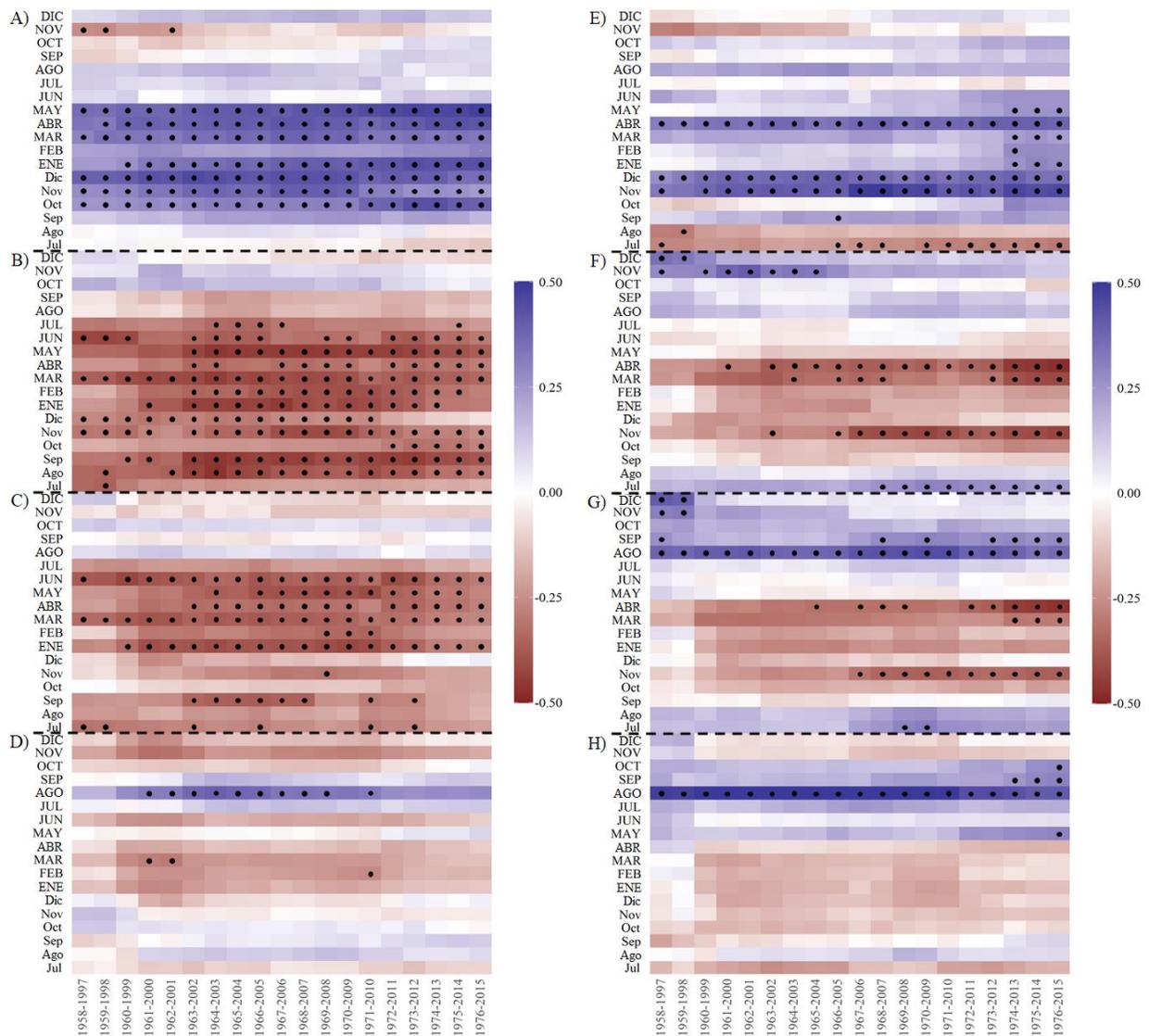


Figura 19. Funciones de correlación móvil relacionando el crecimiento de anillo de *P. menziesii* (izquierda) y *P. arizonica* (derecha) y la precipitación (A y E), temperatura máxima promedio (B y F), temperatura media promedio (C y G), temperatura mínima promedio (D y H), respectivamente, desde el mes de julio del año anterior hasta diciembre del año actual (18 meses). La correlación móvil fue realizada con una ventana de 40 años. Correlaciones significativas ($P < 0.05$) están señaladas por puntos negros. Los meses correspondientes al año anterior están escritas en letras minúsculas mientras que los meses del año actual están en letras mayúsculas.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación más importantes entre los datos climáticos y las cronologías de ancho de anillo de *P. menziesii* y *P. arizonica*.

	Subperiodos (años)	Coeficientes de Correlación ($P < 0.05$)
<i>P. menziesii</i>		
Precipitación (Figura 19A)		
Diciembre (año anterior)	1963-2002, 1969-2008	0.440 – 0.443
Mayo (año actual)	1975-2014, 1976-2015	0.465 – 0.486
Temperatura máxima promedio (Figura 19B)		
Agosto y Septiembre (año anterior)	1964-2003	-0.469 – -0.472
Mayo (año actual)	1964-2003, 1966-2005	-0.453 – -0.467
Temperatura media promedio (Figura 19C)		
Septiembre (año anterior)	1965-2004, 1966-2005	-0.363 – -0.372
Enero y Junio (año actual)	1970-2009, 1972-2011	-0.413 – -0.418
Temperatura mínima promedio (Figura 19D)		
Agosto (año actual)	1964-2003, 1966-2005	0.368 – 0.400
<i>P. arizonica</i>		
Precipitación (Figura 19E)		
Noviembre (año anterior)	1967-2006, 1968-2007	0.470 – 0.500
Abril (año actual)	1974-2013, 1975-2014	0.392 – 0.393
Temperatura máxima promedio (Figura 19F)		
Noviembre (año anterior)	1970-2009, 1976-2015	-0.419 – -0.424
Abril (año actual)	1975-2014, 1976-2015	-0.455 – -0.473
Temperatura media promedio (Figura 19G)		
Abril (año actual)	1975-2014, 1976-2015	-0.450 – -0.468
Agosto (año actual)	1970-2009, 1971-2010	0.442 – 0.452
Temperatura mínima promedio (Figura 19H)		
Agosto (año actual)	1963-2002, 1966-2005	0.590 – 0.595

4.2 DISCUSIÓN

4.2.1 SENSIBILIDAD DE LAS SERIES

Las series de ancho de anillo generadas de *P. menziesii* en el sitio El Santuario y de *P. arizonica* en el sitio La Norteña superaron el parámetro de correlación determinado por el COFECHA (0.3281, $P < 0.01$) (Holmes, 1983), indicando de esta manera que ambas especies poseen una buena sensibilidad a los cambios ambientales y que tienen potencial para la reconstrucción de la variabilidad climática del lugar. Se desarrolló para cada especie una cronología de ancho de anillo las cuales presentaron una similitud común en el patrón de crecimiento a pesar de estar distanciadas 50 km, lo que sugiere que el crecimiento de ancho de anillo

anual de *P. menziesii* y de *P. arizonica* está influenciado por diversas variables climáticas que modulan el clima a nivel regional. Esta variabilidad común entre cronologías de diferentes especies ha sido descrita tanto en otras regiones de México (Cerano-Paredes *et al.*, 2011; Chávez-Gándara *et al.*, 2017) como en el mundo (Sohar *et al.*, 2016; Hannak & Eggertsson, 2020).

4.2.2 RESPUESTA A LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

El análisis de la relación clima-crecimiento indica una correlación positiva con la precipitación invierno-primavera para ambas especies (desde noviembre del año anterior hasta mayo del año actual). Un aspecto importante a destacar es que la precipitación invierno-primavera registrada en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio para el período 1957-2015 únicamente representaron el 20% de la precipitación anual. Sin embargo, los resultados anteriores sugieren que el elemento hidrológico y la precipitación son los factores más importantes en el crecimiento anual de *P. menziesii* y *P. arizonica*. Una explicación de los resultados obtenidos sería que las lluvias invernales suelen ser de baja intensidad, favoreciendo una mayor infiltración y saturación del suelo. Además, la baja evapotranspiración que existe en esos meses ayuda a que el suelo se sature de agua, dejándola disponible para la próxima temporada de crecimiento (Fritts, 1976). Esa accesibilidad al agua conduce a altas tasas de fotosíntesis que determinarán el ancho total del anillo. Por el contrario, la falta de correlaciones y respuestas significativas entre el ancho de anillo total y la lluvia de verano podría deberse a que la precipitación que se registra durante ese período del año excede la capacidad de infiltración del suelo. Esto hace que el agua se escurra como un flujo superficial y no se registre en el crecimiento de los anillos de los árboles (García, 1978).

En cuanto a la temperatura máxima mensual promedio, el análisis de la relación clima-crecimiento identifica una correlación negativa durante los meses invierno-primavera, teniendo una mayor influencia en *P. menziesii* que en *P. arizonica*. La respuesta negativa a esta variable se debe a que temperaturas más cálidas aceleran la evapotranspiración, produciendo estrés ambiental en el árbol debido a una mayor pérdida de agua (Cook & Cole, 1991). Además, al aumentar el déficit de presión de vapor (VPD, por sus siglas en inglés), el árbol reacciona cerrando las estomas para evitar una pérdida excesiva de agua, afectando de esta manera su propio crecimiento (Leverenz, 1981).

Se han reportado resultados similares en varios estudios en lugares cercanos (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015; Chávez-Gándara *et al.*, 2017) y en otras partes de México (Cerano-Paredes *et al.*, 2013; Astudillo-Sánchez *et al.*, 2016; Carlón-Allende *et al.*, 2021). Cleaveland *et al.* (2003) encontraron que la madera temprana de *P. menziesii* ubicada en el estado vecino de Durango respondía a las precipitaciones de noviembre-marzo, lo que permitió desarrollar una cronología de más de 600 años. Villanueva-Díaz *et al.* (2015) también reportaron correlaciones positivas significativas para *P. menziesii*

durante la reconstrucción de la lluvia estacional enero-julio en el Área Natural Protegida Mesa de las Guacamayas, situada a unos 120 km al noroeste de nuestra área de estudio. Chávez-Gándara *et al.* (2017) encontraron que *P. durangensis*, *P. cooperi* y *P. lumholtzii* situados al noroeste de Durango respondían positivamente a las lluvias invierno-primavera y negativamente a las temperaturas máximas de marzo y abril del año en curso. Por su parte, Cerano-Paredes *et al.* (2013) estudiaron la respuesta dendroclimática de *Pinus douglasiana* (Mtz.) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, encontrando que la especie respondía a la precipitación invierno-primavera. Astudillo-Sánchez *et al.* (2016) y Carlón-Allende *et al.* (2021) reportaron para *P. hartwegii* ubicado en el Sistema Volcánico Trans-Mexicano correlaciones positivas con la precipitación y asociaciones negativas con la temperatura máxima para el período invierno-primavera.

4.2.3 ESTABILIDAD TEMPORAL

Los resultados del análisis de correlación móvil muestran cómo *P. menziesii* y *P. arizonica* tienen respuestas climáticas similares, aunque la fuerza y la significancia de las correlaciones varían con el tiempo. En cuanto a la precipitación, la respuesta de *P. menziesii* no ha presentado variaciones y ha sido más intensa, mostrando correlaciones significativas de octubre del año anterior a enero del año en curso y de marzo a mayo del año actual durante prácticamente todo el período analizado. *P. arizonica* también responde positivamente a la precipitación, aunque solo presenta correlaciones significativas durante noviembre y diciembre del año anterior y abril del año en curso. Sin embargo, en los últimos años ha comenzado a responder de manera similar a *P. menziesii*, mostrando también correlaciones positivas significativas en los meses de enero, marzo y mayo del año actual, debiéndose quizás a cambios en los patrones de precipitación.

Ambas especies tienen correlaciones negativas significativas con respecto a las temperaturas máxima y media, aunque la respuesta es más intensa en *P. menziesii* que en *P. arizonica*. *P. menziesii* muestra asociaciones negativas significativas de agosto del año anterior a junio del año actual para temperaturas máximas y de enero a junio del año en curso para temperaturas medias durante prácticamente todo el período analizado. Por el contrario, *P. arizonica* únicamente presenta respuestas negativas significativas en noviembre del año anterior y en marzo y abril del año actual tanto para las temperaturas máxima y media, aunque la señal se ha intensificado en los últimos años.

Una explicación de la diferencia en la intensidad de la respuesta a las variables climáticas podría deberse a que *P. menziesii* es una especie altamente sensible, algo que los investigadores han utilizado para el desarrollo de estudios dendrocronológicos (Fritts, 1991; Cleaveland *et al.*, 2003). Adicionalmente, esta mayor sensibilidad de *P. menziesii* con respecto a *P. arizonica* podría tener un mayor impacto en su

desarrollo bajo diferentes escenarios de cambio climático. Es importante señalar lo anterior ya que *P. menziesii* tiene una categoría de protección bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Aun cuando el análisis de correlación móvil no ha reflejado cambios en la respuesta de crecimiento de *P. menziesii* y *P. arizonica*, esto no significa que no pueda suceder en un futuro cercano debido al cambio climático. Una alteración en los patrones de precipitación y un aumento en las temperaturas podrían tener un impacto significativo en el crecimiento de ambas especies. Las proyecciones de los modelos climáticos desarrollados por el IPCC en el Quinto Informe de Evaluación señalan una reducción de las precipitaciones, un aumento de las temperaturas y una mayor ocurrencia de eventos extremos como sequías para la región occidental del estado de Chihuahua (2014). Tales cambios en las variables climáticas eventualmente afectarán de manera negativa la respuesta de crecimiento de *P. menziesii* y *P. arizonica* en el futuro. Menos precipitaciones y temperaturas más altas conducirán a una menor densidad de árboles y a mayores tasas de evapotranspiración, lo que a su vez reducirá el contenido de agua del suelo (Babst *et al.*, 2019). Además, un aumento en el VPD provocará una disminución en el crecimiento y en la fortaleza del árbol debido a una reducción en la fotosíntesis (Novick *et al.*, 2016). En consecuencia, los árboles no saludables serán más susceptibles a brotes de insectos y enfermedades, provocando una mayor mortalidad y un impacto importante para la población debido a la pérdida de servicios ambientales significativos (IPCC, 2014). Cervantes *et al.* (2019) registraron brotes de escarabajos descortezadores (*Dendroctonus spp.*) en México, Guatemala y Honduras, encontrando que estos eventos han ocurrido en años con precipitaciones por debajo del promedio y que su ocurrencia ha aumentado desde 1970. Con lo anterior, se espera que el crecimiento de *P. menziesii* y *P. arizonica* se verá afectado en los próximos años.

5 PRECIPITACIÓN INVIERNO-PRIMAVERA (1660-2018) PARA EL OESTE DE CHIHUAHUA INFERIDA CON ANILLOS DE ÁRBOLES

5.1 RESULTADOS

5.1.1 FECHADO DE MUESTRAS

De un total de 223 núcleos de crecimiento, 91 correspondientes a El Santuario y 132 a La Norteña, se lograron fechar al año exacto de su formación 159 (71%) muestras, 68 (75%) y 91 (69%), respectivamente. Las muestras que no se lograron datar, fue por presentar daños en su estructura o periodos de supresión que dificultaron un fechado confiable. Los resultados obtenidos del COFECHA indicaron una correlación entre series estadísticamente significativa (Cuadro 5). Se generaron dos cronologías, El Santuario, de 156 años (1863-2018) y La Norteña, de 359 años (1660-2018) (Figura 20). Se determinó una correlación significativa ($r = 0.580$, $P < 0.01$) entre las dos cronologías (Cuadro 5) y se desarrolló una cronología regional (Figura 20).

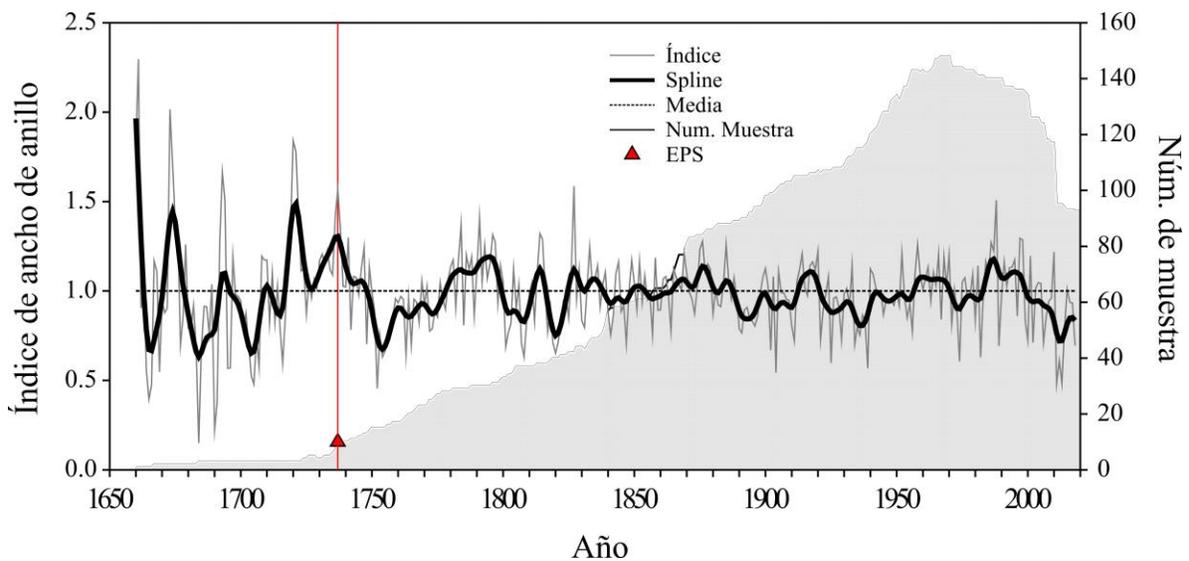


Figura 20. Cronología compuesta de anillo total de *P. menziesii*, *P. arizonica* y *P. strobiformis* para El Santuario y La Norteña. La serie de tiempo muestra la variabilidad climática en los últimos 359 años para la región oeste del estado de Chihuahua. La línea de color gris de fondo representa la variabilidad anual, la línea horizontal punteada la media, la línea resaltada en color negro es un Spline de 10 años, que permite observar eventos de baja frecuencia y el área en color gris indica el tamaño de muestra para cada segmento de la cronología regional. La línea en color rojo representa un valor de EPS > 0.85.

Cuadro 5. Parámetros estadísticos de las cronologías.

Sitio	Correlación de anillo total	Longitud de la cronología	Sensibilidad
El Santuario	0.610 ($P < 0.01$)	1863-2018 (156 años)	0.265
La Norteña	0.605 ($P < 0.01$)	1660-2018 (359 años)	0.313
Regional	0.580 ($P < 0.01$)	1660-2018 (359 años)	0.300

La cronología del ancho de anillo indica una EPS > 0.85 con más de 10 núcleos a partir del año 1739 (Figura 20). Si la cronología se apoya con menos de 10 núcleos, las variaciones de crecimiento de árboles individuales pueden ocultar o modificar la señal de crecimiento común que representa la respuesta al clima. Nuestra cronología regional registra un tamaño de muestra estadísticamente robusto para el período 1739-2018 (Figura 20).

5.1.2 FUNCIÓN DE RESPUESTA

El análisis de función de respuesta determinó que las mayores correlaciones entre la precipitación y las cronologías, se obtienen utilizando la versión estándar (Figura 21). Con respecto a la precipitación mensual, el análisis muestra que, el período que comprende desde octubre del año previo a junio del año actual, presentan una relación positiva con la cronología regional de anillo total, madera temprana y tardía para ambas cronologías, estándar y residual (Figura 21A y 21C). Los meses de octubre y noviembre del año previo y febrero del año actual, muestran una correlación significativa ($P < 0.05$) con la cronología estándar y residual de anillo total, madera temprana y tardía, siendo el mes de febrero para la cronología estándar el de mayor correlación ($r = 0.49$, $P < 0.01$; $r = 0.47$, $P < 0.01$, respectivamente) (Figura 21A).

Para el caso de la precipitación acumulada, se determinaron correlaciones significativas ($P < 0.01$) para las tres cronologías (anillo total, madera temprana y tardía) a lo largo de todo el año, tanto para la para la cronología estándar como para la residual (Figura 21B y 21D). No obstante, el periodo estacional de lluvia acumulada octubre–junio de la cronología estándar registró la mayor correlación $r = 0.73$ ($P < 0.01$), $r = 0.71$ ($P < 0.01$) y $r = 0.71$ ($P < 0.01$), para anillo total, madera temprana y madera tardía, respectivamente (Figura 21B). Con base en estos resultados, la cronología regional estándar de anillo total, presenta el mayor potencial para emplearse como proxy de la variabilidad de la precipitación estacional del periodo octubre–junio ($r = 0.73$, $P < 0.01$).

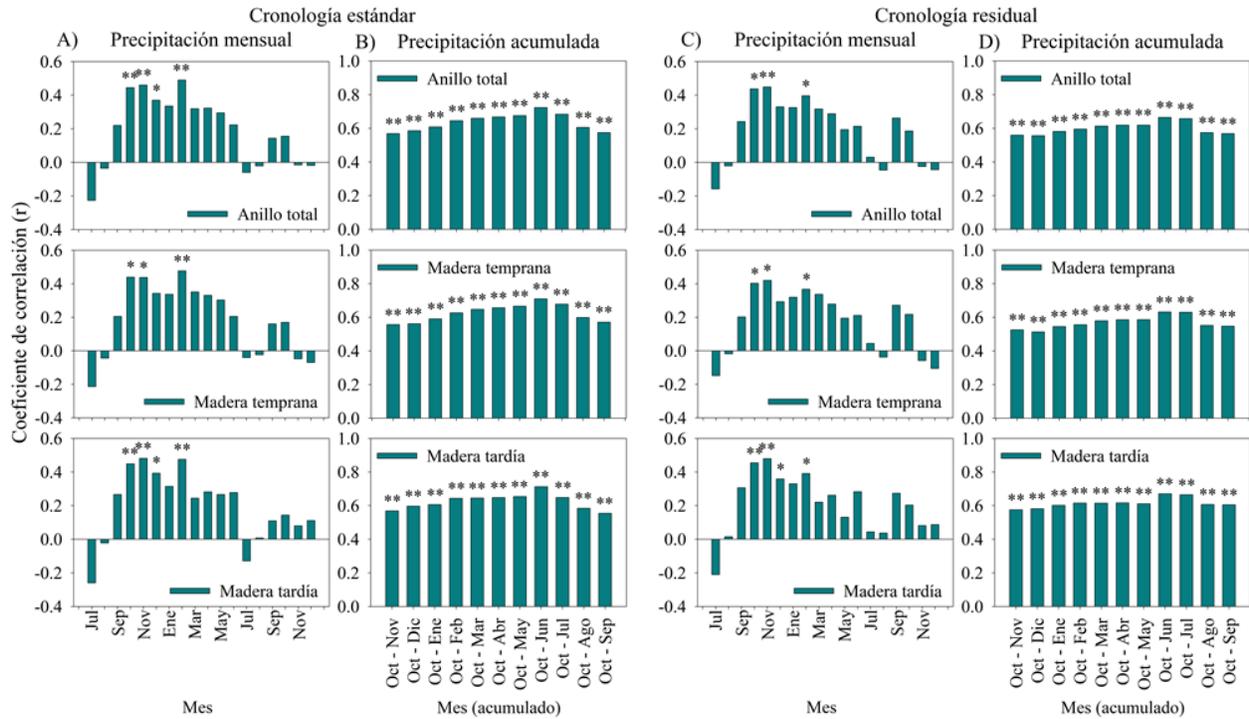


Figura 21. Análisis de función de respuesta entre la precipitación mensual y acumulada con la cronología regional estándar (A y B) y residual (C y D). * = $P < 0.05$ y ** = $P < 0.01$ indican el grado de significancia de la correlación entre ambas variables.

5.1.3 RECONSTRUCCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

La relación entre el periodo de lluvia estacional octubre–junio y el índice de ancho de anillo total muestran una asociación altamente significativa ($r = 0.73$, $P < 0.01$) para el periodo común (1980-2015) (Figura 22A). Se generó un modelo de regresión (Figura 22B) que permitió reconstruir la variabilidad de la precipitación invierno-primavera para el período común de datos observados. El modelo de regresión lineal generado para la reconstrucción fue el siguiente [2]:

$$Y_t = -170.41 + 454.15 * X_t \quad [2]$$

Donde:

- Y_t = Valor de la precipitación (mm) octubre – junio, reconstruido para un año específico t.
- X_t = Índice de ancho de anillo total para un año específico t.

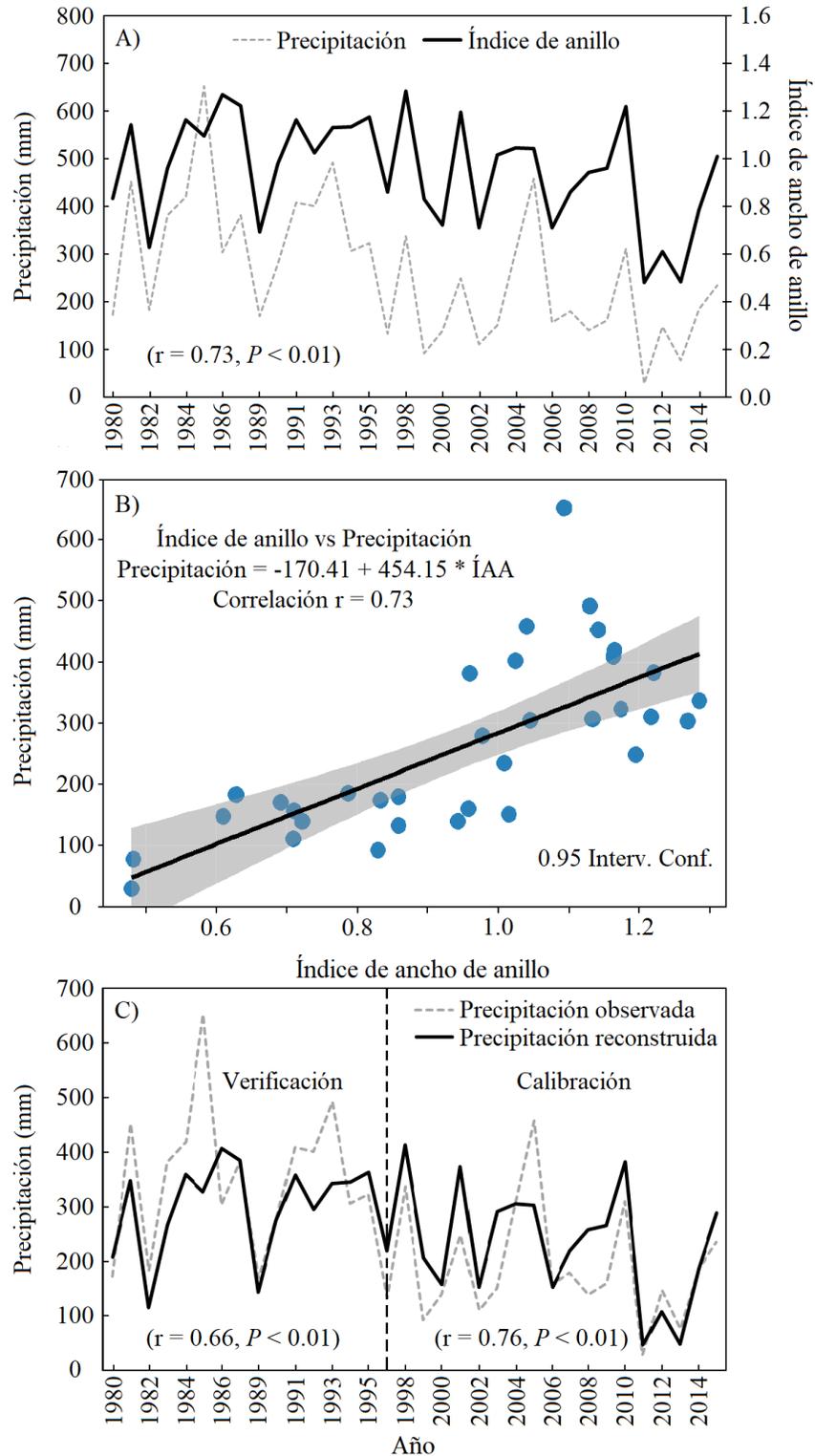


Figura 22. Asociación entre el índice de anillo total y la precipitación regional octubre-junio del periodo 1980-2015 A), modelo de regresión lineal entre ambas variables B) y comparación de la precipitación reconstruida octubre-junio (línea sólida) y la precipitación observada (línea punteada) (1980-2015), verificación y calibración del modelo de regresión C).

5.1.4 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO

Reconstruida la variabilidad de la precipitación para el periodo común de datos observados (1980-2015) (Figura 22C), los resultados del proceso de calibración del modelo indicaron una correlación altamente significativa $r = 0.76$ ($r^2 = 0.58$, $P < 0.01$) entre la precipitación observada y la reconstruida, se explica el 58% de la variabilidad de la precipitación (Cuadro 6 y 7). Por su parte, la verificación muestra una correlación altamente significativa $r = 0.66$ ($r^2 = 0.44$, $P < 0.01$), la cual explica el 44% de la variabilidad de la lluvia (Cuadro 6 y 7). Dado a que ambos subperiodos presentaron correlaciones significativas, el modelo generado con el periodo total de datos climáticos (1980-2015) se consideró estadísticamente válido $r = 0.75$ ($r^2 = 0.56$, $P < 0.01$) y se aplicó a la cronología total para reconstruir la variabilidad de la precipitación de los últimos 359 años (Cuadro 6 y 7).

Cuadro 6. Calibración para la reconstrucción de la precipitación octubre-junio en el oeste de Chihuahua, México a partir de la cronología estándar regional de ancho de anillo.

Período	R^2_{Adj}	Coeficientes		Error estándar		Prueba t		Probabilidad	
		β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1
1980 - 1997	0.44	-136.28	463.61	155.5	148.6	-0.87	3.11	0.39	0.007
1998 - 2015	0.58	-110.69	342.51	65.33	71.48	-1.69	4.79	0.10	0.000
1980 - 2015	0.56	-170.41	454.15	74.93	76.59	-2.27	5.93	0.029	0.000

Cuadro 7. Estadísticas de verificación para la reconstrucción de la precipitación de octubre-junio para el oeste de Chihuahua a partir de una cronología estándar regional de ancho de anillo. El procedimiento de verificación utiliza las estimaciones climáticas derivadas en el período de calibración, por ejemplo, la verificación con los datos observados 1981-1997 utiliza los datos estimado por regresión de 1998-2015.

Período	Correlación de Pearson (r)	Reducción del error ^a	Prueba de signos ^b	Prueba de t^c	Primera diferencia significativa ^d
1980-1997	0.66**	0.69*	2*	4.2*	3*
1998-2015	0.76**	0.82*	4*	4.3*	3*
1980-2015	0.75**	0.55*	6*	4.7*	6*

*= Significativos, $P < 0.05$

**= Significativos, $P < 0.01$

5.1.5 VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN RECONSTRUIDA

Para la región oeste del estado de Chihuahua, se logró reconstruir la variabilidad de la precipitación invierno-primavera de los últimos 359 años, que comprende el periodo de 1660-2018 (Figura 23). La serie indica alta variabilidad interanual y multianual que muestra periodos secos y húmedos, los cuales variaron en extensión e intensidad (Cuadro 8). Para los últimos tres siglos y medio de la serie, se determinaron frecuencias significativas ($P < 0.05$) de eventos extremos cada 50 años (Figura 24), ocurridos a mediados de cada siglo y entre finales e inicio de siglo, aproximadamente. El análisis de correlación espacial entre el PDSI y los cuatro eventos más extremos de sequía (1695-1707, 1751-1768, 1807-1810, 1945-1956) de la precipitación reconstruida (Figura 23), indicó áreas de correlación positiva significativa ($P < 0.05$) (Figura 25), mostrando la magnitud y la extensión geográfica de estos episodios.

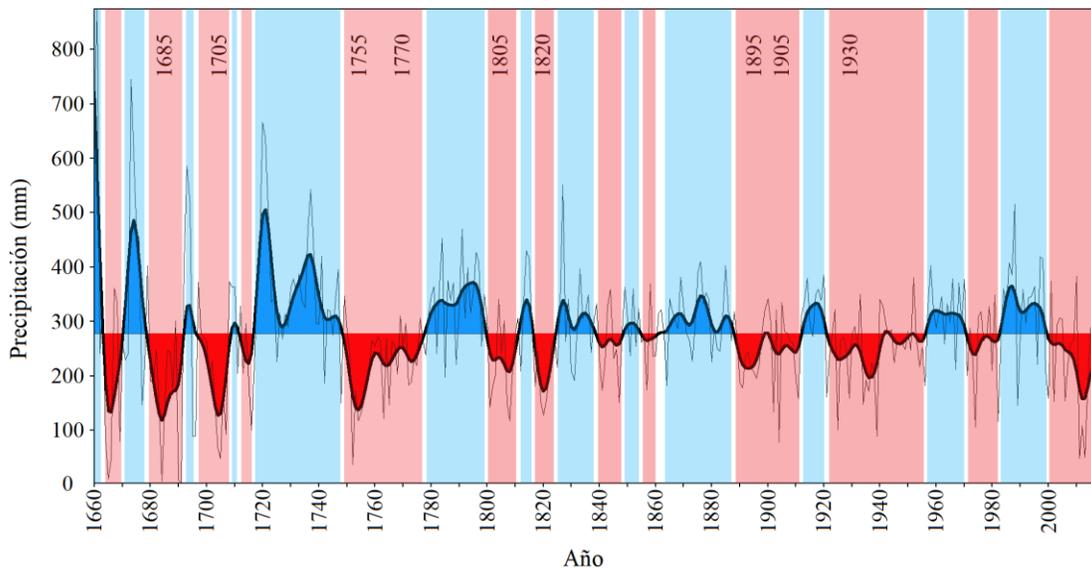


Figura 23. Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera de los últimos 359 años para el oeste de Chihuahua. La línea gris del fondo indica la variabilidad anual, la curva suavizada (Spline de 10 años) resaltada en color negro permite observar eventos de baja frecuencia (en color azul periodos secos y en rojo periodos húmedos). La lluvia promedio es de 277.4 mm.

Cuadro 8. Años reconstruidos con ocurrencia de sequías (precipitación inferior a la media reconstruida de 277.4 mm) y periodos húmedos (precipitación superior a la media reconstruida de 277.4 mm) en el área de estudio.

Duración del evento	Periodos secos (años)
1 año	1662, 1711, 1713, 1725, 1727, 1742, 1745, 1748, 1770, 1782, 1785, 1789, 1798, 1805, 1812, 1828, 1837, 1851, 1853, 1880, 1887, 1902, 1904, 1916, 1932, 1943, 1951, 1963, 1967, 1971, 1980, 1996, 2002
2 años	1677-1678, 1690-1691, 1695-1696, 1777-1778, 1830-1831, 1859-1860, 1863-1864, 1872-1873, 1882-1883, 1973-1974, 1977-1978, 1982-1983, 1989-1990, 1999-2000
3 años	1664-1666, 1715-1717, 1801-1803, 1807-1809, 1840-1842, 1845-1847, 1855-1857, 1921-1923, 2016-2018
4 años	1669-1672, 1772-1775, 1908-1911, 1953-1956, 2006-2009, 2011-2014
5 a 10 años	1680-1688, 1698-1707, 1817-1825, 1889-1897, 1925-1930, 1934-1939, 1945-1949
> 10 años	1751-1768
	Periodos húmedos (años)
1 año	1663, 1679, 1689, 1697, 1712, 1714, 1726, 1769, 1771, 1776, 1804, 1806, 1829, 1852, 1854, 1858, 1881, 1888, 1903, 1924, 1931, 1933, 1944, 1950, 1952, 1972, 1979, 1981, 2001, 2010, 2015
2 años	1660-1661, 1667-1668, 1743-1744, 1746-1747, 1749-1750, 1783-1784, 1799-1800, 1810-1811, 1826-1827, 1838-1839, 1843-1844, 1861-1862, 1975-1976, 1997-1998
3 años	1692-1694, 1708-1710, 1779-1781, 1786-1788, 1848-1850, 1884-1886, 1905-1907, 1940-1942, 1964-1966, 1968-1970, 2003-2005
4 años	1673-1676, 1813-1816, 1898-1901, 1912-1915, 1917-1920
5 a 10 años	1718-1724, 1790-1797, 1832-1836, 1865-1871, 1874-1879, 1957-1962, 1984-1988, 1991-1995
> 10 años	1728-1741

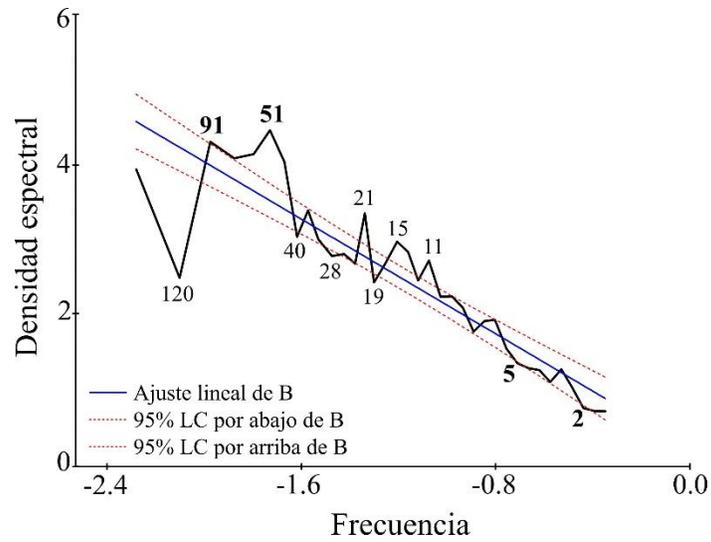


Figura 24. Análisis espectral de la precipitación regional de precipitación reconstruidas para el oeste de Chihuahua.

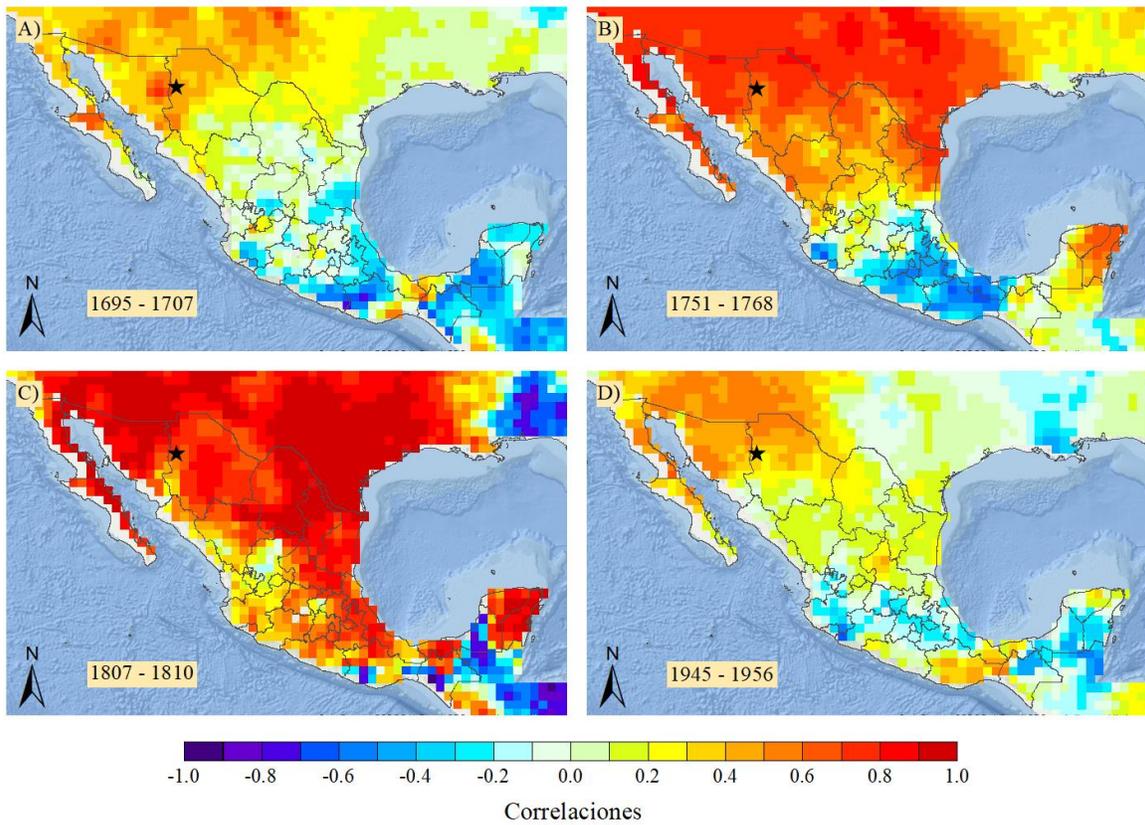


Figura 25. Correlación espacial entre la precipitación reconstruida y el PDSI de los meses junio, julio y agosto (JJA) (Stahle *et al.*, 2016) para cuatro eventos extremos de sequía. La estrella indica el área de estudio.

5.1.6 INFLUENCIA DEL ENSO SOBRE LA VARIABILIDAD DE LA LLUVIA

El espectro de ondeletas para la precipitación reconstruida invierno-primavera (Figura 26A) muestra áreas significativas ($P < 0.05$) que corresponden a periodos de uno (1902-1904, 1988-1989), tres (1995-2002) y seis años (2006-2018). Por su parte, el espectro de ondeletas del fenómeno ENSO (Figura 26B) indica su ciclo irregular de uno a siete años para los intervalos 1912-1920, 1942-1958, 1968-1973, 1978-2006 y 2008-2015. Un análisis espectral de coherencia de ondeletas determinó áreas significativas ($P < 0.05$) de relación en fase entre la precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4 para el periodo de 1900 a 2018 en frecuencias de 1 a 7 años (Figura 26C). Se determinaron periodos significativos ($P < 0.05$) en fase para los intervalos de tiempo 1900-1910, 1932-1940, 1934-1963, 1920-1950 y 1995-2018, con frecuencia de 1-7, 1-2, 4-7, 10-16 y 5-7 años, respectivamente, lo cual sugiere una influencia significativa de la variabilidad de este fenómeno en la modulación de la precipitación para esta región del país.

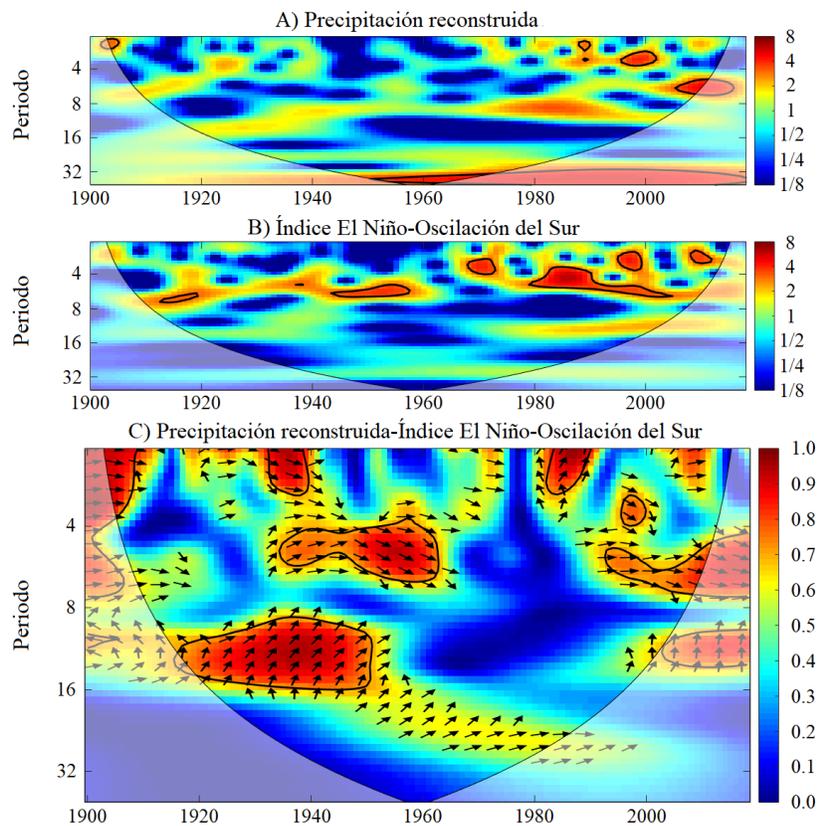


Figura 26. Espectro de ondeleta para la precipitación reconstruida A) y el índice ENSO 3.4 B). Análisis de coherencia de ondeletas entre la serie de precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4 C). Las áreas en color rojo delimitadas por una línea negra indican una relación significativa ($P < 0.05$) entre las dos variables. Las flechas horizontales hacia la derecha indican que ambos fenómenos están en fase (relación positiva). Por el contrario, las flechas hacia la izquierda señalan una relación en antifase, o una relación negativa.

5.2 DISCUSIÓN

5.2.1 SENSIBILIDAD DE LAS SERIES

La cronología regional generada que comprende El Santuario de la Cotorra Serrana y La Norteña, supera el parámetro de correlación determinado por el programa COFECHA (Holmes, 1983), el cual establece como mínima correlación significativa entre series de crecimiento $r = 0.3281$ ($P < 0.01$). Lo anterior señala que las especies empleadas para el desarrollo de la cronología poseen una buena sensibilidad a los cambios ambientales, presentando potencial para fines de reconstrucción de la variabilidad climática regional.

5.2.2 VARIABILIDAD COMÚN DE LAS SERIES

Las tres diferentes especies muestran una variabilidad climática común a través del tiempo, lo que sugiere que el crecimiento anual de los árboles está influenciado por condiciones climáticas que modulan el clima regional. Múltiples trabajos desarrollados en diversas partes del país han encontrado una respuesta común entre diferentes especies para la Sierra Madre Oriental (Cerano-Paredes *et al.*, 2011a y 2011b) y la Sierra Madre Occidental (Díaz *et al.*, 2002; Irby *et al.*, 2013; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015; Chávez-Gándara *et al.*, 2017), aun cuando estén separadas por kilómetros de distancia, pero con condiciones climatológicas comunes atribuido a una variabilidad climática modulada por fenómenos de gran escala.

5.2.3 RESPUESTA DE LA CRONOLOGÍA A LA VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

La variable climática que influye de forma significativa en el crecimiento de las especies arbóreas en la región de estudio es la precipitación, particularmente la lluvia estacional invierno-primavera. Villanueva-Díaz *et al.* (2015) reporta resultados similares en la región norponiente del estado de Chihuahua. La respuesta del crecimiento de coníferas a la precipitación invierno-primavera en el noroeste de México y suroeste de los Estados Unidos, ha sido corroborado por diversos estudios paleoclimáticos (D'Arrigo & Jacoby, 1991; Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano-Paredes *et al.*, 2009, 2012). Una explicación a lo anterior se debe a que las lluvias que se presentan durante el invierno suelen ser de poca intensidad, favoreciendo la infiltración y la saturación el suelo. A su vez, la baja evapotranspiración que existe en esos meses hace que el agua sature el suelo y esta esté disponible para el siguiente periodo de crecimiento de los árboles (Zywiec *et al.*, 2017).

A pesar de que la mayor cantidad de precipitación se registra entre los meses de verano durante el periodo de julio a septiembre, debido a la presencia del Monzón de Norteamérica, no existe una relación significativa

($P > 0.05$) con el desarrollo anual del anillo total. Esto se puede atribuir a que para este período del año la formación del anillo de crecimiento se encuentra ya en su etapa final. Además, la cantidad de lluvia que llega a caer en esos meses supera la capacidad de infiltración del suelo, provocando que el agua escurra como flujo superficial y no se registre en el desarrollo de los árboles (Chávez-Gándara *et al.*, 2017). Varias reconstrucciones paleoclimáticas han documentado y discutido la respuesta del crecimiento de diversas coníferas a la precipitación invierno-primavera en el estado de Chihuahua (Díaz *et al.*, 2002; Irby *et al.*, 2013; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015) y en otras partes del país (Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano-Paredes *et al.*, 2009, 2011, 2012; Chávez-Gándara *et al.*, 2017).

5.2.4 SEQUÍAS RECONSTRUIDAS

La disponibilidad de información histórica sobre la ocurrencia de sequías y sus estragos en la sociedad son escasos en el país. En lo que respecta a la parte norte de México, la documentación de dichos eventos da inicio a partir de la segunda mitad del siglo XVIII cuando el área fue colonizada y poblada (García-Acosta, 1993). Para el estado de Chihuahua, los registros existentes reportan afectaciones por sequías durante varios periodos a mediados de la década de 1720, finales de 1730 y principios de 1740, entre 1748 y 1766, en los primeros tres años de la década de 1770, a la mitad de 1780, primeros dos decenios del siglo XIX, entre 1890 y 1897, y durante el siglo XX en las décadas de 1930, 1950 y 1990 (Endfield & Fernández-Tejedo, 2006). La reconstrucción de la variabilidad de la precipitación para la región oeste del estado de Chihuahua, registró a excepción del período de finales de 1730 a principios de 1740, todos los eventos reportados, lo cual valida la calidad de resolución anual de la serie reconstruida.

La sequía registrada a finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII (1695–1707) se ha reportado en otras reconstrucciones paleoclimáticas realizadas en los estados de Chihuahua (Villanueva-Díaz *et al.*, 2015) y Durango (Cerano-Paredes *et al.*, 2012). Además, el análisis de correlación espacial de PDSI muestra que la mayor intensidad de esta sequía se concentró en dichos estados (Figura 25A). En lo que se refiere a la sequía reconstruida a mediados del siglo XVIII, con una duración de casi veinte años (1751–1768), su afectación se extendió por gran parte del norte de México y los estados sureños de los Estados Unidos (Figura 25B), corroborando lo reportado por Cook *et al.* (2009) y Cerano-Paredes *et al.* (2011). Por otra parte, una de las sequías ampliamente documentadas conocida como “El Año del Hambre”, la cual tuvo lugar en el periodo de 1785–1786 y que es considerada como el evento más severo en la historia de la agricultura de la Nueva España (Therrell *et al.*, 2006), sus efectos en la parte norte fueron menos severos en comparación con el centro de México, región que padeció hambruna y epidemias que mataron a más de 300 mil personas (Florescano-Mayet, 1986).

El inicio de la lucha armada por la independencia de México fue precedido por sequías y malas cosechas en los años de 1807, 1808 y 1809, la cual originó en 1810 que los precios del maíz se elevaran excesivamente, escasez de alimentos y una crisis en todo el virreinato (O'Hara & Metcalfe, 1997). Esto creó desempleo en el campo y en las ciudades, tensión social en las poblaciones, epidemias y motines populares (Florescano-Mayet, 1980). La insurrección al llamado de independizarse del Reino de España fue sostenida por la enorme cantidad de campesinos, indígenas y peones sin trabajo, sin alimentos y sin nada que perder (Florescano-Mayet, 1986). La reconstrucción de la variabilidad de lluvia para el oeste de Chihuahua, así como el análisis de correlación espacial con el PDSI (Figura 25C) confirman esta información, en donde se muestra que todo el territorio de la Nueva España se vio severamente afectado.

Para los últimos años del periodo conocido como el “Porfiriato” (1908–1911), nuevamente se reconstruyó una precipitación por debajo de la media. Esta sequía causó una escasez masiva de alimentos, lo que llevó posteriormente al descontento social (Irby *et al.*, 2013). Florescano-Mayet (1980) señala una relación estrecha entre las condiciones de sequía de años posteriores a la Revolución Mexicana que afectaron principalmente los estados de Querétaro e Hidalgo en el centro del país y Chihuahua, Coahuila y Nuevo León en la parte norte, con el estallido de la Revolución, lugares claves en donde se gestó dicha insurrección. Las sequías prolongadas de las décadas de 1930, 1950 y 1990 han sido registradas en otras reconstrucciones paleoclimáticas realizadas en el estado de Chihuahua (Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Irby *et al.*, 2013; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015) documentando escasez de agua, pérdida de cosechas y ganado. El análisis de correlación espacial muestra que la sequía de mediados del siglo XX tuvo una afectación importante, impactando gran parte del suroeste de los Estados Unidos y la región norte de México (Figura 25D) (O'Hara & Metcalfe, 1997; Cleaveland *et al.*, 2003). Este episodio ocasionó una gran crisis económica en el medio rural de los estados del norte del país, provocando que decenas de miles de campesinos se vieran obligados a emigrar a las grandes ciudades mexicanas, e inclusive hacia los Estados Unidos en búsqueda de oportunidades (Florescano-Mayet, 1980).

La variabilidad de importantes sequías se ha observado cada mediados y finales o inicio de cada siglo, ha intervalos de 50 años (Figura 24), lo cual sincroniza con los resultados reportados en otros estudios paleoclimáticos realizados en distintas partes del país (Cerano-Paredes *et al.*, 2012; Chávez-Gándara *et al.*, 2017). Además, se ha reportado la ocurrencia de dichos eventos de baja frecuencia tanto en la Sierra Madre Occidental como en la Sierra Madre Oriental a una gran escala geográfica, eventos que pueden estar modulados por fenómenos de circulación general (Cerano-Paredes *et al.*, 2011a, 2011b; Irby *et al.*, 2013; Villanueva-Díaz *et al.*, 2015).

Los episodios más severos de sequías reconstruidos para la zona oeste del estado de Chihuahua, sincronizan con eventos registrados en la mayor parte del norte y centro de México, y sur de los Estados Unidos, registrando importantes variaciones de intensidad entre regiones. Lo anterior se puede atribuir a que

fenómenos climáticos comunes que modulan la variabilidad climática a gran escala, afectan con diferente intensidad entre regiones geográficas. Investigaciones han señalado una recurrencia de eventos extremos de sequía con intervalos aproximados de 50 años, a mediados y a finales o inicio de cada siglo, tanto para el centro (Therrell *et al.*, 2006) como para el norte del país (Cerano-Paredes *et al.*, 2011b).

5.2.5 INFLUENCIA DEL ENSO SOBRE LA PRECIPITACIÓN

El norte de México es una región climatológica interesante de América del Norte, donde ENSO influye fuertemente en la variabilidad interanual del clima invierno-primavera (Stahle *et al.*, 1998; Magaña-Rueda, 1999; Cleaveland *et al.*, 2003). El desarrollo de regímenes prolongados de sequía y humedad en esta región reflejan la alta relación entre la variabilidad decenal y la varianza anual tanto en la precipitación de la estación fría como en la cálida (Cleaveland *et al.*, 2003). La precipitación en la estación fría en el norte de México y el suroeste de los Estados Unidos se correlaciona significativamente con los índices de ENSO (Magaña-Rueda *et al.*, 2003). Esta teleconexión del ENSO con el clima del norte de México, se registra claramente en el crecimiento de los árboles de la Sierra Madre Occidental (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland, *et al.*, 2003; Cerano-Paredes *et al.*, 2009; Chávez-Gándara *et al.*, 2017).

La reconstrucción de la precipitación invierno-primavera para el oeste de Chihuahua, también contiene una fuerte señal ENSO en los dominios de tiempo y frecuencia. El análisis espectral de coherencia de ondeletas muestra que la variabilidad de la precipitación es modulada de forma significativa por el fenómeno ENSO a diferentes escalas de tiempo y frecuencia en los últimos 100 años (Figura 26). Existe una coherencia significativa entre la precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4. ENSO tiene una relación significativa con los últimos tres eventos de sequía más importantes en esta región del norte del país, a inicio del siglo XX, mediado del siglo XX y finales del siglo XX e inicios del siglo XXI (Gergis & Fowler, 2009). La sequía de mediados del siglo XX ocasionó una gran crisis económica, provocando que decenas de miles de campesinos se vieran obligados a emigrar. Trenberth (1997) señala que dos de los eventos más intensos del ENSO en su fase fría, 1950–1951 y 1954–1956, provocaron importantes reducciones en la precipitación y propiciaron severas sequías en una gran parte del norte de México.

6 CONCLUSIONES

Los datos climáticos utilizados no mostraron una tendencia clara de aumento o disminución a largo plazo de las temperaturas anuales. Sin embargo, en lo que respecta a las precipitaciones, se ha observado una disminución significativa de las mismas desde mediados de la década de 1990, lo que podría tener un impacto importante en la salud de los ecosistemas de la región.

Tanto *P. menziesii* como *P. arizonica* situados en esta región de la Sierra Madre Occidental respondieron significativamente a las variables climáticas. La precipitación de noviembre a mayo influyó positivamente en el crecimiento de ambas especies, aunque únicamente representó el 20% de la precipitación anual. Por el contrario, la temperatura máxima invierno-primavera afectó negativamente el desarrollo de ambas coníferas, posiblemente provocado por un aumento de los niveles de evapotranspiración, produciendo estrés ambiental en los árboles.

La respuesta climática de *P. menziesii* no ha variado con el tiempo, pero ha sido más intensa que *P. arizonica*, lo que podría deberse a que la primera es una especie muy sensible. Por el contrario, *P. arizonica* ha comenzado a responder de manera similar a *P. menziesii* en los últimos años, quizás debido a los cambios en los patrones de lluvia. En un escenario de cambio climático antropogénico, con menos lluvia y temperaturas más elevadas, se espera que ambas especies se vean afectadas en su desarrollo y sean susceptibles a brotes de insectos o a eventos de incendios. Lo anterior podría ser contraproducente para la biodiversidad existente en esta región de México, que a su vez brinda importantes servicios ambientales como la captura de carbono o el suministro de agua para las comunidades situadas en la región.

Por otra parte, la reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (octubre-junio) para esta área de la Sierra Madre Occidental, ha permitido analizar la variabilidad climática de los últimos 359 años, así como la influencia que tiene el ENSO en la hidroclimatología del lugar. Además, a lo largo de toda la reconstrucción, se ha observado patrones recurrentes de importantes sequías cada 50 años, registrándose a mediados y finales e inicio de cada siglo. Esto último puede estar relacionado con la variabilidad de baja frecuencia reportada para el centro y norte del país, modulada por fenómenos de circulación general como ENSO.

Con los resultados obtenidos, se muestra la importancia de conocer a detalle la frecuencia de eventos extremos, como las sequías, y como se relacionan con patrones circulatorios como ENSO, el cual impacta una amplia zona del norte de México y suroeste de Estados Unidos. Asimismo, la reconstrucción de la precipitación, utilizando los anillos de crecimiento de los árboles como bioindicador, permite conocer la sustentabilidad de los bosques y la variación climática natural. Lo anterior proporciona información a los tomadores de decisiones y gestores sobre la ocurrencia de estos eventos extremos, permitiendo desarrollar y ejecutar planes de acción para alcanzar la conservación deseada y gestionar de forma sustentable el recurso

hídrico, necesario para el desarrollo agrícola y ganadero de la región, del cual dependen miles de personas. De esta manera, un mayor entendimiento de estos fenómenos naturales, como ENSO, colocará a los tomadores de decisiones y gestores en una mejor posición para mitigar los riesgos que afectan la conservación y el uso sustentable de los recursos naturales de este lugar, así como tener una mejor adaptación para los diferentes escenarios de cambio climático.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Adams, H. D., Barron-Gafford, G. A., Minor, R. L., Gardea, A. A., Bentley, L. P., Law, D. J., Breshears, D. D., McDowell, N. G. & Huxman, T. E. (2017). Temperature response surfaces for mortality risk of tree species with future drought. *Environmental Research Letters*, 12, 115014. DOI: 10.1088/1748-9326/AA93BE
- Anchukaitis, K. J. (2017). Tree Rings Reveal Climate Change Past, Present, and Future. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 161(3), 244-263. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/45211559>
- Anchukaitis, K. J., D'Arrigo, R. D., Andreu-Hayles, L., Frank, D., Verstege, A., Curtis, A., Buckley, B., Jacoby, G. & Cook, E. (2012). Tree-ring reconstructed summer temperatures from northwestern North America during the last nine centuries. *Journal of Climate*, 26(10), 3001-3012. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00139.1
- Arreola-Ortiz, M. R. & Nívar-Cháidez, J. 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. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n71/n71a2.pdf>
- Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., Nava-Bernal, G. & Gómez-Albores, M. A. (2017). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees*, 31, 441-453. DOI: 10.1007/s00468-016-1460-z.
- Babst, F., Bouriaud, O., Poulter, B., Trouet, V., Girardin, M. & Frank, D. C. (2019). Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances*, 5(1). DOI: 10.1126/sciadv.aat4313
- Barton, A. M., Swetnam, T. W. & Baisan, C. H. (2001). Arizona pine (*Pinus arizonica*) stand dynamics: local and regional factors in a fire-prone madrean gallery forest of Southeast Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 16(4), 351-369. DOI: 10.1023/A:1011189408651
- Becker, B. (1991). The history of dendrochronology and radiocarbon calibration. En: Taylor, R. E., Long, A., & Kra, R. S. (eds.). *Radiocarbon after four decades: An interdisciplinary perspective*. Springer. New York, NY, USA. DOI: 10.1007/978-1-4757-4249-7_4
- Bradley, R. S. (2011). High-Resolution Paleoclimatology. En: Hughes M., Swetnam T. & Diaz H. (eds.). *Dendroclimatology. Progress and Prospects*, vol 11. Springer, New York, NY, USA. DOI: 10.1007/978-1-4020-5725-0_1
- Briffa, K. R., Jones, P. D., Pilcher, J. R. & Hughes, M. K. (1988). Reconstructing Summer Temperatures in Northern Fennoscandia Back to A.D. 1700 Using Tree-Ring Data from Scots Pine. *Arctic and Alpine Research*, 20(4), 385-394. DOI: 10.2307/1551336

- Carlón-Allende, T., Villanueva-Díaz, J., Mendoza, M. E. & Pérez-Salicrup, D. R. (2018). Climatic signal in earlywood and latewood in conifer forests in the monarch butterfly biosphere reserve, Mexico. *Tree-Ring Research*, 74(1), 63–75. DOI: 10.3959/1536-1098-74.1.63
- Carlón-Allende, T., Villanueva-Díaz, J., Soto-Castro, G., 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. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106920
- 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. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712009000200002
- Cerano-Paredes, J., Villanueva Díaz, J. & Fulé, P. Z. (2010). Reconstrucción de incendios y su relación con el clima para la reserva Cerro el Mohinora, Chihuahua. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 1(1), 63-74. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322010000100008
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Cornejo-Oviedo, H. E., Sánchez-Cohen, I., & Constante-García, V. (2011a). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 33–47. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000200004
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Méndez-González, J. & Constante-García, V. (2011b). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 235–249. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800006
- 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 del Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 7–23. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322012000200002
- Cerano-Paredes, J., Méndez-González, J., Amaro-Sánchez, A., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R. & Rubio-Camacho, E. A. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(3) 413-423. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2013.02.007
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Cervantes-Martínez, R., Esquivel-Arriaga, G., Guerra-de-la-Cruz, V. & Fulé, P. Z. (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*, 37(2), 389-399. DOI: 10.4067/S0717-92002016000200017

- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Cervantes-Martínez, R., Magaña-Rueda, V., Constante-García, V., Esquivel-Arriaga, G. & Valdez-Cepeda, R. (2019). Climatic influence on fire regime (1700 to 2008) in the Nazas watershed, Durango, Mexico. *Fire Ecology*, *15*, 1-14. DOI: 10.1186/s42408-018-0020-x
- Cervantes-Martínez, R., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Martínez, G., Villanueva-Díaz, J., Esquivel-Arriaga, G., Cambrón-Sandoval, V. H., Méndez-González, J. & Castruita-Esparza, L. U. (2019). Historical bark beetle outbreaks in Mexico, Guatemala and Honduras (1985-2015) and their relationship with droughts. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, *25*(2), 269-290. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2019.01.006.
- 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*, *38*(2), 387–399. DOI: 10.4067/S0717-92002017000200016
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Díaz, J. & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climate Change*, *59*, 369–388. DOI: 10.1023/A:1024835630188
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2019). Portal de Geoinformación. Sistema Nacional de Información Sobre Biodiversidad. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E. & Valencia-Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *34*(106), 17-39. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000200002
- Cook, E. R. (1985). *A time series analysis approach to tree ring standardization*. Tesis doctoral. University of Arizona, School of Renewable Natural Resources. Tucson, AZ, USA. Disponible en: <https://ltr.arizona.edu/content/time-series-analysis-approach-tree-ring-standardization>
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, *47*, 37–59. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10150/261788>
- Cook, E. R. & Peters, K. (1981). The Smoothing Spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, *41*, 45–53. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10150/261038>
- Cook, E. R. & Briffa, K. (1990). Data Analysis. En: Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A. (eds.). *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers. Londres, Reino Unido. ISBN 0-7923-0586-8

- Cook, E. R. & Kairiukstis, L.A. (1990). *Methods of Dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers. Londres, Reino Unido. ISBN 0-7923-0586-8
- Cook, E. R. & Cole, J. (1991). On predicting the response of forests in eastern North America to future climatic change. *Climatic Change* 19, 271–282. DOI: 10.1007/BF00140166
- Cook, E. R., Seager, R., Heim Jr, R. R., Vose, R. S., Herweijer, C. & Woodhouse, C. (2009). Megadroughts in North America: placing IPCC projections of hydroclimatic change in a long-term palaeoclimate context. *Journal of Quaternary Science*, 25, 48–61. DOI: 10.1002/jqs.1303
- Cortés-Barrera, E. N., Villanueva-Díaz, J., Estrada-Ávalos, J., Nieto-de-Pascual-Pola, C., Guerra-de-la-Cruz, V. & Vázquez-Cuecuecha, O. (2010). Utilización de *Taxodium mucronatum* Ten para determinar la variación estacional de la precipitación en Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 113-121. DOI: 10.29298/rmcf.v1i1.659
- Creber, G. T. & Chaloner, W. G. (1984). Influence of Environmental Factors on the Wood Structure of Living and Fossil Trees. *Botanical Review*, 50(4), 357-448. DOI: 10.1007/BF02862630
- Cruz-Maldonado, N. N. (2010). *Contribución a la conservación de cotorra serrana (Rhynchopsitta pachyrhyncha) mediante la caracterización y modelación de sitios potenciales de anidación en la Sierra Madre Occidental, México*. Tesis de maestría. Escuela de Postgrado CATIE, Turrialba, Costa Rica. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11554/949>
- D'Arrigo, R. D. & Jacoby, G. C. (1991). A 1000-year record of winter precipitation from northwestern New Mexico, USA: A reconstruction from tree-rings and its relation to El Niño and the Southern Oscillation. *The Holocene*, 1(2), 95–101. DOI: 10.1177/095968369100100201
- Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J. & Wotton, B. M. (2001). Climate Change and Forest Disturbances: Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience*, 51(9), 723–734. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0723:CCAFD]2.0.CO;2
- Descroix, L., González-Barrios, J. L., & Estrada-Ávalos, J. (2004). *La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada*. Ediciones INIFAP – IRD. Gómez Palacio, México. ISBN 968-800-584-3
- Díaz, S. C., Touchan, R. & Swetnam, T. W. (2001). A Tree-Ring Reconstruction of Past Precipitation for Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Climatology*, 21, 1007-1019. DOI: 10.1002/joc.664
- Díaz, S. C., Therrell, M. D., Stahle, D. W. & Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research*, 22, 237-244. DOI: 10.3354/CR022237

- Douglass, A. E. (1909). Weather cycles in the growth of big trees. *Monthly Weather Review*, 37(6), 225–237. DOI: 10.1175/1520-0493(1909)37[225d:WCITGO]2.0.CO;2
- Douglass, A. E. (1919). *Climatic cycles and tree-growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity*. Washington D.C.: Carnegie Institution. DOI: 10.1002/qj.49704719812
- Douglass, A. E. (1941). Crossdating in dendrochronology. *Journal of Forestry* 39(10), 825–831. DOI: 10.1093/jof/39.10.825
- Duff, G. H. & Nolan, N. J. (1953). Growth and morphogenesis in the Canadian forest species. Part I. The controls of cambial and apical activity in *Pinus resinosa* Ait. *Canadian Journal of Botany*, 31, 471–513. DOI: 10.1139/b53-037
- Duvick, D. N. & Blasing, T. J. (1981). A dendroclimatic reconstruction of annual precipitation amounts in Iowa since 1680. *Water Resources Research*, 17, 1183-1189. DOI: 10.1029/WR017i004p01183
- Endfield, G. H. & Fernández-Tejedo, I. (2006). Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climate Change*, 75, 391–419. DOI: 10.1007/s10584-006-3492-7
- Florescano-Mayet, E. M. (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*. Ciudad de México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico.
- Florescano-Mayet, E. M. (1986). *Precios del maíz y crisis agrícolas en México: 1708 – 1810*. Ciudad de México: Editorial Era. ISBN 9684111533
- Friedrich, M., Remmele, S., Kromer, B., Hofmann, J., Spurk, M., Kaiser, K. F., Orcel, C. & Koppers, M. (2004). The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from central Europe – A unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon* 46(3): 1111–1122. DOI: 10.1017/S003382220003304X
- Fritts, H. C. (1966). Growth-Rings of Trees: Their Correlation with Climate. *Science*, 154(3752), 973-979. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/1719644>
- Fritts, H. C. (1971). Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research* 1, 419–449. DOI: 10.1016/0033-5894(71)90057-3
- Fritts, H. C. (1974). Relationships of Ring Widths in Arid-Site Conifers to Variations in Monthly Temperature and Precipitation. *Ecological Monographs*, 44(4), 411-440. DOI: 10.2307/1942448
- Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press. ISBN 0-12-268450-8

- Fritts, H. C. (1991). *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press. ISBN 0816512183
- Fritts, H. C. & Swetnam, T. W. (1989). Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments. En: Begon, M., Fitter, A.H., Ford, E.D., MacFadyen, A. (eds.). *Advances in Ecological Research*. Academic Press. ISBN 9780120139194. DOI: 10.1016/S0065-2504(08)60158-0
- Fuentes, M., Salo, R., Björklund, J., Seftigen, K., Zhang, P., Gunnarson, B., Aravena, J. C. & Linderholm, H. W. (2018). A 970-year-long summer temperature reconstruction from Rogen, west-central Sweden, based on blue intensity from tree rings. *The Holocene*, 28(2), 254–266. DOI: 10.1177/0959683617721322
- Fulé, P. Z. & Covington, W. W. (1997). Fire regimes and forest structure in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico. *Acta Botánica Mexicana*, 41, 43-79. DOI: 10.21829/abm41.1997.791
- García, E. (1978). *Apuntes de climatología*. Ciudad de México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- García, E. (1998). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Ciudad de México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). ISBN 970-32-1010-4
- García-Acosta, V. (1993). Las sequías históricas de México. Desastres y Sociedad. *Revista semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, 1, 1–18. Disponible en: <https://www.desenredando.org/public/revistas/dys/rdys01/dys1-LSHM-oct-24-2001.pdf>
- Gebrekirstos, A., Bräuning, A., Sass-Klassen, U. & Mbow, C. (2014). Opportunities and applications of dendrochronology in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 48-53. DOI: 10.1016/j.cosust.2013.10.011
- Gergis, J. L. & Fowler, A. M. (2009). A history of ENSO events since A.D. 1525: implications for future climate change. *Climate Change*, 92, 343–387. DOI: 10.1007/s10584-008-9476-z
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Nívar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva-Díaz, J., Aguirre, O. & Jiménez, J. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681–2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213(1-3), 39-53. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.03.012
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L. & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta botánica mexicana*, 100, 351-403. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-71512012000300012

- Griffin, D., Woodhouse, C. A., Meko, D. M., Stahle, D. W., Faulstich, H. L., Carrillo, C. & Leavitt, S W. (2013). North American monsoon precipitation reconstructed from tree-ring latewood. *Geophysical Research Letters*, 40(5), 954-958. DOI: 10.1002/grl.50184
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205–221. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10150/251654>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Nueva York, NY, USA. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del IPCC*. Ginebra, Suiza. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Hannak, N. & Eggertsson, O. (2020). The long-term effects of climatic factors on radial growth of downy birch (*Betula pubescens*) and rowan (*Sorbus aucuparia*) in East Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*, 33, 73-87. DOI: 10.16886/IAS.2020.07
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43(1), 69–78. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.01.004
- Huante, P., Rincon, E. & Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin*, 51, 15-28. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10150/262286>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Disponible en: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L. & Villanueva-Díaz, J. (2013). Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques*, 19(1), 93–105. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61727444007>
- Janetos, A., Hansen, L., Inouye, D., Kelly, B. P., Meyerson, L., Peterson, B. & Shaw, R. (2008). Biodiversity. En: U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research (eds.). *The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity*. Washington, D.C., USA. Disponible en: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2008_backlund_p003.pdf

- Lammertink, J. M., Rojas-Tomé, J. A., Casillas-Orona, F. M. & Otto, R. L. (1996). Status and conservation of old-growth forests and endemic birds in the pine-oak zone of the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Verslagen en Technische Gegevens*, 69(1), 1–89. Disponible en: <https://repository.naturalis.nl/pub/506361>
- Leverenz, J. W. (1981). Photosynthesis and transpiration in large forest-grown Douglas-fir: diurnal variation. *Canadian Journal of Botany*, 59(3), 349-356. DOI: 10.1139/b81-048
- Liutsko, L. (2008). *What trees tell us: dendrochronological and statistical analysis of the data*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona, Facultat de Biología. Barcelona, España. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2445/11509>
- Magaña-Rueda, V. O. (1999). *Los impactos de El Niño en México*. México. SEP-CONACYT. Disponible en: <http://centro.paot.org.mx/index.php/porinstituciones/otros-organismos/73-varios/745-los-impactos-de-el-nino-en-mexico>
- Magaña-Rueda, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L. & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330. Disponible en: http://areas.geofisica.unam.mx/geofisica_internacional/anteriores/2003/03/magana.pdf
- Meko, D. M. & Woodhouse, C. A. (2011). Application of Streamflow Reconstruction to Water Resources Management. En: Hughes M., Swetnam T., & Diaz H. (eds.). *Dendroclimatology. Progress and Prospects*, vol 11. Springer, New York, NY, USA. DOI: 10.1007/978-1-4020-5725-0_1
- Mikola, P. (1962). Temperature and tree growth near the northern timberline. En: Kozłowski T. T. (ed.). *Tree Growth*. Ronald Press, New York, NY, USA.
- Morgan, P., Aplet, G. H., Haufler, J. B., Humphries, H. C., Margaret, M. M. & Wilson, W. D. (1994). Historical range of variability: A useful tool for evaluating ecosystem change. *Journal of Sustainable Forestry*, 2(1-2), 87-111. DOI: 10.1300/J091v02n01_04
- Norton, D. A. & Ogden, J. (1990). Problems with the Use of Tree Rings in the Study of Forest Population Dynamics. En: Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A. (eds.). *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers. Londres, Reino Unido. ISBN 0-7923-0586-8
- Novick, K. A., Ficklin, D. L., Stoy, P. C., Williams, C. A., Bohrer, G., Oishi, A. C., Papuga, S. A., Blanken, P. D., Noormets, A., Sulman, B. N., Scott, R. L., Wang, L. & Phillips, R. P. (2016). The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 6, 1023–1027. DOI: 10.1038/nclimate3114
- O’Hara, S. L. & Metcalfe, S. E. (1997). The climate of Mexico since the Aztec period. *Quaternary International*, 43/44, 25–31. DOI: 10.1016/S1040-6182(97)00017-7

- Potts, H. (1962). A 600-year record of drought recurrences. En: *First Water Resources Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, Omaha, NE, USA.
- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Austria. Disponible en: <https://www.R-project.org/>.
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V. & Rowell, D. P. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, 108(D14). DOI: 10.1029/2002JD002670
- Robinson, W. J. & Evans, R. (1980). A microcomputer based tree-ring measuring system. *Tree Ring Bulletin*, 40, 59-64. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10150/260443>
- Ryan, M., Archer, S., Birdsey, R., Dahm, C., Heath, L., Hicke, J., Hollinger, D., Huxman, T., Okin, G., Oren, R., Randerson, J. & Schlesinger, W. (2008). Land Resources. En: U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research (eds.). *The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity*. Washington, D.C., USA. Disponible en: https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2008_backlund_p003.pdf
- Rydval, M., Loader, N. J., Gunnarson, B. E., Druckenbrod, D. L., Linderholm, H. W., Moreton, S. G., Wood, C. V. & Wilson, R. (2017). Reconstructing 800 years of summer temperatures in Scotland from tree rings. *Climate Dynamics*, 49, 2951–2974. DOI: 10.1007/s00382-016-3478-8
- Salhab, H. M., Ali, W. & Abboud, L. (2018). Influence of Precipitation and Temperature on Tree-Ring Width of Brutia Pine (*Pinus brutia* Ten.) in Tartous-Syria. *SSRG International Journal of Agriculture & Environmental Science*, 5(5), 22-33. DOI: 10.14445/23942568/IJAES-V5I5P105
- Sarton, G. (1954). When was tree-ring analysis discovered? *Isis*, 45(4), 383–384. Disponible en: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/pdf/10.1086/348359>
- Schulman, E. (1944). Dendrochronology in Mexico, I. *Tree-Ring Bulletin*, 10(3), 18-24. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10150/255305>
- Schweingruber, F. H. (1988). *Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology*. D. Reidel Publishing Company Dordrecht. ISBN 978-90-277-2445-8. DOI: 10.1007/978-94-009-1273-1
- Schweingruber, F. H. (2007). *Wood Structure and Environment*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-48299-4. DOI: 10.1007/978-3-540-48548-3
- Scott, S. D. (1966). Dendrochronology in Mexico. *American Antiquity*, 33(1), 115-116. DOI: 10.2307/277791

- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M. J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T. A. & Reyer, C. P. O. (2017). Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7, 395–402. DOI: 10.1038/nclimate3303
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2019). Información Climatológica. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- Sheppard, P. (2010). Dendroclimatology: extracting climate from trees. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1, 343-352. DOI: 10.1002/WCC.42
- Speer, J. H. (2009). *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press. DOI: 10.1002/gea.20357
- Sohar, K., Altman, J., Lehečková, E. & Doležal, J. (2016). Growth–climate relationships of Himalayan conifers along elevational and latitudinal gradients. *International Journal of Climatology*, 37, 2593–2605. DOI: 10.1002/joc.4867
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., Cole, J. E., Dunbar, R. B., Therrell, M. D., Gay, D. A., Moore, M. D., Stokes, M. A., Burns, B. T., Villanueva-Díaz, J. & Thompson L. G. (1998). Experimental Dendroclimatic Reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137–2152. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2
- Stahle, D. W., Burnette, D. J., Villanueva-Díaz, J., Heim, R. R., Fye, F. K., Cerano-Paredes, J., Acuña-Soto, R. & Cleaveland, M. K. (2011). Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics*, 39, 1431-1446. DOI: 10.1007/s00382-011-1205-z
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Burns, J. N., Griffin, D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenson, M. C. A., Szejner, P. & Howard, I. M. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34–60. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.06.018
- Stallings, W. S. (1937). Some Early Papers on Tree-Ringses. *Tree-Ring Bulletin*, 3(4), 28-29. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10150/254848>
- Stockton, C. W. & Jacoby, G. C. (1976). *Long-Term Surface Water Supply and Streamflow Levels in the Upper Colorado River Basin*. University of California, Institute of Geophysics and Planetary Physics. Los Angeles, CA, USA.
- Stokes, M. A. & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree–ring dating*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press. ISBN 0-8165-1680-4

- Studhalter, R. A. (1955). Tree growth: Some historical chapters. *The Botanical Review*, 21(1–3), 1–72. DOI: 10.1007/BF02872376
- Suzan, H. F. & Franco, M. (1981). Estudios dendrocronológicos en México en poblaciones de *P. hartwegii*. En *Memorias VIII Congreso de Botánica*, 277-278
- Suzan, H. F. & González, M. (1984). Estudios autoecológicos- dendrocronológicos en *Pinus nelsonii*. *Desarrollo Tecnológico y Científico*, 127-140
- Swetnam, T. & Brown, P. (2010). Comparing selected fire regime condition class (FRCC) and LANDFIRE vegetation model results with tree-ring data. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 1-13. DOI: 10.1071/WF08001
- Terán-Cuevas, A. R., Gutiérrez-Castillo, M. E. & Davydova-Belitskaya, V. (2010). *Escenarios de lluvia en México*. Ciudad de México. Instituto Politécnico Nacional. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/23294>
- The MathWorks Inc. (2015). MATLAB. Natick, Massachusetts. Disponible en: <https://es.mathworks.com/>
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Villanueva-Díaz, J., Cornejo-Oviedo, H. E. & Cleaveland, M. K. (2006). Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474-2001. *Climate Change*, 74, 493–504. DOI: 10.1007/s10584-006-6865-z
- Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771–2777. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2
- Vaganov, E. A., Hughes, M. K., Kirilyanov, A. V., Schweingruber, F. H. & Silkin, P. P. (1999). Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature*, 400, 149-151. DOI: 10.1038/22087
- Villanueva-Díaz, J. & McPherson, R. G. (1996). Reconstruction of Precipitation and PDSI from Tree-Ring Chronologies Developed in Mountains of New Mexico, USDA and Sonora, Mexico. *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10150/297002>
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D. W., Estrada-Ávalos, J. & Constante-García, V. (2008). *Potencial Dendrocronológico de Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco y Reconstrucciones de Precipitación y Flujo en México*. Gómez Palacio, México. ISBN 978-607-425-002-2
- Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Cerano-Paredes, J., Estrada-Ávalos, J. & Sánchez-Cohen, I. (2009). Reconstrucción de la Precipitación Estacional para el Barlovento de la Sierra Madre Occidental con Anillos de Crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 34(105), 39-71. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-35862009000100003

- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Estrada-Ávalos, J. Morán-Martínez, R. & Constante-García, V. (2010). Precipitación y Gasto Reconstruido en la Cuenca Baja del Río Nazas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 25-37. DOI: 10.29298/RMCF.V1I1.650
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés-Montaña, C., Vázquez-Selem, L., Yocom, L. L. & Ruiz-Corral, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín*, 87, 141–153. DOI: 10.14350/rig.44485
- Warren, W. G. (1980). On removing the growth trend from dendrochronological data. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 35-44. Disponible en: <http://hdl.handle/10150/260442>
- Webb, G. E. (1983). *Tree Rings and Telescopes: The Scientific Career of A. E. Douglass*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press. ISBN 0816507988
- Williamson, D., Majule, A., Delalande, M., Mwakisunga, B., Mathé, P., Gwambene, B. & Bergonzini, L. (2014). A potential feedback between landuse and climate in the Rungwe tropical highland stresses a critical environmental research challenge. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 116-122. DOI: 10.1016/j.cosust.2013.11.014
- Wimmer, R., Strumia, G. & Holawe, F. (2000). Use of false rings in Austrian pine to reconstruct early growing season precipitation. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1691-1697. DOI: 10.1139/CJFR-30-11-1691
- Zang, C. & Biondi, F. (2014). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography* 38, 431–436 (ver. V). DOI: 10.1111/ecog.01335
- Zywiec, M., Muter, E., Zielonka, T., Delibes, M., Calvo, G. & Fedriani, J. M. (2017). Long-term effect of temperature and precipitation on radial growth in a threatened thermo-Mediterranean tree population. *Trees*, 31, 491–501. DOI: 10.1007/s00468-016-1472-8

8 ANEXOS

8.1 ANEXO I

ÍNDICE DE ANCHO DE ANILLO *Pseudotsuga menziesii*

El Santuario de la Cotorra Serrana – Área de Conservación (Madera, Chihuahua, México)

Longitud de la cronología 1863 – 2018 (156 años)

Cronología Estándar

156 años 1863 = Año inicial

0.8893 1.0724 1.2888 1.4258 1.1199 0.7232 0.9288 1.2396 1.1958 1.4639 1.4207 1.5651 1.6002 1.4850
1.2929 1.1079 1.0777 0.9825 1.0542 1.0536 1.0444 0.9724 0.8923 0.9928 0.5107 0.5845 0.5901 0.4721
0.5300 0.5602 0.5171 0.5116 0.6898 0.5380 0.4325 0.5580 0.4413 0.6880 0.6947 0.3632 0.8159 0.4800
0.9293 0.9664 0.9439 0.7467 0.8313 0.8529 0.9728 1.1031 1.0272 1.1141 0.8075 0.7623 0.9024 0.9097
0.8742 1.0281 0.9719 1.0071 1.0063 1.1122 0.8688 1.1265 1.2059 1.2158 0.9923 1.2033 1.0541 0.9937
1.2199 0.7152 0.7477 0.6573 0.8671 0.7741 0.6496 0.9151 1.0057 0.9536 0.9426 1.0885 0.9568 0.9105
0.9674 0.8103 0.9286 0.8266 0.7932 0.8800 0.7631 0.7013 0.8771 0.8425 1.0871 1.0828 1.0217 0.9657
0.9843 1.0960 1.0417 1.0910 1.0067 1.1111 1.0219 1.1495 1.1023 1.1604 0.8602 1.0507 1.2325 0.9059
1.1947 1.2241 1.0286 1.0545 1.1925 0.8465 1.0802 0.8296 0.9575 1.1234 1.1660 1.3443 1.3525 1.3661
0.8439 0.9730 1.3625 1.2574 1.0835 0.9432 0.9213 0.7007 1.0456 1.0907 0.8598 0.7816 1.0611 0.6733
0.8694 1.1107 1.0724 0.7998 1.0202 1.0027 1.1264 1.3549 0.6491 0.6403 0.5212 0.8540 1.0349 1.0184
1.1056 0.8002

Cronología Residual

154 años 1865 = Año inicial

0.9468 1.1258 0.9592 0.6505 1.0295 1.2738 1.0444 1.2571 1.0677 1.2460 1.2108 0.9960 0.9195 0.8603
0.9627 0.9251 1.0895 0.9896 0.9902 0.9746 0.8455 1.0480 0.6409 0.8281 0.9141 0.8254 0.9028 0.8490
0.8615 0.8567 1.0641 0.8176 0.8259 0.9737 0.8425 1.0233 0.9731 0.7406 1.1960 0.6713 1.2947 1.0561
0.9885 0.8128 1.0131 0.9964 1.0019 1.2137 0.9633 1.1146 0.7591 0.8799 1.0792 1.0216 0.9400 1.0969
0.9699 1.0507 1.0207 1.0933 0.7572 1.2344 1.1184 1.0392 0.8473 1.1987 0.9034 0.8859 1.2164 0.5267
0.8877 0.8214 1.1109 0.8608 0.7628 1.1652 1.1037 0.9774 0.9420 1.0679 0.8800 0.9383 1.0411 0.8486
1.0397 0.8480 0.8985 1.0042 0.8824 0.8582 1.0513 0.9595 1.1798 1.0540 1.0045 0.9731 1.0202 1.1028
0.9925 1.0523 0.9733 1.1257 0.9568 1.1192 1.0205 1.0936 0.8000 1.0882 1.1644 0.7837 1.1676 1.1026
0.8771 1.0132 1.1156 0.7350 1.1038 0.7848 1.0230 1.1093 1.0743 1.2445 1.1283 1.1405 0.6018 1.0155
1.3679 1.0482 0.9191 0.8739 0.9169 0.7246 1.1904 1.0993 0.8278 0.8582 1.1849 0.6850 1.0073 1.2082
1.0262 0.7560 1.0999 0.9997 1.1051 1.2885 0.5008 0.8307 0.7269 1.0940 1.1412 1.0138 1.1027 0.7809

Cronología Arstan

155 años 1864 = Año inicial

0.8893 0.8969 1.0793 0.9949 0.6482 0.8709 1.2156 1.1416 1.3209 1.2124 1.3417 1.3649 1.1605 0.9919
0.8566 0.8980 0.8791 1.0350 1.0054 0.9927 0.9713 0.8326 0.9725 0.6285 0.6606 0.7611 0.7177 0.7755
0.7478 0.7478 0.7430 0.9482 0.7943 0.7332 0.8533 0.7764 0.9225 0.9382 0.7127 1.0665 0.7013 1.1600
1.1283 1.0463 0.8337 0.9381 0.9685 0.9877 1.2082 1.0572 1.1404 0.8224 0.7999 0.9890 1.0166 0.9475
1.0732 1.0029 1.0520 1.0442 1.1133 0.8083 1.1479 1.1851 1.1227 0.9026 1.1548 0.9732 0.8739 1.1595
0.5986 0.7068 0.6892 0.9708 0.8476 0.6941 1.0272 1.1160 1.0297 0.9554 1.0478 0.9016 0.8939 0.9933
0.8456 0.9701 0.8346 0.8239 0.9249 0.8486 0.7899 0.9566 0.9399 1.1527 1.1228 1.0599 1.0001 1.0202
1.1120 1.0430 1.0717 1.0057 1.1283 1.0146 1.1258 1.0772 1.1284 0.8579 1.0241 1.1753 0.8628 1.1057
1.1502 0.9448 0.9884 1.1104 0.7848 1.0067 0.7879 0.9273 1.0766 1.1088 1.2935 1.2606 1.2580 0.7181
0.8884 1.3176 1.1914 1.0055 0.8764 0.8612 0.6620 1.0380 1.1164 0.8803 0.8043 1.0966 0.7285 0.8849
1.1563 1.0966 0.7995 1.0095 1.0039 1.1069 1.3367 0.6526 0.6740 0.5799 0.9046 1.0982 1.0581 1.1289
0.8391

ÍNDICE DE ANCHO DE ANILLO *Pinus arizonica*

La Norteña – Área de Conservación de Flora y Fauna “Campo Verde” (Madera, Chihuahua, México)

Longitud de la cronología 1660 – 2018 (359 años)

Cronología Estándar

359 años 1660 = Año inicial

1.8132 2.2965 0.9051 1.1004 0.5562 0.3955 0.4744 1.1689 1.1093 0.5474 0.9453 0.8779 0.9039 2.0148
1.7149 1.3970 1.3697 0.6966 0.8549 1.2600 0.7917 0.7890 1.0157 0.6457 0.1493 0.6772 0.9143 0.9118
0.7568 1.0679 0.2207 0.3806 1.2730 1.6625 1.5073 0.5721 0.5697 1.1920 0.9814 0.9702 0.9509 0.7906
0.8748 0.6990 0.5245 0.4788 0.7470 0.5786 1.1952 1.1734 1.1729 0.8252 1.0975 0.8232 1.0261 0.7884
0.5940 0.8587 1.1880 1.3419 1.8403 1.7783 1.4390 1.1134 1.1290 0.8715 1.0668 0.9622 1.0658 1.0120
1.1699 1.2062 1.1504 1.2259 1.1191 1.0897 1.4094 1.5695 1.3512 1.0261 1.0221 1.2988 0.7827 1.0816
1.0766 0.9789 1.1265 1.2438 0.7026 1.1366 0.9945 0.8919 0.4542 0.7521 0.6308 0.6629 0.7102 0.7787
0.8561 0.9569 0.9335 0.9702 0.9523 0.6405 0.9642 0.6971 0.9540 0.9385 0.8218 1.0570 0.9255 1.0250
0.7759 0.7884 0.8850 0.8549 1.0472 0.9546 0.8975 1.0597 1.1364 1.1739 0.9044 1.1816 1.3701 0.8074
1.2005 1.1201 1.1908 0.8604 1.1096 1.4075 1.0477 1.2509 1.0696 1.1526 1.3146 1.2729 0.9322 1.1431
1.0505 0.6863 0.7672 0.8178 1.1232 0.9023 1.0368 0.7058 0.6307 0.8388 0.9866 1.0468 0.8315 1.1137
1.3212 1.2896 1.0116 0.7705 0.9121 0.7084 0.6529 0.7138 0.8176 0.9471 0.9671 0.8487 1.0980 1.5863
0.9535 1.1230 0.8338 0.7953 1.0204 1.2471 1.0449 1.0706 1.1421 0.9096 1.0371 1.1053 0.8796 0.7548
0.8635 1.0981 1.1630 0.8843 0.9191 0.7041 0.9955 1.1717 1.0462 0.8941 1.1660 0.9342 1.0856 0.9493
0.9711 0.7568 1.1861 0.8925 0.8943 1.0676 1.0810 0.9786 0.7698 1.1213 1.0508 1.0297 1.0302 1.2428
1.0803 0.9678 0.9074 0.8241 0.9495 1.1775 1.2472 1.0806 1.1558 1.1295 0.8589 1.0005 0.9052 0.8981
1.0511 1.3076 1.0628 0.9926 1.1260 1.0033 0.8103 0.7822 0.9150 0.9412 0.8718 0.8288 0.8371 0.9088
1.0308 1.1242 1.1625 1.0564 0.6934 1.1156 0.5482 1.1429 0.9937 1.0070 0.9894 0.9641 0.7734 0.6594
1.0242 1.1142 1.1980 1.0391 1.0168 1.1884 1.2227 1.1835 1.2778 0.6721 0.8800 0.9835 1.0799 0.5531
0.9248 0.9173 0.8662 0.6995 0.9580 1.0114 0.9102 1.1410 0.6927 0.8125 0.7915 0.8748 0.8414 0.5607
1.1960 1.1429 1.0627 0.9835 1.0182 0.8468 0.9960 0.9659 1.0469 0.9365 1.0582 0.9049 1.2250 0.9214
0.8077 0.8537 0.6136 1.0021 1.2791 1.0267 0.9544 1.0757 1.1731 0.9191 1.1267 1.1516 1.3909 0.8035
1.3712 1.0616 1.3052 0.8608 1.0297 0.7280 0.5059 0.9930 1.1034 1.0097 0.9837 1.0785 0.9632 1.2209
0.5771 1.0873 1.3225 1.1822 1.2470 1.1373 1.7312 0.5773 0.9345 1.0219 0.9004 1.1179 1.0866 1.1510
0.8447 1.2886 1.2701 0.6567 0.6682 1.1938 0.7126 0.9868 1.0388 0.9615 0.6692 0.7297 0.9946 0.7858
1.1510 0.3305 0.7630 0.4928 0.7034 0.8974 0.6023 0.6142 0.4771

Cronología Residual

357 años 1662 = Año inicial

0.4119 1.0418 0.5303 0.5391 0.7107 1.1991 0.9327 0.4585 1.0383 0.9589 0.9672 2.0633 1.4275 1.0205
1.1302 0.5028 0.8729 1.3450 0.7300 0.8266 1.0202 0.7348 0.2698 0.9289 1.1061 0.9692 0.8021 1.0543
0.1761 0.5127 1.6285 1.7166 1.2785 0.1254 0.6321 1.2904 1.0551 1.0610 0.9578 0.8400 0.9689 0.7592
0.6371 0.7198 1.0301 0.7243 1.3748 1.1411 1.1018 0.8380 1.0869 0.7685 1.0441 0.8395 0.6721 1.1034
1.3898 1.1305 1.6780 1.4130 1.3193 0.8871 1.0660 0.7506 0.9600 0.9938 0.9085 1.0528 1.2345 1.1723
1.0339 1.1176 0.9807 0.9512 1.1707 1.1442 1.1524 0.8306 0.9318 1.2379 0.8131 1.0627 1.0924 0.9862
1.0997 1.1027 0.6175 1.1637 0.9745 0.9264 0.4931 0.8849 0.7800 0.8013 0.8506 0.9135 0.9878 1.0680
1.0064 1.0287 0.9909 0.6781 1.0763 0.7843 1.0464 0.9751 0.8988 1.1197 0.9374 1.0708 0.8007 0.8723
0.9796 0.9568 1.1243 1.0000 0.9355 1.0928 1.1176 1.1290 0.8650 1.1849 1.3380 0.6793 1.1572 1.0841
1.1508 0.7718 1.0951 1.3982 0.9583 1.1696 0.9941 1.0761 1.2196 1.1735 0.8442 1.0982 1.0216 0.6251
0.8161 0.9176 1.2193 0.9231 1.0687 0.7221 0.6908 0.9641 1.0974 1.0892 0.8156 1.1557 1.3133 1.1991
0.8523 0.6997 0.9348 0.7650 0.7411 0.8321 0.9295 1.0471 1.0331 0.9050 1.1550 1.5863 0.8431 1.0398
0.8091 0.8012 1.0664 1.2903 0.9761 1.0264 1.1217 0.8865 1.0209 1.0939 0.8736 0.7927 0.9609 1.1741
1.1898 0.8388 0.9238 0.7365 1.0841 1.2396 1.0211 0.8407 1.1525 0.9279 1.0709 0.9282 0.9573 0.7809
1.2582 0.9229 0.9027 1.1197 1.0964 0.9656 0.7746 1.1733 1.0643 1.0046 1.0090 1.2284 1.0244 0.8901
0.8946 0.8448 1.0043 1.2345 1.2322 0.9852 1.0793 1.0849 0.8012 1.0045 0.9406 0.9204 1.0948 1.3242
1.0045 0.9435 1.1055 0.9784 0.7817 0.8157 0.9900 1.0115 0.9143 0.8728 0.8938 0.9675 1.0908 1.1379
1.1331 1.0168 0.6626 1.1586 0.6002 1.2050 1.0443 1.0020 0.9892 0.9721 0.7743 0.6946 1.1237 1.1929
1.1761 0.9904 0.9721 1.1701 1.1881 1.1185 1.1928 0.6081 0.8738 1.0590 1.1150 0.5527 0.9929 1.0266
0.9357 0.7507 1.0473 1.0880 0.9317 1.1690 0.6982 0.8505 0.8901 0.9675 0.9164 0.6402 1.3280 1.2152
1.0422 0.9605 1.0122 0.8607 1.0186 0.9938 1.0692 0.9391 1.0696 0.9131 1.2396 0.9257 0.7898 0.9074
0.6738 1.1112 1.3539 1.0108 0.9065 1.0923 1.1491 0.8579 1.0866 1.1241 1.3428 0.6923 1.2782 1.0269
1.2181 0.8000 0.9686 0.7400 0.5626 1.1446 1.2144 1.0365 0.9692 1.0913 0.9622 1.2079 0.5601 1.1266
1.3791 1.1053 1.1473 1.0342 1.6485 0.4381 0.8542 1.0860 0.9172 1.1446 1.0879 1.1038 0.8031 1.2792
1.2373 0.5504 0.6477 1.2781 0.7268 1.0171 1.0833 0.9661 0.6750 0.7806 1.1002 0.8340 1.2166 0.2769
0.8039 0.6806 0.8754 1.0993 0.7247 0.7442 0.6642

Cronología Arstan

359 años 1660 = Año inicial

2.2965 0.9051 0.5180 0.9730 0.4831 0.4722 0.5978 1.1009 0.9087 0.4562 0.9622 0.9047 0.9519 2.0486
1.5539 1.1850 1.2036 0.5450 0.8346 1.2830 0.7503 0.8212 0.9752 0.7154 0.2320 0.8072 1.0122 0.9532
0.7973 1.0247 0.1608 0.4102 1.4786 1.7226 1.4122 0.2426 0.5751 1.1685 1.0374 1.0810 0.9714 0.8438
0.9468 0.7383 0.5996 0.6460 0.9495 0.6858 1.3310 1.1538 1.1511 0.8709 1.0846 0.7673 1.0228 0.8211
0.6518 1.0437 1.3635 1.1799 1.7336 1.5209 1.4510 0.9907 1.1059 0.7629 0.9401 0.9647 0.8987 1.0369
1.2299 1.2043 1.0803 1.1462 1.0063 0.9653 1.1669 1.1618 1.1878 0.8687 0.9325 1.2175 0.8341 1.0618
1.0850 1.0024 1.1078 1.1163 0.6418 1.1296 0.9581 0.9329 0.4809 0.8140 0.7096 0.7481 0.7927 0.8647
0.9520 1.0497 1.0082 1.0343 0.9959 0.6807 1.0361 0.7598 1.0197 0.9557 0.8951 1.1026 0.9406 1.0727
0.8044 0.8546 0.9436 0.9366 1.1112 1.0081 0.9466 1.0869 1.1236 1.1523 0.8952 1.1857 1.3517 0.7401
1.1567 1.0801 1.1751 0.8009 1.0862 1.3908 1.0149 1.2070 1.0213 1.0976 1.2337 1.2115 0.8918 1.1039
1.0247 0.6376 0.7731 0.8563 1.1807 0.9325 1.0767 0.7255 0.6635 0.8972 1.0540 1.0865 0.8313 1.1425
1.3157 1.2514 0.9124 0.7116 0.8909 0.7251 0.6969 0.7693 0.8731 1.0103 1.0229 0.9088 1.1457 1.5962
0.9307 1.0854 0.8135 0.7857 1.0227 1.2736 1.0123 1.0529 1.1294 0.9074 1.0211 1.0882 0.8865 0.7866
0.9239 1.1452 1.2010 0.8771 0.9268 0.7162 1.0420 1.2191 1.0522 0.8671 1.1407 0.9333 1.0754 0.9315
0.9556 0.7691 1.2254 0.9300 0.9145 1.1027 1.1015 0.9876 0.7822 1.1450 1.0626 1.0256 1.0179 1.2330
1.0551 0.9181 0.8894 0.8236 0.9723 1.2150 1.2565 1.0367 1.1072 1.1016 0.8237 0.9917 0.9235 0.9101
1.0767 1.3256 1.0520 0.9796 1.1077 0.9900 0.7903 0.7886 0.9445 0.9853 0.9074 0.8600 0.8679 0.9383
1.0711 1.1411 1.1572 1.0493 0.6830 1.1236 0.5868 1.1647 1.0273 1.0204 0.9942 0.9732 0.7704 0.6635
1.0609 1.1699 1.2028 1.0312 0.9944 1.1722 1.2091 1.1602 1.2318 0.6516 0.8514 1.0088 1.1026 0.5663
0.9481 0.9807 0.9285 0.7401 1.0084 1.0654 0.9407 1.1675 0.7137 0.8300 0.8429 0.9324 0.8937 0.6208
1.2710 1.2146 1.0936 0.9917 1.0197 0.8624 1.0032 0.9817 1.0672 0.9458 1.0690 0.9168 1.2355 0.9475
0.8047 0.8782 0.6408 1.0554 1.3281 1.0568 0.9434 1.0904 1.1552 0.8855 1.0864 1.1244 1.3662 0.7493
1.2803 1.0391 1.2485 0.8346 0.9705 0.7213 0.5251 1.0600 1.1787 1.0643 0.9935 1.0963 0.9736 1.2133
0.5843 1.0941 1.3531 1.1579 1.1991 1.0734 1.6757 0.5291 0.8569 1.0253 0.9073 1.1353 1.0963 1.1281
0.8278 1.2693 1.2552 0.6068 0.6218 1.1952 0.7168 0.9995 1.0575 0.9733 0.6769 0.7379 1.0381 0.8149
1.1970 0.2846 0.7325 0.5821 0.7989 1.0362 0.7109 0.7114 0.6019

8.2 ANEXO II

ÍNDICE DE ANCHO DE ANILLO REGIONAL

Madera, Chihuahua, México

Longitud de la cronología 1660 – 2018 (359 años)

Cronología Estándar

359 años 1660 = Año inicial

1.8132 2.2965 0.9051 1.1004 0.5562 0.3955 0.4744 1.1689 1.1093 0.5474 0.9453 0.8779 0.9039 2.0148
1.7149 1.3970 1.3697 0.6966 0.8549 1.2600 0.7917 0.7890 0.9198 0.6765 0.1493 0.6741 0.9143 0.9118
0.7568 1.0368 0.2207 0.3806 1.2730 1.6625 1.5073 0.5680 0.5697 1.1920 0.9814 0.9702 0.9458 0.7906
0.8748 0.6990 0.5245 0.4788 0.7470 0.5767 1.1952 1.1734 1.1729 0.8232 1.0975 0.8232 1.0261 0.7884
0.5940 0.8587 1.1880 1.3419 1.8403 1.7783 1.4381 1.1134 1.1290 0.8713 1.0668 0.9622 1.0658 1.0120
1.1699 1.2062 1.1507 1.2259 1.1195 1.0898 1.4095 1.5696 1.3513 1.0261 1.0222 1.2989 0.7827 1.0817
1.0767 0.9790 1.1266 1.2439 0.7026 1.1367 0.9946 0.8919 0.4542 0.7521 0.6308 0.6629 0.7102 0.7787
0.8561 0.9570 0.9335 0.9703 0.9523 0.6406 0.9642 0.6971 0.9542 0.9385 0.8218 1.0570 0.9255 1.0251
0.7760 0.7884 0.8850 0.8549 1.0472 0.9547 0.8975 1.0597 1.1364 1.1739 0.9044 1.1816 1.3701 0.8074
1.2005 1.1201 1.1908 0.8604 1.1096 1.4075 1.0477 1.2509 1.0696 1.1526 1.3146 1.2729 0.9322 1.1431
1.0505 0.6863 0.7672 0.8178 1.1232 0.9023 1.0368 0.7058 0.6307 0.8388 0.9866 1.0468 0.8315 1.1138
1.3212 1.2896 1.0116 0.7705 0.9121 0.7084 0.6529 0.7138 0.8176 0.9471 0.9671 0.8487 1.0980 1.5863
0.9535 1.1230 0.8338 0.7953 1.0204 1.2471 1.0449 1.0706 1.1421 0.9096 1.0371 1.1053 0.8796 0.7548
0.8635 1.0981 1.1630 0.8843 0.9191 0.7041 0.9955 1.1717 1.0462 0.8941 1.1660 0.9342 1.0856 0.9493
0.9711 0.7568 1.1861 0.8925 0.8943 1.0676 1.0810 0.9770 0.7746 1.1260 1.0753 1.0383 1.0053 1.2128
1.0980 0.9906 0.9543 0.8734 1.0161 1.2332 1.2767 1.1056 1.1511 1.1233 0.8697 1.0067 0.9226 0.9127
1.0487 1.2590 1.0537 0.9550 1.0738 0.9675 0.7872 0.7662 0.8949 0.9082 0.8476 0.8307 0.8044 0.8595
0.9867 1.0775 1.1268 1.0271 0.6679 1.0803 0.5434 1.1093 0.9911 0.9878 0.9544 0.9469 0.8046 0.7205
1.0532 1.1197 1.2083 1.0170 0.9726 1.1428 1.1629 1.1186 1.2222 0.7274 0.8931 0.9801 1.0811 0.5964
0.9585 0.9682 0.9085 0.7240 0.9832 1.0145 0.9199 1.1434 0.6983 0.7966 0.7527 0.8652 0.8268 0.5686
1.1233 1.0947 1.0222 0.9776 1.0007 0.8666 0.9496 0.9399 0.9441 0.9204 0.9944 0.9177 1.2105 0.9675
0.8500 0.9291 0.7733 1.0911 1.2597 1.0835 1.0077 1.0707 1.1348 0.9416 1.1060 1.0296 1.2060 0.8401
1.1908 1.0305 1.2035 0.8142 1.0073 0.8795 0.6064 1.0498 1.0741 0.9560 0.9716 1.0947 0.8337 1.1417
0.6290 0.9618 1.1651 1.0950 1.2706 1.2220 1.5080 0.6927 0.9797 1.1635 1.0260 1.1304 1.1340 1.1750
0.8592 1.2956 1.2858 0.8305 0.7230 1.1966 0.7103 1.0167 1.0463 1.0419 0.7114 0.8592 0.9441 0.9598
1.2182 0.4798 0.6109 0.4831 0.7876 1.0100 0.9372 0.9325 0.6953

Cronología Residual

357 años 1662 = Año inicial

0.4170 1.0377 0.5311 0.5363 0.7085 1.1977 0.9340 0.4579 1.0353 0.9595 0.9669 2.0632 1.4335 1.0221
1.1301 0.5035 0.8700 1.3447 0.7320 0.8248 1.0195 0.7350 0.2683 0.9503 1.1798 0.9804 0.8018 1.0532
0.1766 0.5079 1.6265 1.7204 1.2914 0.1279 0.6270 1.2816 1.0558 1.0610 0.9582 0.8383 0.9670 0.7590
0.6357 0.7179 1.0288 0.7247 1.3731 1.1435 1.1023 0.8377 1.0858 0.7691 1.0427 0.8399 0.6711 1.1017
1.3906 1.1322 1.6746 1.4162 1.3158 0.8878 1.0652 0.7511 0.9585 0.9938 0.9085 1.0523 1.2335 1.1733
1.0347 1.1177 0.9706 0.9494 1.1704 1.1456 1.1533 0.8309 0.9302 1.2369 0.8140 1.0608 1.0920 0.9867
1.0990 1.1026 0.6175 1.1616 0.9766 0.9261 0.4923 0.8818 0.7795 0.8008 0.8509 0.9133 0.9880 1.0687
1.0077 1.0290 0.9912 0.6783 1.0749 0.7856 1.0456 0.9757 0.8990 1.1192 0.9384 1.0704 0.8011 0.8711
0.9790 0.9577 1.1243 1.0004 0.9354 1.0926 1.1175 1.1299 0.8658 1.1844 1.3396 0.6812 1.1548 1.0852
1.1511 0.7726 1.0937 1.3988 0.9605 1.1686 0.9949 1.0759 1.2198 1.1743 0.8445 1.0968 1.0220 0.6248
0.8136 0.9167 1.2190 0.9245 1.0680 0.7224 0.6892 0.9626 1.0974 1.0898 0.8158 1.1546 1.3145 1.2008
0.8532 0.6992 0.9329 0.7648 0.7398 0.8310 0.9290 1.0470 1.0337 0.9055 1.1545 1.5873 0.8466 1.0381
0.8093 0.8000 1.0652 1.2908 0.9778 1.0259 1.1218 0.8872 1.0200 1.0941 0.8741 0.7919 0.9597 1.1740
1.1909 0.8397 0.9227 0.7364 1.0828 1.2405 1.0223 0.8406 1.1516 0.9289 1.0704 0.9287 0.9569 0.7808
1.2571 0.9244 0.9021 1.1192 1.0972 0.9660 0.7742 1.1675 1.0662 1.0017 0.9887 1.2096 1.0505 0.9090
0.9258 0.8712 1.0278 1.2305 1.2103 0.9792 1.0513 1.0677 0.8157 1.0065 0.9525 0.9344 1.0792 1.2671
1.0082 0.9075 1.0691 0.9742 0.7878 0.8253 0.9840 0.9931 0.9032 0.8933 0.8774 0.9376 1.0758 1.1146
1.1220 1.0105 0.6658 1.1545 0.6125 1.2088 1.0584 0.9935 0.9633 0.9734 0.8281 0.7659 1.1357 1.1670
1.1744 0.9585 0.9377 1.1479 1.1480 1.0739 1.1652 0.6769 0.8933 1.0427 1.1114 0.5990 1.0280 1.0432
0.9499 0.7643 1.0620 1.0655 0.9248 1.1682 0.6858 0.8417 0.8558 0.9816 0.9115 0.6502 1.2841 1.1761
1.0197 0.9627 1.0009 0.8776 0.9783 0.9871 0.9921 0.9526 1.0243 0.9463 1.2399 0.9657 0.8320 0.9791
0.8061 1.1488 1.2730 1.0397 0.9469 1.0603 1.1115 0.8970 1.0796 1.0082 1.2000 0.7866 1.1588 1.0214
1.1642 0.7764 0.9973 0.9027 0.6543 1.1396 1.1206 0.9509 0.9739 1.1067 0.8216 1.1631 0.6420 1.0028
1.2181 1.0583 1.2076 1.1111 1.3887 0.5481 0.9362 1.1966 0.9707 1.0821 1.0986 1.1075 0.7811 1.2799
1.2314 0.7196 0.6830 1.2610 0.7109 1.0592 1.0877 1.0180 0.6990 0.9122 1.0135 0.9920 1.2366 0.4054
0.7040 0.6843 0.9979 1.1613 1.0039 0.9698 0.7436

Cronología Arstan

359 años 1660 = Año inicial

2.2965 0.9051 0.5481 0.9768 0.4791 0.4755 0.5928 1.0948 0.9001 0.4571 0.9637 0.8961 0.9513 2.0464
1.5453 1.1975 1.2118 0.5488 0.8426 1.2778 0.7459 0.8268 0.9723 0.7130 0.2331 0.8331 1.0772 0.9708
0.8070 1.0284 0.1586 0.4169 1.4692 1.7092 1.4220 0.2527 0.5895 1.1539 1.0281 1.0810 0.9703 0.8438
0.9463 0.7359 0.6003 0.6443 0.9453 0.6797 1.3313 1.1455 1.1548 0.8709 1.0883 0.7649 1.0261 0.8171
0.6535 1.0429 1.3575 1.1769 1.7334 1.5176 1.4539 0.9952 1.1142 0.7633 0.9445 0.9617 0.8981 1.0367
1.2265 1.2027 1.0821 1.1490 0.9963 0.9653 1.1661 1.1604 1.1895 0.8696 0.9363 1.2155 0.8312 1.0655
1.0809 1.0030 1.1082 1.1151 0.6422 1.1341 0.9525 0.9354 0.4799 0.8165 0.7021 0.7474 0.7901 0.8622
0.9497 1.0480 1.0075 1.0351 0.9959 0.6817 1.0388 0.7551 1.0224 0.9515 0.8960 1.1023 0.9385 1.0747
0.8027 0.8572 0.9414 0.9355 1.1107 1.0057 0.9481 1.0874 1.1216 1.1530 0.8963 1.1895 1.3494 0.7411
1.1640 1.0753 1.1775 0.8007 1.0908 1.3872 1.0138 1.2125 1.0202 1.1014 1.2333 1.2115 0.8937 1.1080
1.0225 0.6392 0.7757 0.8521 1.1780 0.9282 1.0794 0.7234 0.6669 0.8951 1.0493 1.0838 0.8306 1.1448
1.3122 1.2516 0.9155 0.7172 0.8920 0.7218 0.6969 0.7666 0.8697 1.0069 1.0202 0.9086 1.1465 1.5937
0.9291 1.0950 0.8122 0.7894 1.0211 1.2701 1.0104 1.0566 1.1293 0.9078 1.0239 1.0867 0.8865 0.7887
0.9236 1.1423 1.1985 0.8775 0.9307 0.7153 1.0433 1.2143 1.0511 0.8697 1.1426 0.9306 1.0782 0.9299
0.9576 0.7684 1.2266 0.9244 0.9184 1.1018 1.0997 0.9883 0.7838 1.1420 1.0584 1.0237 0.9977 1.2119
1.0740 0.9405 0.9273 0.8566 1.0038 1.2152 1.2348 1.0290 1.0802 1.0798 0.8334 0.9966 0.9339 0.9267
1.0638 1.2662 1.0450 0.9416 1.0675 0.9754 0.7924 0.7993 0.9388 0.9643 0.8926 0.8774 0.8519 0.9076
1.0492 1.1100 1.1396 1.0381 0.6853 1.1235 0.5919 1.1766 1.0335 1.0166 0.9689 0.9718 0.8216 0.7429
1.0874 1.1487 1.2006 0.9973 0.9593 1.1430 1.1596 1.1074 1.1946 0.7104 0.8822 0.9978 1.0983 0.6097
0.9951 1.0000 0.9494 0.7587 1.0294 1.0424 0.9328 1.1653 0.6970 0.8259 0.8032 0.9406 0.8833 0.6307
1.2300 1.1614 1.0629 0.9873 1.0064 0.8770 0.9652 0.9698 0.9849 0.9476 1.0168 0.9424 1.2353 0.9857
0.8562 0.9614 0.7860 1.1207 1.2632 1.0823 0.9849 1.0676 1.1174 0.9175 1.0832 1.0085 1.2100 0.8110
1.1606 1.0187 1.1838 0.7990 0.9949 0.8802 0.6403 1.0863 1.0910 0.9705 0.9806 1.1013 0.8308 1.1553
0.6408 0.9796 1.1765 1.0759 1.2354 1.1457 1.4307 0.6122 0.9399 1.1475 0.9807 1.0961 1.1073 1.1300
0.8074 1.2725 1.2408 0.7763 0.6843 1.2012 0.6989 1.0475 1.0601 1.0299 0.7089 0.8828 0.9686 0.9757
1.2304 0.4286 0.6653 0.5843 0.9148 1.1063 1.0065 0.9821 0.7423