



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**ANÁLISIS
DENDROCRONOLÓGICO E
INFLUENCIA CLIMÁTICA EN EL
CRECIMIENTO DE TRES
ESPECIES DE OYAMEL EN
OAXACA, MÉXICO**

MARTÍN AQUINO RAMÍREZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Martín Aquino Ramírez, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Alejandro Velázquez Martínez, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Análisis dendrocronológico e influencia climática en el crecimiento de tres especies de oyamel en Oaxaca, México

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 31 de Enero de 2019



Firma del
Alumno (a)



Dr. Alejandro Velázquez Martínez
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO E INFLUENCIA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO DE TRES ESPECIES DE OYAMEL EN OAXACA, MÉXICO**, realizada por el alumno **MARTÍN AQUINO RAMÍREZ**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



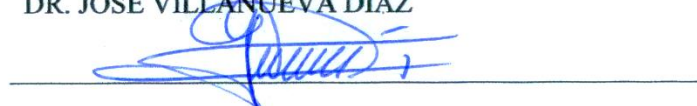
DR. ALEJANDRO VELÁZQUEZ MARTÍNEZ

ASESOR



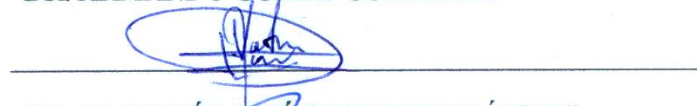
DR. JOSÉ VILLANUEVA DÍAZ

ASESOR



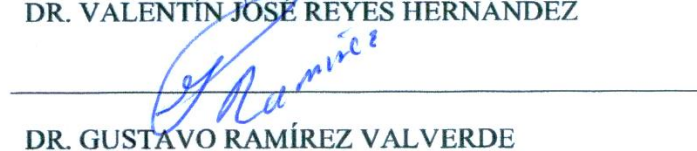
DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO

ASESOR



DR. VALENTÍN JOSÉ REYES HERNÁNDEZ

ASESOR



DR. GUSTAVO RAMÍREZ VALVERDE

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero 2019.

ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO E INFLUENCIA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO DE TRES ESPECIES DE OYAMEL EN OAXACA, MÉXICO

**Martín Aquino Ramírez, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2019**

RESUMEN

Los anillos de los árboles son una fuente indirecta que provee información retrospectiva de la respuesta del crecimiento de los bosques a los cambios climáticos. El análisis y comprensión de las relaciones entre el clima y el crecimiento de los árboles permitirá evaluar su respuesta ante los efectos del cambio climático global para su conservación y manejo, y para producir estimaciones cuantitativas de la variabilidad climática a diferentes escalas espaciales y temporales. Se consideraron tres especies de oyamel nativas de Oaxaca, México, con el objetivo de analizar su potencial dendrocronológico y la influencia climática en el crecimiento radial. La estructura de este documento se realizó en capítulos, tres de ellos son casos de estudio y fueron escritos en formato de manuscrito científico.

Primer caso de estudio (capítulo I), se determinó el potencial dendrocronológico y la respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Se desarrollaron cronologías de madera temprana, madera tardía y de anillo total de 206 años (1810-2015). El crecimiento total del anillo estuvo limitado principalmente por la precipitación de invierno-primavera y por la temperatura máxima de primavera del año actual de crecimiento. En cambio, la cronología de la madera temprana sólo estuvo relacionado negativamente con la temperatura de noviembre del año previo, y la cronología de madera tardía con la temperatura máxima del mes de agosto del año en curso. Con las series de anillo total se reconstruyó la precipitación acumulada de febrero a abril, de los últimos 136 años (1880-2015), la cual mostró una periodicidad cuasi-cíclica de 2.2 y 3.8 años indicando una asociación con la variabilidad del El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). Las variaciones en el grosor de los anillos de los árboles de *A. guatemalensis* registran señales climáticas locales y regionales, por lo que son potencialmente una fuente indirecta para reconstrucciones climáticas, lo que permitirá extender en el tiempo los registros instrumentales para análisis más amplios de fluctuaciones en el clima y sus tendencias en esta región del país.

Segundo caso de estudio (capítulo II) se desarrolló una cronología de ancho de anillo de *Abies religiosa* (Kunth) Schlt. & Cham. en la Sierra Juárez de Oaxaca, México, que abarcó un período de 296 años (1720-2015). El análisis de correlación mostró una asociación positiva del crecimiento radial con la precipitación de invierno-primavera y una asociación negativa significativa con la temperatura máxima de primavera del año en curso, expresando que la disponibilidad de agua en primavera es el principal controlador de la variabilidad del crecimiento anual. Asimismo, se obtuvieron correlaciones negativas con el Índice Multivariado del ENSO (MEI) y el Índice Oscilación del Sur (SOI) durante invierno-primavera, lo que indica una teleconexión con el crecimiento de los árboles de esta región, particularmente durante los eventos El Niño. Los resultados obtenidos permitirán una mejor comprensión de la respuesta de los bosques de *A. religiosa* a la variabilidad climática del pasado en relación con futuros escenarios de cambio climático. La sensibilidad climática registrada en los anillos expresa su potencial para reconstruir las variaciones climáticas de baja y alta frecuencia en los bosques de alta montaña en esta región del país.

Tercer caso de estudio (capítulo III), se demostró la datación cruzada anual de los anillos de *Abies hickelii* Flou & Gausson y se desarrolló una cronología de 205 años (1811-2015) en la Sierra Sur de Oaxaca, México. La variabilidad de ancho de anillo se correlacionó positivamente con la precipitación de invierno-primavera y negativamente con la temperatura mínima de invierno. Asimismo, los modos a gran escala de la variabilidad climática como el índice Niño 3.4 e índice multivariado del ENSO durante los meses verano-invierno mostraron una teleconexión con las variaciones en el crecimiento de los árboles, particularmente en eventos El Niño con una disminución en crecimiento de los anillos. Los resultados obtenidos mejoraran la comprensión de cómo la variabilidad del clima puede afectar el crecimiento radial, así mismo, demuestran la importancia de esta especie para reconstruir las variaciones climáticas en los bosques nativos de alta montaña en la región sur de México.

Palabras clave: *Abies*, crecimiento radial, ENSO, sensibilidad climática, relaciones clima-crecimiento.

DENDROCRONOLOGICAL ANALYSIS AND CLIMATIC INFLUENCE ON THE GROWTH OF THREE SPECIES OF FIR IN OAXACA, MEXICO

**Martín Aquino Ramírez, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2019**

ABSTRACT

Tree-rings are an indirect source that provides retrospective information on the response of forest growth to climate change. The analysis and understanding of the relationships between climate and tree growth will help evaluate their response to the effects of global climate change for their conservation and management, and to produce quantitative estimates of climate variability at different spatial and temporal scales. Three fir species from Oaxaca, Mexico, were selected with the aim of analyzing their dendrochronological potential and the climatic influence on radial growth. This document was structured in chapters, three of them correspond to case studies and were written in scientific manuscript format.

First case study (chapter I), the dendrochronological potential and climatic response of *Abies guatemalensis* Rehder in Ixtlán de Juárez, Oaxaca is determined. Chronologies of earlywood, latewood and total ring of 206 years (1810-2015) were developed. The total growth of the ring was limited mainly by the winter-spring precipitation and by the maximum spring temperature of the current year of growth. In contrast, the chronology of the earlywood was significantly negatively correlated with temperature of November of the previous year, and the chronology of late wood with maximum temperature of August of the current year. With the series of total ring the accumulated precipitation from February to April of the last 136 years (1880-2015) was reconstructed, which showed a quasi-cyclical periodicity of 2.2 and 3.8 years indicating an association with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO). The variations in the thickness of the rings of the trees of *A. guatemalensis* register local and regional climatic signals, reason why they are potentially an indirect source for climatic reconstructions, this will extend in time the instrumental records for broader analyzes of fluctuations in climate and trends in this region of the country.

Second case study (chapter II) a ring-width chronology of *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham. was developed in the Sierra Juárez of Oaxaca, Mexico, spanning the 296-years

period 1720-2015. The correlation analysis showed a positive association of radial growth with winter-spring precipitation and a significant negative association with the maximum spring temperature of the current year, stating that the water availability in spring is the main driver of the variability of the annual growth. Likewise, negative correlations were obtained with Multivariate ENSO Index (MEI) and Southern Oscillation Index (SOI) during winter-spring, which indicates a teleconnection with the growth of trees in this region, particularly during El Niño events. The results obtained will allow a better understanding of the response of *A. religiosa* forests to the climatic variability of the past in relation to future climate change scenarios. The climatic sensitivity registered in the rings expresses its potential to reconstruct the low and high frequency climatic variations in high mountain forests in this region of the country.

Third case study (chapter III), the annual cross dating of the *Abies hickelii* Flous & Gausson rings was demonstrated and a 205-year chronology (1811-2015) was developed in the Sierra Sur of Oaxaca, Mexico. Ring width variability was positively correlated with winter-spring precipitation and negatively with minimum winter temperature. Also, the large-scale modes of climate variability such as Niño 3.4 index and Multivariate ENSO Index during the summer-winter months showed a teleconnection with the variations in tree growth, particularly in El Niño events with a decrease in growth of the rings. The results obtained will improve the understanding of how climate variability can affect radial growth, likewise, demonstrate the importance of this species to reconstruct the climatic variations in native high mountain forests in the southern region of Mexico.

Keywords: Climate-growth relationships, climate sensitivity, ENSO, fir, radial growth.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para mis estudios de Doctorado.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS) por la oportunidad de seguir estudiando en esta excelente institución académica, y en especialmente al programa **Forestal**, por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente.

Agradezco profundamente el apoyo que se me brindó de manera incondicional por parte de los miembros de mi Consejo Particular en mi formación doctoral:

Dr. Alejandro Velázquez Martínez por su amistad brindada y toda la confianza depositada en mí, la motivación y su disposición, así como el gran apoyo en la elaboración y dirección de esta investigación, además de su infinita paciencia mostrada conmigo.

Dr. José Villanueva Díaz por permitirme incursionar en la ciencia de la Dendrocronología, y por el apoyo brindado en el Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA INIFAP en Gómez Palacio, Durango para el procesamiento de las muestras. Así como su gran disposición para la revisión de este trabajo y las valiosas sugerencias.

A los Dres.: *Dr. Armando Gómez Guerrero, Dr. Valentín Reyes Hernández, Dr. Gustavo Ramírez Valverde y Dr. Javier López Upton*, por la confianza depositada en mí, por su disposición, enseñanzas y sugerencias para mejorar sustancialmente este trabajo de investigación.

Se agradece las facilidades otorgadas para la obtención de muestras de oyamel por las autoridades del Comisariado de Bienes Comunales de San Juan Bautista Jayacatlán, San Miguel Aloápam, Ixtlán de Juárez, San Juan Ozolotepec, San Pedro Leapi Yautepec y San Juan Atepec Llano de Flores en el estado de Oaxaca, México.

A mis amigos de Oax por su aliento a continuar estudiando: **Wenceslao, Elizabeth, Elias, Celia**, sin olvidar a los amigos del CP: **Lisette Hervert, Rolando Tlaxcala, Reynol, Berenice y Arturo**, por su incondicional amistad.

DEDICATORIA

“El simple hecho que no puedas ver algo, no significa que no existe”

Dedico esta tesis a mi familia, especialmente a mi madre **Margarita Ramírez López** por sus consejos, amor y confianza, y a mi padre **Martín Aquino Santiago** por enseñarme sentido de compromiso conmigo mismo, a los dos por su incondicional apoyo.

A mis hermanos: **Reyna alhelí** y **Ángel** por su cariño, confianza y el apoyo brindado durante mi formación profesional.

A **lissette** por su apoyo en esta etapa, excelente compañera de vida, por los momentos de incertidumbre y difíciles que vivimos en esta etapa.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE CUADROS	xvii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVOS	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
HIPÓTESIS	7
Literatura Citada	8
CAPÍTULO I. RESPUESTA CLIMÁTICA DE <i>Abies guatemalensis</i> REHDER EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO	12
1.1 Resumen	12
1.2 Abstract	13
1.4 Objetivos	16
1.5 Materiales y métodos	16
1.5.1 Área de estudio	16
1.5.2 Muestreo	17
1.5.3 Estandarización y desarrollo de la cronología	18
1.5.3 Datos climáticos	19
1.5.4 Análisis estadístico	20
1.6 Resultados	23
1.6.1 Cronología	23
1.6.2 Respuesta climática	24
1.6.3 Reconstrucción de la precipitación	28
1.6.4 Variabilidad de la precipitación reconstruida	30
1.6.5 Influencia de fenómenos circulatorios	33
1.7 Discusión	34
1.8 Conclusiones	39
1.10 Literatura Citada	39
CAPÍTULO II. INFLUENCIA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO DE <i>Abies religiosa</i> EN LA SIERRA JUÁREZ DE OAXACA, MÉXICO	45
2.1 Resumen	45

2.2 Summary	46
2.3 Introducción	47
2.4 Materiales y métodos	49
2.4.1 Sitios de muestreo.....	49
2.4.2 Muestreo de árboles	53
2.4.3 Procesamiento de las muestras	54
2.4.4 Estandarización y desarrollo de la cronología	57
2.4.5 Datos climáticos.....	58
2.4.6 Relación entre crecimiento del árbol y clima	59
2.4.7 Relación entre el crecimiento del árbol y los modos a gran escala de la variabilidad climática.....	60
2.5 Resultados	61
2.5.1 Características del crecimiento del árbol y la cronología	61
2.5.2 Relación clima-crecimiento radial	63
2.5.3 Relación de los modos a gran escala de la variabilidad climática	71
2.7 Conclusiones	80
2.8 Literatura Citada.....	81
CAPÍTULO III. RESPUESTA CLIMÁTICA DEL ANCHO DE ANILLO DE <i>Abies</i> <i>hickelii</i> EN LA SIERRA SUR DE OAXACA, MÉXICO	89
3.1 Resumen	89
3.2 Summary	90
3.2 Introducción	91
3.3 Materiales y Métodos	93
3.3.1 Área de estudio	93
3.3.2 Desarrollo de la cronología.....	97
3.3.3 Datos climáticos.....	99
3.3.4 Análisis estadísticos.....	100
3.3.5 Modos a gran escala de la variabilidad climática	101
3.4 Resultados y discusión	102
3.5 Conclusiones	112
3.6 Literatura Citada.....	112
CONCLUSIONES GENERALES	118

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. 1. Localización geográfica del área de estudio y las estaciones meteorológicas más cercanas.	17
Figura 1. 2. Registros promedios mensuales de precipitación (Prec), temperatura máxima (T _{máx}), temperatura promedio (T _{prom}) y temperatura mínima (T _{mín}) del período 1952-2010, para las estaciones meteorológicas Ixtlán de Juárez y Guelatao, Oaxaca.	20
Figura 1. 3. Cronología residual de anillo total (RWI) de <i>Abies guatemalensis</i> (línea continua) y tamaño de muestra (línea punteada). La línea en color azul indica la fecha a partir de donde la cronología rebasa el valor de EPS de 0.85.	24
Figura 1. 4. Coeficientes de correlación entre la cronología de anillo total versión residual (a), madera temprana versión residual (b) y madera tardía versión estándar (c) con la precipitación promedio, la temperatura promedio y la temperatura máxima, para el período 1952-2010. Las líneas horizontales discontinuas indican los niveles de confianza al 95 y 99%. Las letras a-d en el eje horizontal representa los meses de agosto a diciembre del año previo y E-S los meses de enero a septiembre del año actual de crecimiento; F-A: febrero-abril, M-A: marzo-abril.	26
Figura 1. 5. Comparación entre los valores observados y valores reconstruidos de la precipitación acumulada de febrero-abril (P _{FMA}) para el período 1952-2010, en Ixtlán de Juárez Oaxaca.	29
Figura 1. 6. Reconstrucción de la P _{MFA} en los últimos 136 años (1880-2015), en Ixtlán de Juárez Oaxaca. Las líneas horizontales punteadas representan los umbrales para establecer los años secos y húmedos extremos, de acuerdo con la metodología propuesta por Sun et al. (2018).	31
Figura 1. 7. Mapas de sequías generados con el Atlas de sequía para México (MXDA) (Stahle et al., 2016). Condiciones de sequías en el sur de México y su coincidencia con los años más extremos de las sequías reconstruidas con <i>Abies guatemalensis</i> en Ixtlán de Juárez Oaxaca. Los valores -6 (color rojo) y 6 (color azul) en la escala PDSI indican condiciones de sequía extrema y humedad extrema. La estrella negra en los mapas muestra el área de estudio.	32
Figura 1. 8. Densidad espectral para la reconstrucción de la P _{MFA} (1880-2015) en la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.	33

CAPÍTULO II

- Figura 2. 1. Región de estudio que muestra los sitios de muestreo de *Abies religiosa*, estaciones meteorológicas y puntos de cuadrícula de la unidad de investigación climática (CRU) en la Sierra Juárez de Oaxaca, región sur de México. 52
- Figura 2. 2. Diagrama climático del área de estudio para el período de 1956-2013. Se muestran la temperatura (máxima, promedio, mínima) y la precipitación mensual. Los registros climáticos fueron promediados de las estaciones Atepec, Estudiante, Ixtlán y Telixtlahuaca. Las barras muestran la desviación estándar. 53
- Figura 2. 3. Sitios de muestro para la obtención de núcleos de crecimiento de *Abies religiosa* en la Sierra Juárez de Oaxaca, México. a) San Juan Bautista Jayacatlán, b) San Miguel Aloápam y c) San Juan Atepec Llano de Flores. 55
- Figura 2. 4. Cronología residual de ancho de anillo de *Abies religiosa* en la Sierra Juárez de Oaxaca, México con un a) filtrado de paso bajo (15 años), b) número de núcleos de árboles utilizados para desarrollar la cronología y c) valores de EPS y R-bar en ventanas móviles de 30 años con una superposición de 15 años. 62
- Figura 2. 5. Coeficientes de correlación entre la cronología de anillo total de *A. religiosa* con las variables climáticas mensuales: a) precipitación, b) temperatura mínima, c) temperatura media, d) temperatura máxima; y los índices de sequía: e) scPDSI y f) SPEI. Las correlaciones se realizaron en una ventana que se extiende desde septiembre del año previo hasta octubre del año actual de crecimiento. Las correlaciones significativas ($p < 0.05$) se indican en las barras oscuras. 66
- Figura 2. 6. Correlaciones estacionales (2, 3, 6 y 12 meses) entre la cronología de ancho de anillo del árbol de *Abies religiosa* y variables climáticas: a) precipitación, b) temperatura mínima, c) temperatura media, d) temperatura máxima; y los índices de sequía: e) scPDSI y f) SPEI. Las correlaciones se realizaron en una ventana que se extiende desde septiembre del año previo hasta octubre del año actual de crecimiento. Las correlaciones significativas ($p < 0.05$) se indican en barras oscuras. 67
- Figura 2. 7. Análisis de correlación móvil entre la cronología de ancho de anillo con: a) precipitación, b) temperatura mínima, c) temperatura promedio, d) máxima temperatura, e) scPDSI y f) SPEI de septiembre previo año a octubre del año actual. La correlación móvil se llevó acabo en ventanas de 25 años, compensación de 1 año, y las correlaciones significativas ($p < 0.05$) se indican con puntos negros. 69
- Figura 2. 8. Sincronía entre a) el crecimiento radial de *Abies religiosa* y las anomalías de b) precipitación, c) temperatura y d) SPEI (abril-mayo). El área sombreada representa los años con mayor sincronía. 70
- Figura 2. 9. Correlación espacial entre cronología residual de *Abies religiosa* y a) el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) (calculado a escala de un mes)

de abril a mayo para el período de 1960-2013. Asimismo, la estrella negra en (a) indica el área de estudio. El análisis fue realizado por KNMI Climate Explorer (The Royal Netherlands Meteorological Institute, <http://climexp.knmi.nl/>). La barra de colores horizontal representa la escala de los coeficientes de correlación. Las áreas coloreadas en los mapas representan las zonas que son estadísticamente significativas ($p < 0.10$). 71

Figura 2. 10. Comparación entre la cronología residual de *Abies religiosa* y a) SOI de febrero-abril (1880-2015); b) MEI de febrero-abril (1950-2015); c) PDO de febrero (1900-2015) y d) AMO de julio-agosto (1880-2015). 73

Figura 2. 11. Correlación espacial entre cronología residual de *Abies religiosa* y a) temperatura de la superficie del mar (SST) (HadISST 1 reconstrucción $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$) de enero a marzo; b) temperatura de la superficie del mar (SST) (HadISST 1 reconstrucción $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$) de julio a septiembre. La barra de colores horizontal representa la escala de los coeficientes de correlación. Las áreas coloreadas en los mapas representan las zonas que son estadísticamente significativas ($p < 0.10$). La región Niño 3.4 está indicada por un rectángulo negro. Asimismo, la estrella negra en indica el área de estudio. El análisis fue realizado en el KNMI Climate Explorer (The Royal Netherlands Meteorological Institute, <http://climexp.knmi.nl/>). 74

CAPÍTULO III

Figura 3. 1. Región de estudio que muestras los sitios de muestreo para extraer núcleos de crecimiento de *Abies hickelii*, estaciones meteorológicas y puntos de cuadrícula de la unidad de investigación climática (CRU) en la Sierra Sur de Oaxaca, región sur de México. 95

Figura 3. 2. Ubicación de los sitios para obtención de muestras de anillos de árboles de *Abies hickelii* en la Sierra Sur de Oaxaca, México. (a) San Pedro Leapi y (b) San Juan Ozolotepec. 96

Figura 3. 3. Diagrama climático del área de estudio. (a) Distribución de la precipitación y (b) temperatura mínima, promedio y máxima durante el período de referencia 1961-2011. 97

Figura 3. 4. a) Series de crecimiento de ancho de anillo promedio de *Abies hickelii* en el sur de México. b) cronología residual de anillo total, c) número de radios utilizados y d) estadísticos EPS y Rbar en ventanas móviles de 30 años y superposición de 15 años. 103

Figura 3. 5. Coeficientes de correlación entre variables climáticas locales y regionales (CRU TS4) con la cronología de ancho de anillo de *Abies hickelii* para el período de 1961-2010 en la Sierra Sur de Oaxaca, México. Las letras en minúsculas indican los meses del año previo y las letras mayúsculas indican los meses del actual año. Los asteriscos muestran coeficientes de correlación significativos ($p < 0.05$). 105

Figura 3. 6. Correlaciones entre las series de crecimiento radial de *Abies hickelii* y a) precipitación, b) temperatura máxima, c) temperatura mínima y d) temperatura promedio. 106

Figura 3. 7. Comparación entre la cronología residual de *Abies hickelii* y a) índice Niño 3.4 de agosto-diciembre (1857-2015); b) MEI de septiembre (1950-2015); c) PDO de agosto (1900-2015) y d) AMO agosto (1880-2015). 109

Figura 3. 8. Correlación espacial entre cronología residual de *Abies hickelii* y la temperatura de la superficie del mar (SST) (HadISST 1 reconstrucción 1.0°×1.0°) de agosto-diciembre previo año (1870-2015). Las áreas coloreadas en los mapas representan las zonas que son estadísticamente significativas ($p < 0.10$). La región Niño 3.4 está indicada por un rectángulo negro. Así mismo la estrella negra indica el área de estudio. El análisis fue realizado por KNMI Climate Explorer (The Royal Netherlands Meteorological Institute, <http://climexp.knmi.nl/>). 110

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO I

Cuadro 1. 1. Respuesta climática entre los índices de madera temprana, tardía y de anillo total y las variables climáticas del período 1952-2010.....	27
Cuadro 1. 2. Estadísticos para la calibración y verificación del modelo utilizado para la reconstrucción de la P _{FMA} en el período de 1952-2010.....	29
Cuadro 1. 3. Asociación entre las cronologías de <i>Abies guatemalensis</i> en Ixtlán de Juárez Oaxaca y los diferentes índices de fenómenos de circulación global.....	34

CAPÍTULO II

Cuadro 2. 1. Localización geográfica y características de los sitios de muestreo de <i>Abies religiosa</i> y de las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis dendroclimático en la Sierra Juárez de Oaxaca, México.	56
Cuadro 2. 2. Estadísticos de la cronología residual de ancho de anillo de <i>Abies religiosa</i> en la Sierra Juárez de Oaxaca, México.....	63

CAPÍTULO III

Cuadro 3. 1. Localización y descripción de los sitios de los muestreos de <i>Abies hickelii</i> en la Sierra Sur de Oaxaca, México.	99
Cuadro 3. 2. Información de las estaciones meteorológicas utilizadas para los análisis de correlación.	100

INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio climático, en las últimas décadas ha afectado las características de la vegetación en todo el mundo debido a las actividades humanas (Parmesan 2006; Krishnaswamy *et al.*, 2013), y se espera continúen acelerándose con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico (IPCC, 2014). Los principales efectos del cambio climático en los ecosistemas forestales, incluyen mayor potencial de cambio en la distribución y composición de especies forestales, crecimiento y productividad, estructura del bosque y distribución por clase de edad, reducción en la biodiversidad y capacidad de adaptación de los ecosistemas a través diferentes escalas (desde comunidades hasta el planeta), así como también, la disponibilidad de los servicios ecosistémicos de los que depende la humanidad (Hanewinkel *et al.*, 2013; Buizer *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2014; Thom y Seidl, 2016; Wan *et al.*, 2017). La afectación a los ecosistemas forestales por el cambio climático es a través de los cambios en la temperatura y la precipitación, aumento en la frecuencia, duración y severidad de eventos climáticos extremos, además de disturbios provocados por incendios forestales, tormentas, ciclones y huracanes (Price *et al.*, 2013; García *et al.*, 2014; Peterson *et al.*, 2014; Halofsky *et al.*, 2018).

En los últimos años, la investigación ambiental se ha centrado cada vez más en cuantificar y pronosticar los impactos del cambio climático en los ecosistemas forestales, por lo que la demanda de información a gran escala y a largo plazo sobre el crecimiento de árboles y el clima, más allá de la disponibilidad de los datos instrumentales está aumentando rápidamente (Babst *et al.*, 2018). Los árboles, como organismos de vida larga, registran información ecológicamente relevante en sus anillos anuales y, por lo tanto, son

archivos naturales indirectos para el estudio de los cambios globales durante los últimos siglos o incluso milenios (Trouet *et al.*, 2009; Fonti *et al.*, 2010; Zhang, 2015).

El crecimiento radial de los árboles durante el proceso de formación de madera es altamente sensible a las condiciones cambiantes del hábitat, especialmente los factores climáticos (Zhang *et al.*, 2012). El ancho de anillo del árbol como indicador del crecimiento radial de los árboles, ha demostrado estar fuertemente influenciado por las condiciones ambientales, especialmente cuando la temperatura o la precipitación, limitan el crecimiento del árbol (Wang *et al.*, 2013). La medición de los patrones de crecimiento secundario son el principal recurso para proporcionar información retrospectiva sobre el crecimiento de árboles en diferentes gradientes ambientales y en escalas de tiempo (Babst *et al.*, 2018). El análisis de los anillos de los árboles mediante enfoques dendrocronológicos ha sido utilizado no sólo para evaluar la relación del crecimiento radial con el clima (Zhang *et al.*, 2012; Sohar *et al.*, 2017), sino también para reconstruir la variabilidad del crecimiento a largo plazo de las especies de árboles y la variabilidad de las condiciones climáticas (Vlam *et al.*, 2014; Henderson y Grissino-Mayer, 2009; Ngoma *et al.*, 2017), teleconexiones con las temperaturas de la superficie del mar (Brienen *et al.*, 2010; Patskoski, 2015), así como con fenómenos climáticos globales como el Niño Oscilación del Sur (ENSO, Schöngart *et al.*, 2006). Por lo tanto, una mejor comprensión de la respuesta del crecimiento forestal a la variabilidad climática del pasado y al cambio climático pronosticado es un requisito necesario para mantener un bosque productivo y sostenible (Lindner *et al.*, 2010).

A pesar de la importancia de la comprensión de las relaciones entre el crecimiento de los árboles y el clima, los estudios dendroclimáticos en México sólo se han realizado en las regiones del norte-centro, mientras que en la región sur es limitado. La Sierra Sur y la Sierra Juárez de Oaxaca son consideradas como los sistemas montañosos más diversos en

el sur de México, debido a su compleja fisiografía que forma una gran variedad de microambientes (Arriaga *et al.*, 2000). Estos sistemas montañosos presentan diferentes tipos de vegetación, sobresaliendo los bosques de pino-encino y el bosque mesófilo de montaña, que registran tasas altas de biodiversidad (García-Mendoza *et al.*, 2004; Meave *et al.*, 2006; Ponce-Reyes *et al.*, 2012). En las laderas y cañadas, se encuentran pequeñas poblaciones aisladas y restringidas de especies nativas del género *Abies*. Estos bosques son considerados de importancia ecológica y económica, ya que son proveedores de madera, leña, árboles de ornato, protección de cuencas hidrográficas y hábitat para la vida silvestre (Malhi *et al.*, 2014).

En la región de la Sierra Juárez es posible encontrar poblaciones de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. y *Abies guatemalensis* Rehder, mientras que algunos rodales dispersos de *Abies hickelii* Flous & Gausson, se localizan en las altas montañas fragmentadas y aisladas en la Sierra Sur de Oaxaca. *A. guatemalensis* y *A. hickelii* son especies que de acuerdo con la norma ecológica mexicana NOM-059 SEMARNAT 2010 y a la Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN (The International Union for Conservation of Nature, por sus siglas en inglés), están catalogadas como en peligro de extinción (Norma Oficial Mexicana, 2010; Farjon, 2013; Sørensen *et al.*, 2013). Dadas las preocupaciones contemporáneas bajo escenarios del cambio climático futuro, la comprensión de las respuestas de estas especies a las condiciones ambientales en el pasado, representa una fuente importante de información para poder establecer estrategias de conservación y manejo de estos bosques en respuesta a los diferentes escenarios futuros.

En presente estudio se muestra en tres casos de estudio (Capítulos I, II, III), en el que se analizó la relación entre el crecimiento de los árboles de tres especies de oyamel y el clima, empleando técnicas dendrocronológicas en dos sistemas de alta montaña del estado de

Oaxaca, México. En el capítulo I, se identificó un sitio de *A. guatemalensis* en Ixtlán de Juárez, Oaxaca para analizar su potencial dendroclimático, lo que permitió reconstruir la variabilidad de la precipitación acumulada de febrero a abril de los últimos 136 años (1880-2015). La reconstrucción mostró una periodicidad cuasi-cíclica de 2.2 y 3.8 años indicando una asociación con la variabilidad de ENSO. La información obtenida de la reconstrucción permitirá extender en el tiempo los registros instrumentales y comprender mejor la variabilidad climática local. El capítulo II, tres sitios de *A. religiosa* en la Sierra Juárez de Oaxaca fueron seleccionados para desarrollar la primera cronología de ancho de anillo de 296 años de extensión (1720-2015) en la región. Los análisis de correlación mostraron que la variabilidad del crecimiento de esta especie está influenciada principalmente por la precipitación de invierno-primavera y temperatura máxima de primavera de año en curso. Igualmente, se obtuvieron correlaciones negativas con el Índice Multivariado del ENSO (MEI) y el Índice de Oscilación del Sur (SOI) durante invierno-primavera, lo que indica una teleconexión con el crecimiento de los árboles de esta región, particularmente durante eventos cálidos El Niño. La información obtenida, permitirá una mejor comprensión de la respuesta de los bosques de *A. religiosa* a la variabilidad climática del pasado, en relación con futuros escenarios de cambio climático, así como también permitirá reconstruir las variaciones climáticas en los bosques de alta montaña en esta región del país. El capítulo III, dos sitios de *A. hickelii* fueron seleccionados en la Sierra Sur de Oaxaca para analizar su potencial dendrocronológico. La primera cronología de ancho de anillo de 205 años (1811-2015) fue desarrollada en esta región. Los índices de ancho de anillo mostraron una correlación positiva con la precipitación de invierno-primavera y una correlación negativa con la temperatura mínima de invierno. Asimismo, los modos a gran escala de la variabilidad climática como la temperatura de la superficie del mar (SST) y los índices del

Niño 3.4 e Índice Multivariado del ENSO durante los meses verano-invierno mostraron una teleconexión con las variaciones en el crecimiento de los árboles. La información resultante, permitirá establecer estrategias de conservación y manejo de estos bosques en peligro de extinción, en respuesta a diferentes escenarios futuros de cambio climático. Finalmente, se presentan los resultados de esta investigación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la relación entre crecimiento radial y la variabilidad climática en tres especies de oyamel en los bosques de alta montaña de Oaxaca, México.

Objetivos específicos

- a) Desarrollar cronologías de anillo total de *Abies guatemalensis* Rehder y *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. & Cham., en la Sierra Juárez de Oaxaca.
- b) Desarrollar una cronología de anillo total de *Abies hickelii* Flous & Gausson en la Sierra Sur de Oaxaca.
- c) Determinar los principales factores climáticos que afectan la variación del crecimiento del ancho de anillo de *A. guatemalensis*, *A. religiosa* y *A. hickelii*.
- d) Examinar la asociación entre la variabilidad del crecimiento radial *A. guatemalensis*, *A. religiosa* y *A. hickelii* con los modos a gran escala de la variabilidad climática (ENSO, PDO, AMO).

HIPÓTESIS

- a) Los anillos de crecimiento anual de *A. hickelii* pueden ser fechados al año exacto de su formación, debido a la sensibilidad de sus crecimientos a la variabilidad climática.
- b) La variación en los patrones de crecimiento de los anillos de crecimiento en las tres especies de *Abies* están influenciadas principalmente por variables climáticas relacionadas con la disponibilidad de agua.
- c) Existe variación en los crecimientos de los árboles en esta región del país, originada por la teleconexión de ENSO, que al interactuar con variables climáticas locales, determinan la variabilidad interanual en el grosor de los anillos de las tres especies en estudio.

Literatura Citada

- Arriaga, L., Espinosa, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Babst, F., Bodesheim, P., Charney, N., Friend, A. D., Girardin, M. P., Klesse, S., J. P. Moore, D., Mahecha, D., Poulter, B., E.K. Evans, M., & Dawson, A. (2018). When tree rings go global: Challenges and opportunities for retro-and prospective insight. *Quaternary Science Reviews*, 197, 1-20.
- Brienen, R. J., Lebrija- Trejos, E. D. W. I. N., Zuidema, P. A., & Martínez- Ramos, M. (2010). Climate- growth analysis for a Mexican dry forest tree shows strong impact of sea surface temperatures and predicts future growth declines. *Global Change Biology*, 16(7), 2001-2012.
- Buizer, M., Humphreys, D., & de Jong, W. (2014). Climate change and deforestation: The evolution of an intersecting policy domain. *Environ. Sci. Pol.* 35, 1–11.
- Del Castillo, R.F., J.A. Pérez de la Rosa, G. Vargas Amado y R. Rivera García. (2004). Coníferas. En: A.J. García-Mendoza, M.J. Ordóñez y M. Briones-Salas (eds.), *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 141-158.
- Farjon, A. 2013. *Abies hickelii*. *The IUCN Red List of Threatened Species* . (2013). e.T42286A2969866. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42286A2969866.en>. Downloaded on : 09 December 2018
- Fonti, P., von Arx, G., García- González, I., Eilmann, B., Sass- Klaassen, U., Gärtner, H., & Eckstein, D. (2010). Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist*, 185(1), 42-53.
- Garcia, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., & Araújo, M. B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344(6183), 1247579.
- Halofsky, J. E., Andrews-Key, S. A., Edwards, J. E., Johnston, M. H., Nelson, H. W., Peterson, D. L., M. Schmitt, K., W. Swanston, C. & Williamson, T. B. (2018). Adapting forest management to climate change: The state of science and applications in Canada and the United States. *Forest Ecology and Management*, 421, 84-97.
- Hanewinkel, M., Cullmann, D. A., Schelhaas, M. J., Nabuurs, G. J., & Zimmermann, N. E. (2013). Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*, 3(3), 203.
- Henderson, J. P., & Grissino-Mayer, H. D. (2009). Climate–tree growth relationships of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) in the Southeastern Coastal Plain, USA. *Dendrochronologia*, 27(1), 31-43.

- IPCC, 2014. Summary for policy makers. In: Pachauri, R.K., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Krishnaswamy, J., John, R., & Joseph, S. (2014). Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions. *Global change biology*, 20(1), 203-215.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., & Lexer, M. J. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest ecology and management*, 259(4), 698-709.
- Malhi, Y., Gardner, T. A., Goldsmith, G. R., Silman, M. R., & Zelazowski, P. (2014). Tropical forests in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 125-159.
- Meave, J. A., Rincón, A., & Romero-Romero, M. A. (2006). Oak forests of the hyper-humid region of La Chinantla, Northern Oaxaca Range, Mexico. In *Ecology and conservation of Neotropical montane oak forests* (pp. 113-125). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ngoma, J., Speer, J. H., Vinya, R., Kruijt, B., Moors, E., & Leemans, R. (2017). The dendrochronological potential of *Baikiaea plurijuga* in Zambia. *Dendrochronologia*, 41, 65-77.
- Norma Oficial Mexicana (2010) NOM-059-SEMARNAT2010. Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categoría de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. SEMARNAT. Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, Mexico
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37, 637-669.
- Patskoski, J., Sankarasubramanian, A., & Wang, H. (2015). Reconstructed streamflow using SST and tree-ring chronologies over the southeastern United States. *Journal of Hydrology*, 527, 761-775.
- Peterson, D.L., Vose, J.M., Patel-Weynand, T. (Eds.), 2014. *Climate change and United States forests*. Advances in Global Change Research, vol. 57. Springer, Dordrecht, the Netherlands.
- Ponce-Reyes, R., Reynoso-Rosales, V. H., Watson, J. E., van Der Wal, J., Fuller, R. A., Pressey, R. L., & Possingham, H. P. (2012). Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature climate change*, 2(6), 448.

- Price, D.T., Alfaro, R.I., Brown, K.J., Flannigan, M.D., Fleming, R.A., Hogg, E.H., Girardin, M.P., Lakusta, T., Johnston, M., McKenney, D.W., Pedlar, J.H., Stratton, T., Sturrock, R.N., Thompson, I.D., Trofymow, J.A., Venier, L.A., (2013). Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems. *Environmental Reviews*, 21(4), 322-365.
- Schöngart, J., Orthmann, B., Hennenberg, K. J., Porembski, S., & Worbes, M. (2006). Climate–growth relationships of tropical tree species in West Africa and their potential for climate reconstruction. *Global Change Biology*, 12(7), 1139-1150.
- Sohar, K., Altman, J., Lehečková, E., & Doležal, J. (2017). Growth–climate relationships of Himalayan conifers along elevational and latitudinal gradients. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2593-2605.
- Sørensen, M., Kollmann, J. & Gardner, M. (2013). *Abies guatemalensis*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2013: e.T42285A2969774. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42285A2969774.en>. Downloaded on 23 January 2019.
- Thom, D., & Seidl, R. (2016). Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 91(3), 760-781.
- Trouet, V., Esper, J., Graham, N. E., Baker, A., Scourse, J. D., & Frank, D. C. (2009). Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the medieval climate anomaly. *science*, 324(5923), 78-80.
- Vlam, M., Baker, P. J., Bunyavejchewin, S., & Zuidema, P. A. (2014). Temperature and rainfall strongly drive temporal growth variation in Asian tropical forest trees. *Oecologia*, 174(4), 1449-1461.
- Wan, J. Z., Wang, C. J., Qu, H., Liu, R., & Zhang, Z. X. (2018). Vulnerability of forest vegetation to anthropogenic climate change in China. *Science of The Total Environment*, 621, 1633-1641.
- Wang, H., Shao, X. M., Jiang, Y., Fang, X. Q., & Wu, S. H. (2013). The impacts of climate change on the radial growth of *Pinus koraiensis* along elevations of Changbai Mountain in northeastern China. *Forest ecology and management*, 289, 333-340.
- Zhang, W. T., Jiang, Y., Dong, M. Y., Kang, M. Y., & Yang, H. C. (2012). Relationship between the radial growth of *Picea meyeri* and climate along elevations of the Luyashan Mountain in North-Central China. *Forest Ecology and Management*, 265, 142-149.
- Zhang, Z. (2015). Tree-rings, a key ecological indicator of environment and climate change. *Ecological indicators*, 51, 107-116.

Zhu, K., Woodall, C. W., Ghosh, S., Gelfand, A. E., & Clark, J. S. (2014). Dual impacts of climate change: forest migration and turnover through life history. *Global change biology*, 20(1), 251-264.

CAPÍTULO I. RESPUESTA CLIMÁTICA DE *Abies guatemalensis* REHDER EN IXTLÁN DE JUÁREZ, OAXACA, MÉXICO

1.1 Resumen

En México existen especies arbóreas, específicamente las coníferas, las cuales permiten analizar y reconstruir las variaciones climáticas del pasado de una o varias regiones geográficas. El objetivo de este estudio fue determinar el potencial de respuesta dendrocronológica de *Abies guatemalensis* Rehder a la variabilidad climática en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Se desarrollaron cronologías de madera temprana (EWI), madera tardía (LWI) y de anillo total (RWI) de 206 años (1810-2015). El análisis de correlación estacional señaló una relación directa entre la cronología RWI residual con la precipitación de invierno-primavera ($r = 0.67$, $p < 0.01$) y una relación indirecta con la temperatura máxima de primavera ($r = -0.42$, $p < 0.01$) del año actual de crecimiento. Mediante un modelo de regresión lineal, se reconstruyó la precipitación acumulada de febrero a abril, de los últimos 136 años (1880-2015), el cuál explicó 44% de la variabilidad de los registros meteorológicos locales del período de calibración (1952-2010). Los períodos más secos ocurrieron en las décadas 1880, 1900, 1940, 1970, 1980, 1990 y 2000. El análisis espectral de la reconstrucción mostró una periodicidad cuasi-cíclica de 2.2 y 3.8 años, indicando una asociación con el fenómeno ENSO. La sensibilidad de la especie a variaciones climáticas reflejadas en el grosor de los anillos de crecimiento, sugiere que *A. guatemalensis* tiene potencial para reconstrucciones hidroclimáticas, lo que permitirá extender en el tiempo los registros instrumentales para análisis más amplios de fluctuaciones en el clima y sus tendencias en esta región del país.

Palabras clave: dendrocronología, ENSO, oyamel, precipitación, variabilidad climática.

1.2 Abstract

In Mexico there are tree species, specifically conifers, which allow to analyze and reconstruct historical climatic variations of one or more geographical regions. The objective of this study was to determine the dendrochronological climatic response function of sacred fir (*Abies guatemalensis* Rehder) in Ixtlan de Juarez, Oaxaca. Earlywood (EWI), latewood (LWI) and total ring (RWI) chronologies of 206 years (1810-2015) were developed. The correlation analysis revealed a direct relationship between the residual RWI chronology with the winter-spring precipitation ($r = 0.67$, $p < 0.01$) and an indirect relationship with the maximum spring temperature ($r = -0.42$, $p < 0.01$) of the current year of growth. Using a linear regression model, the accumulated precipitation from February to April was reconstructed over the last 136 years (1880-2015), which explained 44% of the variability of the local meteorological records of the calibration period (1952-2010). The driest periods occurred in the 1880's, 1900's, 1940's, 1970's, 1980's, 1990's and 2000's. The power spectral analysis of the reconstruction showed quasi-cyclic periodicity of 2.2 and 3.8 years, indicating an association with El Niño-Southern Oscillation. The sensitivity of the species to climatic variations reflected in its growth rings, suggests that *A. guatemalensis* has potential for hydroclimatic reconstructions, which will allow to extend in time the climatic information for broader analyzes of climate fluctuations and its trends in this region.

Keywords: climatic variability, dendrochronology, ENSO, fir, precipitation.

1.3 Introducción

Los anillos de crecimiento de los árboles son equivalentes a archivos climáticos naturales con información sobre el clima y el ambiente donde se desarrollan, pudiendo abarcar siglos o incluso milenios (Zhang, 2015). Las cronologías generadas con los anillos de crecimiento de árboles han permitido ampliar, mejorar o sustituir los registros meteorológicos respecto a los registros instrumentales. Las series dendrocronológicas también permiten analizar las variaciones climáticas interanuales o multianuales, definir tendencias y modelar el impacto del cambio climático en el crecimiento arbóreo. Las principales ventajas del uso de los anillos de crecimiento de los árboles en las reconstrucciones climáticas comparado con otras fuentes indirectas de información del clima como capas de hielo, sedimentos marinos, polen, arrecifes coralinos, entre otros, es que estos presentan una amplia distribución espacial, de resolución anual y son sensibles a la variación estacional, anual o multianual del clima (Frank *et al.*, 2010).

Los estudios dendroclimáticos en México se encargan de reconstruir el clima local y regional del pasado (Villanueva *et al.*, 2015) y su conexión con patrones climáticos de escala global como El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Multidecadal del Pacífico (AMO, por sus siglas en inglés); asimismo, identifican y analizan eventos hidroclimáticos históricos (Stahle *et al.*, 2016).

Las especies frecuentemente utilizadas para las reconstrucciones del clima en México han sido *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Taxodium mucronatum* Ten. y *Pinus hartwegii* Lindl.; en las regiones del norte-centro y, en un menor grado, en la región de sur del país (Acosta-Hernández *et al.*, 2017). Exhibiendo así, una necesidad de incorporar

nuevas especies a los estudios climáticos y desarrollar una red dendrocronológica en el sur de México, donde los estudios dendrocronológicos son escasos, particularmente para el género *Abies* (Bernal-Salazar *et al.*, 2004).

En los bosques de coníferas a lo largo del occidente y sur de México, se encuentran pequeñas poblaciones aisladas y restringidas de *Abies guatemalensis* Rehder, localizadas en laderas y cañadas. Esta especie, se desarrolla bajo condiciones de alta humedad y con temperaturas anuales medias $>11^{\circ}\text{C}$ (Islebe *et al.*, 1995; Ramírez y González, 2015), de manera tal, que su crecimiento está sujeto a condiciones muy particulares, que lo hacen sensible a variaciones climáticas. Por ejemplo, Anchukaitis *et al.* (2013), mencionan que el crecimiento de *A. guatemalensis* en la sierra de los Cuchumatanes, Guatemala es afectado por las condiciones de humedad al inicio de la estación de crecimiento, lo que es controlado por la precipitación al final de la estación seca, pero su crecimiento se ve negativamente influenciado por la temperatura de la estación de crecimiento, demostrando así, el potencial dendroclimático de la especie.

Por lo anterior, es necesario desarrollar estudios dendroclimáticos para analizar la influencia de las condiciones específicas del clima en el crecimiento de *A. guatemalensis* y generar series dendrocronológicas, que permitan reconstruir la variabilidad climática del pasado, más allá de la disponibilidad de datos climáticos instrumentales, específicamente para el estado de Oaxaca, en donde estos registros son de corta extensión (< 60 años) (Pérez-Morga *et al.*, 2008). El entendimiento de las variaciones climáticas a diferentes escalas espacio-temporales y sus efectos en las limitaciones ambientales de los ecosistemas forestales, permitirá mejorar la predicción de respuestas a los cambios futuros.

1.4 Objetivos

Los objetivos planteados en este trabajo fueron: a) evaluar el potencial dendrocronológico de *A. guatemalensis*, b) analizar la influencia del clima local en el crecimiento radial, y c) reconstruir la precipitación histórica para analizar su variabilidad y determinar la influencia en su comportamiento de fenómenos circulatorios atmosféricos a gran escala (ENSO, PDO y AMO) para la zona de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, bajo las siguientes hipótesis: 1) el principal factor limitante en el crecimiento radial es la precipitación, el cual permitirá reconstruir y caracterizar la variabilidad climática histórica del área de estudio, y 2) la variabilidad de la precipitación es influenciada por eventos intensos de ENSO.

1.5 Materiales y métodos

1.5.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la región de la Sierra Norte de Oaxaca, en el municipio de Ixtlán de Juárez. Se seleccionaron dos sitios donde *A. guatemalensis* se distribuye de manera natural localizados en las coordenadas geográficas 17° 28' 28.12'' y 17° 28' 18.96'' latitud norte y los 96° 24' 54.43'' O y 96° 24' 47.78'' longitud oeste, a una altitud de 2200 a 2400 m s.n.m. (Figura 1.1). El tipo de clima de los sitios de estudio corresponde a templado húmedo con lluvias de verano C (m) (García, 2004). La geomorfología de la zona es de serranía con tipo de suelo Acrisol (INEGI, 2010). La población de *A. guatemalensis* se encontró en el bosque de pino-encino, asociado con *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *Quercus candicans* Née, *Litsea*

neesiana (S. Schauer) Hemsl., *Litsea glaucescens* Kunth y *Phoebe helicterifolia* (Meisn.) Mez.

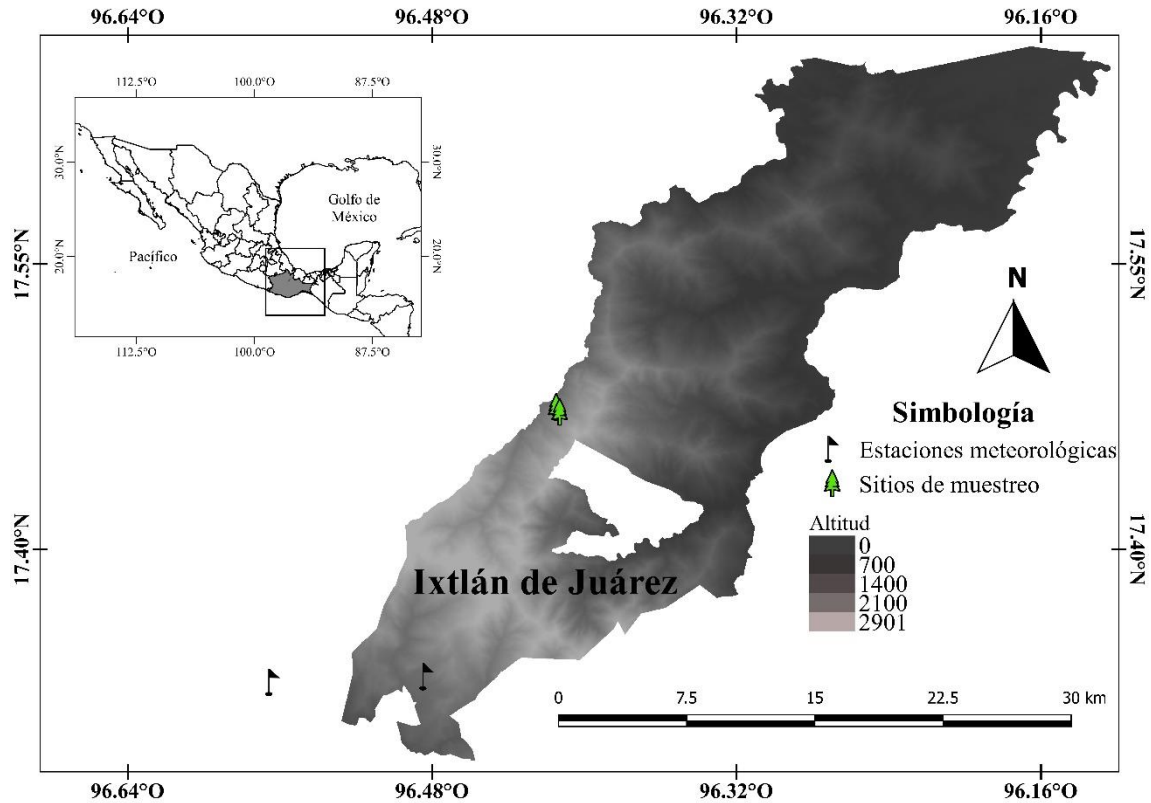


Figura 1. 1. Localización geográfica del área de estudio y las estaciones meteorológicas más cercanas.

1.5.2 Muestreo

Los árboles de *A. guatemalensis* seleccionados fueron aquellos que presentaron un disturbio menor y libres de daños físicos y/o enfermedades. Con ayuda de un taladro de Pressler marca Haglöf de 12 mm de diámetro interno y 53.34 cm de longitud, se obtuvieron de 2 a 3 núcleos de crecimiento por individuo, a una altura de 1.30 m del suelo y en dirección perpendicular a la pendiente con el fin de evitar anomalías en el crecimiento

(problemas de tensión y compresión). Se colectó un total de 74 muestras correspondientes a 35 árboles.

En el Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA INIFAP las muestras se secaron a temperatura ambiente y se colocaron en moldes de madera donde fueron lijadas y pulidas utilizando papel lija (grano grueso 200 a fino 1000) para mejorar la visibilidad entre límites de los anillos de crecimiento. El fechado de las muestras se realizó de acuerdo a procedimientos dendrocronológicos tradicionales (Speer, 2010). El anillo anual, la madera temprana, y la madera tardía, se midieron con un sistema de medición Velmex, con una precisión 0.001 mm. La calidad del fechado se realizó en el programa COFECHA (Holmes, 1983).

1.5.3 Estandarización y desarrollo de la cronología

Las series fueron estandarizadas empleando el paquete dplR (Bunn, 2010) de los programas dendrocronológicos de la Universidad de Arizona en el software R (R Development Core Team, 2017). La estandarización consistió en el ajuste de un spline cubico suavizado con un 50% de frecuencia de respuesta y 67% de la longitud de la serie para remover las tendencias biológicas y geométricas de cada serie y resaltar la señal climática (Cook, 1987). La estandarización de las series individuales con media igual a 1.0 y varianza homogénea, se obtuvo dividiendo la medición de ancho de anillo de cada año entre el valor de la curva de ajuste (Cook, 1987). Siguiendo este procedimiento, se generó una cronología promedio estandarizada para la madera temprana (EWI), la madera tardía (LWI) y el anillo total (RWI). Las tres cronologías incluyeron las versiones estándar (STD) y residual (RES). Para determinar la calidad y confiabilidad de las cronologías, se calculó la señal expresada de la población (EPS) (Wigley *et al.*, 1984). El EPS indica el grado en que

el tamaño de la muestra con que se generó la cronología es representativo de una población teórica, con un número infinito de individuos. Una cronología con un valor EPS > 0.85 es considerado confiable para reconstrucciones climáticas (Wigley *et al.*, 1984).

1.5.3 Datos climáticos

Los registros de precipitación promedio (Prec), temperatura máxima (Tmáx), temperatura promedio (Tprom) y temperatura mínima (Tmín) fueron obtenidos del programa Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC III) (IMTA, 2013). Las estaciones meteorológicas más cercanas a los sitios de muestreo fueron: Ixtlán de Juárez (96.48 latitud norte y 17.33 longitud oeste a altitud de 2312 m snm) y Guelatao (96.564 latitud norte y 17.330 longitud oeste a altitud de 1496 m snm) con una distancia de 17.5 y 23 km, respectivamente (Figura 1.1). Los registros meteorológicos de las dos estaciones fueron promediados para construir una base local abarcando un período de 1952-2010, que se utilizó para el análisis de correlación con el crecimiento radial del árbol. La precipitación total anual es de 989 mm, registrándose la mayor cantidad en el mes de septiembre. La temperatura promedio anual es de 13.5 °C, registrando el valor más bajo en los meses de diciembre-febrero y los valores más altos en el mes de abril (Figura 1.2).

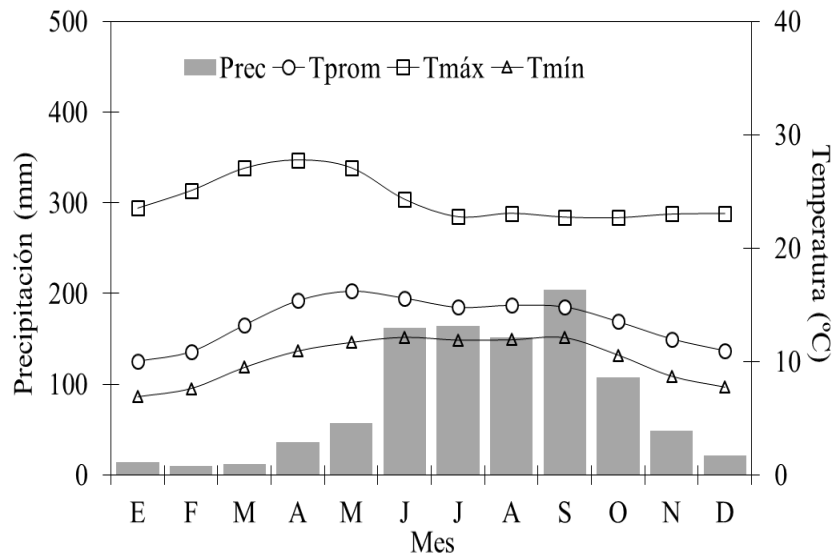


Figura 1. 2. Registros promedios mensuales de precipitación (Prec), temperatura máxima (Tmáx), temperatura promedio (Tprom) y temperatura mínima (Tmín) del período 1952-2010, para las estaciones meteorológicas Ixtlán de Juárez y Guelatao, Oaxaca.

1.5.4 Análisis estadístico

La respuesta climática de *A. guatemalensis* fue analizada mediante una correlación lineal de Pearson's entre los índices de ancho de anillo de EWI, LWI y RWI con las variables Prec, Tmáx, Tprom y Tmín, para determinar que variables climáticas estaban más relacionadas con el crecimiento radial en el sitio de estudio. El período de análisis, se realizó adoptando el año biológico clásico, es decir, bajo el supuesto que el crecimiento de los árboles puede ser afectado por las condiciones climáticas prevalecientes de octubre del año previo a septiembre del año actual de crecimiento (Gaire *et al.*, 2017). Las correlaciones mensuales y estacionales de los datos climáticos, se realizaron con la función *seascorr* en el paquete *treeclim* (Zang y Biondi, 2015) del software R. Este análisis

permitió calcular intervalos de confianza para las correlaciones a través de un remuestreo bootstrap estacionario (1000 repeticiones) con un nivel de confiabilidad del 95% y 99%.

Posteriormente, se ajustó un modelo de regresión lineal con la función *skills* del paquete *treeclim* para reconstruir la variable climática que mostró mayor influencia en la variabilidad del crecimiento radial de *A. guatemalensis*. Para ello, los registros meteorológicos instrumentales fueron divididos en dos subperíodos; uno para la calibración y otro para la verificación. Si los dos subperíodos fueran significativos, entonces se utilizará el período total de los registros instrumentales para ajustar el modelo de reconstrucción final. La confiabilidad del modelo fue evaluado con el coeficiente de regresión (R^2), el coeficiente de regresión ajustado (R_{adj}^2), el coeficiente de correlación (r) y la significancia del modelo (F); y la capacidad de predicción del modelo con la reducción del error (RE), el coeficiente de eficiencia (CE), la raíz de los cuadrados medios del error (RMSE) y el estadístico Durbin Watson (DW). Los valores positivos de RE y CE indican que el modelo de regresión tiene potencial para reconstrucciones climáticas (Cook *et al.*, 1999).

Para analizar los cambios en la reconstrucción climática, los años secos extremos se identificaron como aquellos años menores a la media -1 desviación estándar (σ) y los años húmedos extremos mayores a la media +1 desviación estándar (σ), en tanto que, dos o más años consecutivos abajo de la media se consideraron como sequía o húmedos aquellos por arriba de la media de acuerdo con el método de división utilizado por Sun *et al.* (2018). Así mismo, la variabilidad climática de la serie de reconstrucción en la frecuencia dominante fue examinada con un análisis espectral, para detectar la periodicidad de eventos originados por fenómenos circulatorios (Mann y Lees, 1996).

La influencia de fenómenos circulatorios atmosféricos en el crecimiento de los árboles fue evaluada con una función de correlación para contrastar las cronologías de índices de ancho de anillo de *A. guatemalensis* con los índices del El Niño-Oscilación del Sur (ENSO; Ropelewski y Halpert, 1987), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO; Mantua *et al.*, 1997) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO; van Oldenborgh *et al.*, 2009). El Índice Multivariado del ENSO (MEI), el Índice Oscilación del Sur (SOI), el Índice Niño 3.4 SST y el Índice de Lluvia Tropical (TRI) fueron analizados como indicadores de la variabilidad del ENSO. El MEI es una serie de tiempo bimensual que permite caracterizar los eventos de ENSO, se fundamenta en seis variables registradas en el Pacífico tropical: presión al nivel del mar, componentes de la superficie del viento meridional y zonal, temperatura del agua y del aire y la fracción de la nubosidad total del cielo (Wolter y Timlin, 1998); el SOI es un índice estandarizado basado en las diferencias de presión observadas a nivel del mar entre Tahití y Darwin, Australia (Ropelewski y Jones, 1987); el índice Niño 3.4 SST define las anomalías promedio de la temperatura de la superficie del mar en la franja comprendida entre 5°N-5°S y 120°-170°W (Rayner *et al.*, 2003) y el TRI constituye una estimación de la variabilidad de ENSO, ya que está relacionado con las anomalías en la cantidad de lluvia en el Océano Pacífico tropical (Wright, 1979). Por otro lado, el índice PDO indica las variaciones mensuales de la temperatura superficial marina en el Océano Pacífico al norte de los 20°N que cambia a escala interdecadal en períodos aproximados de 20 años a 30 años (Hare y Mantua, 2000) y el índice AMO describe la variabilidad climática multidecadal en el Océano Atlántico norte (van Oldenborgh *et al.*, 2009). Las series de tiempo mensuales de los índices MEI, SOI, Niño 3.4 SST, TRI, PDO y AMO fueron obtenidas de la base de datos del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

Earth System Research Laboratory

(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>). Todos estos análisis estadísticos mencionados anteriormente, se realizaron con el software R versión 3.4.2 (R Development Core Team, 2017).

1.6 Resultados

1.6.1 Cronología

Se fecharon correctamente 62 (84%) de las muestras de *A. guatemalensis*. El ancho de anillo total promedio fue de 3.40 ± 0.24 mm. Los anillos fueron relativamente grandes en la mayoría de las muestras, lo que facilitó el fechado y la presencia de anillos falsos fue común en los últimos años. La longitud de las series individuales abarcó de 206 a 71 años con una media de 115 años en el período de 1810-2015. La cronología residual de anillo total presentó una intercorrelación entre series de 0.57 ($p < 0.01$) valor que supera al de referencia 0.3281 ($p < 0.01$) (Holmes, 1983), sensibilidad media de 0.31, desviación estándar de 0.19, auto-correlación de primer orden de 0.42, relación señal-ruido de 13.77 y varianza en el primer “eigenvector” de 38.83%. La longitud entre series individuales abarcó de 206 a 71 años con una media de 115 años en el período de 1810-2015. La confiabilidad de la cronología se presentó a partir de 1880 cuando el valor del EPS (0.93) superó el umbral recomendado de 0.85 (Wigley *et al.*, 1984), con 10 radios en adelante (Figura 1.3).

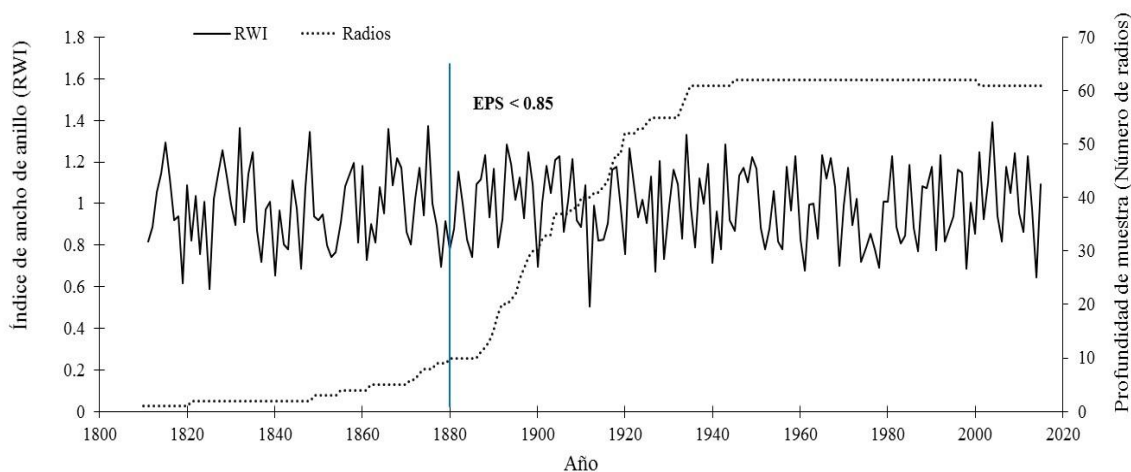


Figura 1. 3. Cronología residual de anillo total (RWI) de *Abies guatemalensis* (línea continua) y tamaño de muestra (línea punteada). La línea en color azul indica la fecha a partir de donde la cronología rebasa el valor de EPS de 0.85.

1.6.2 Respuesta climática

Los resultados del análisis de correlación indicaron que la precipitación del mes de abril presentó una relación positiva con la cronología residual de anillo total ($r = 0.66$, $p < 0.01$), madera temprana ($r = 0.61$, $p < 0.05$) y tardía ($r = 0.41$, $p < 0.05$) (Cuadro 1). De igual manera, la precipitación estacional acumulada de marzo-abril presentó una correlación positiva con la cronología residual de madera temprana ($r = 0.60$, $p < 0.05$) y con la cronología estándar de madera tardía ($r = 0.60$, $p < 0.05$). Las correlaciones negativas significativas fueron entre la cronología residual de ancho de anillo total y la temperatura promedio de marzo ($r = -0.29$, $p < 0.01$), abril ($r = -0.39$, $p < 0.01$), mayo ($r = -0.28$, $p < 0.01$) y estacionalmente con los meses de febrero-abril ($r = -0.32$, $p < 0.01$) del año actual de crecimiento (Figura 1.4). La correlación entre la cronología residual de madera temprana y la temperatura promedio sólo fue negativa con el mes de noviembre

previo a la estación de crecimiento ($r = -0.28$, $p < 0.05$); mientras que para la cronología estándar de madera tardía, la correlación fue positiva con la temperatura máxima del mes de agosto ($r = 0.33$, $p < 0.05$) (Cuadro 1.1). El crecimiento del anillo total de los árboles está más asociado con la precipitación de febrero-abril ($r = 0.67$, $p < 0.01$) y la temperatura máxima de marzo-mayo ($r = -0.42$, $p < 0.01$), ambos del año actual (Figura 1.4, Cuadro 1.1). Por otro lado, la temperatura mínima no mostró ninguna asociación estadística significativa ($p > 0.05$) con las cronologías de RWI, EWI y LWI.

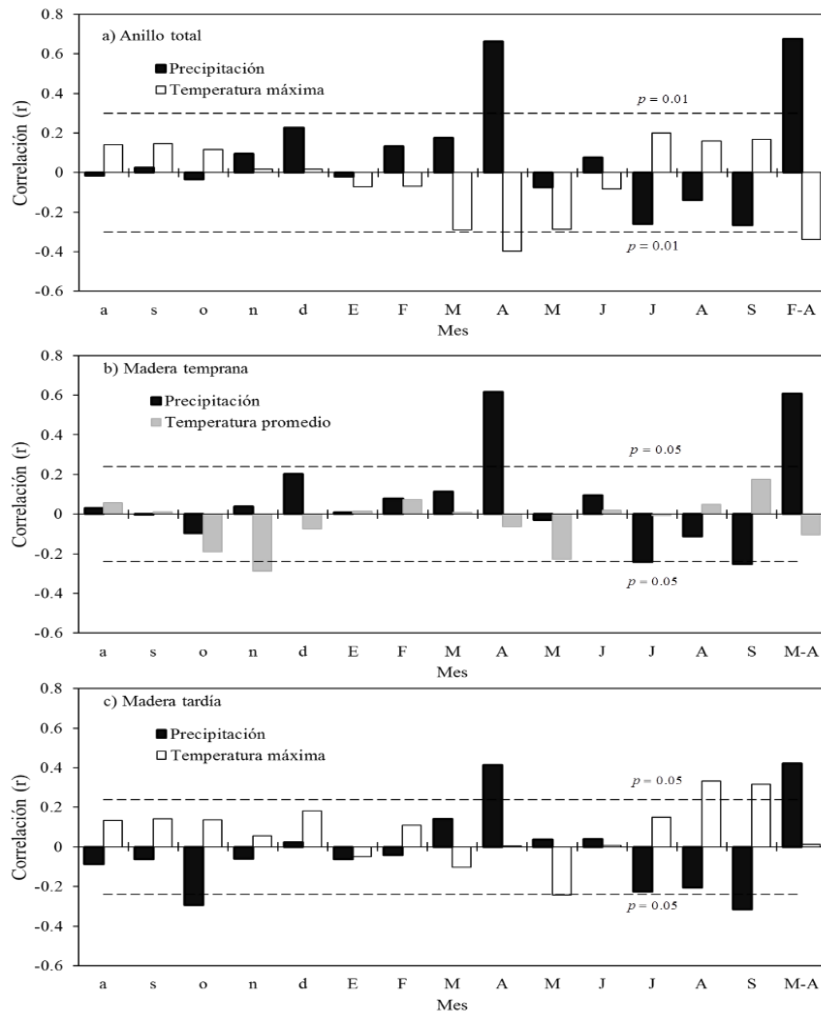


Figura 1. 4. Coeficientes de correlación entre la cronología de anillo total versión residual (a), madera temprana versión residual (b) y madera tardía versión estándar (c) con la precipitación promedio, la temperatura promedio y la temperatura máxima, para el período 1952-2010. Las líneas horizontales discontinuas indican los niveles de confianza al 95 y 99%. Las letras a-d en el eje horizontal representa los meses de agosto a diciembre del año previo y E-S los meses de enero a septiembre del año actual de crecimiento; F-A: febrero-abril, M-A: marzo-abril.

Cuadro 1. 1. Respuesta climática entre los índices de madera temprana, tardía y de anillo total y las variables climáticas del período 1952-2010.

Cronología	Versión	Variable climática	Período mensual/estacional	Asociación
RWI	Residual	Precipitación	abril	$r = 0.66, p < 0.01$
		Precipitación	febrero-abril	$r = 0.67, p < 0.01$
		Temperatura promedio	marzo	$r = -0.29, p < 0.01$
		Temperatura promedio	abril	$r = -0.39, p < 0.01$
		Temperatura promedio	mayo	$r = -0.28, p < 0.01$
		Temperatura promedio	febrero-abril	$r = -0.32, p < 0.01$
		Temperatura máxima	marzo-mayo	$r = -0.42, p < 0.01$
EWI	Residual	Precipitación	abril	$r = 0.61, p < 0.05$
		Precipitación	marzo-abril	$r = 0.60, p < 0.05$
		Temperatura promedio	noviembre	$r = -0.28, p < 0.05$
LWI	Residual	Precipitación	abril	$r = 0.41, p < 0.05$
	Estándar	Precipitación	marzo-abril	$r = 0.60, p < 0.05$
	Estándar	Temperatura máxima	agosto	$r = 0.33, p < 0.05$

RWI: cronología estandarizada de anillo total; EWI: madera temprana; LWI: madera tardía.

1.6.3 Reconstrucción de la precipitación

Con base en los resultados obtenidos del análisis de correlación, la precipitación estacional de febrero-abril (P_{FMA}) fue el factor climático más limitante en el crecimiento de *A. guatemalensis* ($r = 0.67$, $p < 0.01$). Por lo tanto, la cronología RWI residual fue elegida para la reconstrucción climática local de la P_{FMA} en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. La ecuación desarrollada para reconstruir la precipitación acumulada de febrero-abril para Ixtlán de Juárez fue la siguiente:

$$P_{FMA} = -36.2082 + (94.5988 \times RWI)$$

donde:

P_{FMA} : precipitación acumulada (mm) de febrero-abril y

RWI : índice de ancho de anillo de la cronología residual

El modelo de regresión lineal desarrollado explica el 44% de la variación de la P_{FMA} para el período de 1952-2010 (Figura 1.5). Los valores altos de R^2 (0.44) y F-test (46.29) indican la confiabilidad del modelo final. El valor de DW fue de 1.86 lo que reveló que no hay autocorrelación significativa en los residuales. La correlación entre la reconstrucción y la precipitación observada fue de 0.66 (Cuadro 1.2).

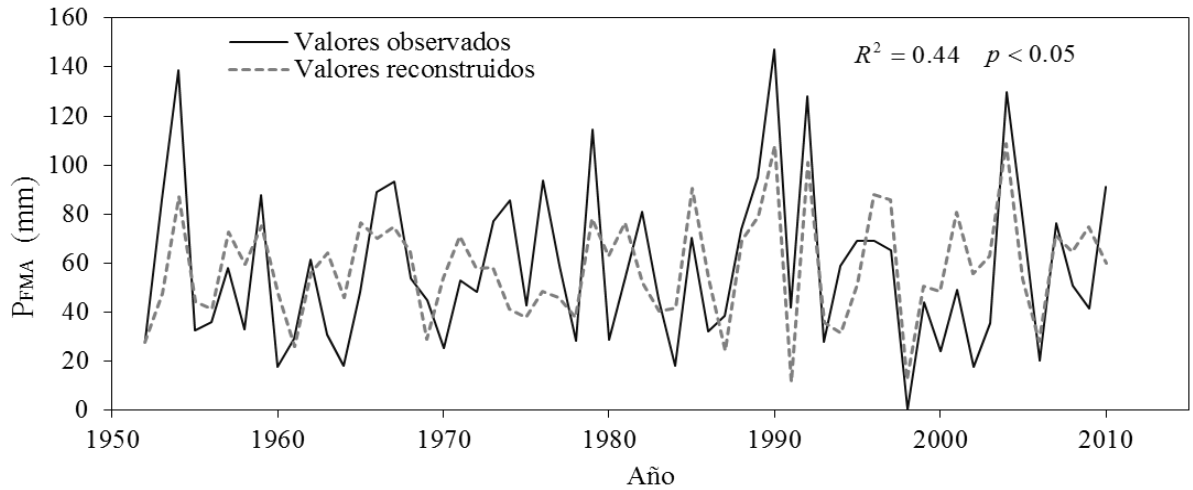


Figura 1. 5. Comparación entre los valores observados y valores reconstruidos de la precipitación acumulada de febrero-abril (P_{FMA}) para el período 1952-2010, en Ixtlán de Juárez Oaxaca.

Cuadro 1. 2. Estadísticos para la calibración y verificación del modelo utilizado para la reconstrucción de la P_{FMA} en el período de 1952-2010.

Calibración	r	R^2	R_{adj}^2	F	Verificación	r	CE	RE	RMSE	DW
1952-1981	0.54	0.29	0.27	11.55	1982-2010	0.75	0.56	0.57	1.09	1.65
1981-2010	0.74	0.55	0.53	34.86	1952-1980	0.55	0.31	0.30	2.57	1.71
1952-2010	0.66	0.44	0.43	46.29						1.86

r : Coeficiente de correlación de Pearson; R^2 : coeficiente de determinación; R_{adj}^2 : coeficiente de determinación ajustado; F: estadístico para la significancia del modelo de regresión; CE: coeficiente de eficiencia; RE: reducción del error; RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; DW: Durbin-Watson.

La estabilidad y confiabilidad del modelo final fue validado usando pruebas de calibración y verificación entre los datos observados y reconstruidos. Los registros instrumentales de la precipitación (1952-2010) fueron subdivididos en dos partes: 30 años para calibración (1952-1981/1981-210) y 29 años para verificación (1982-2010/1952-1980) (Cuadro 1.2). Los estadísticos r , CE, RE y DW en los subperíodos de verificación demostraron que el modelo usado para la reconstrucción es confiable y estable, por lo tanto, se consideró al período total de registros de precipitación para desarrollar el modelo final de reconstrucción. La reconstrucción permitió identificar la variación histórica local de la P_{FMA} para el período de 1880-2015.

1.6.4 Variabilidad de la precipitación reconstruida

El valor promedio de la P_{FMA} reconstruida fue de 57.59 mm con una desviación estándar (σ) de 22 mm. La reconstrucción de la P_{FMA} muestra distintos períodos secos y húmedos durante los últimos 136 años (1880-2015) en la zona de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. La reconstrucción presentó 18 años secos y 19 años húmedos, que representan el 13.97 % y 13.23 % del total de años de la serie, respectivamente.

Los años más extremos de sequía fueron 1880, 1885, 1912, 1933, 1952, 1961, 1975, 1987, 1991, 1998, 2006 y 2014, y los años extremos de humedad fueron 1934, 1954, 1985, 1990, 1992 y 2004. Así como, los principales períodos de sequía ocurrieron en 1884-1885, 1900-1901, 1940-1942, 1951-1953, 1960-1961, 1974-1978, 1983-1984 y 1993-1994. Por el contrario, los períodos húmedos se registraron de 1886-1888, 1890-1891, 1893-1894, 1902-1905, 1917-1918, 1931-1932, 1937-1939, 1946-1950, 1965-1967, 1988-1990, 1996-1997 y 2007-2009 (Figura 1.6).

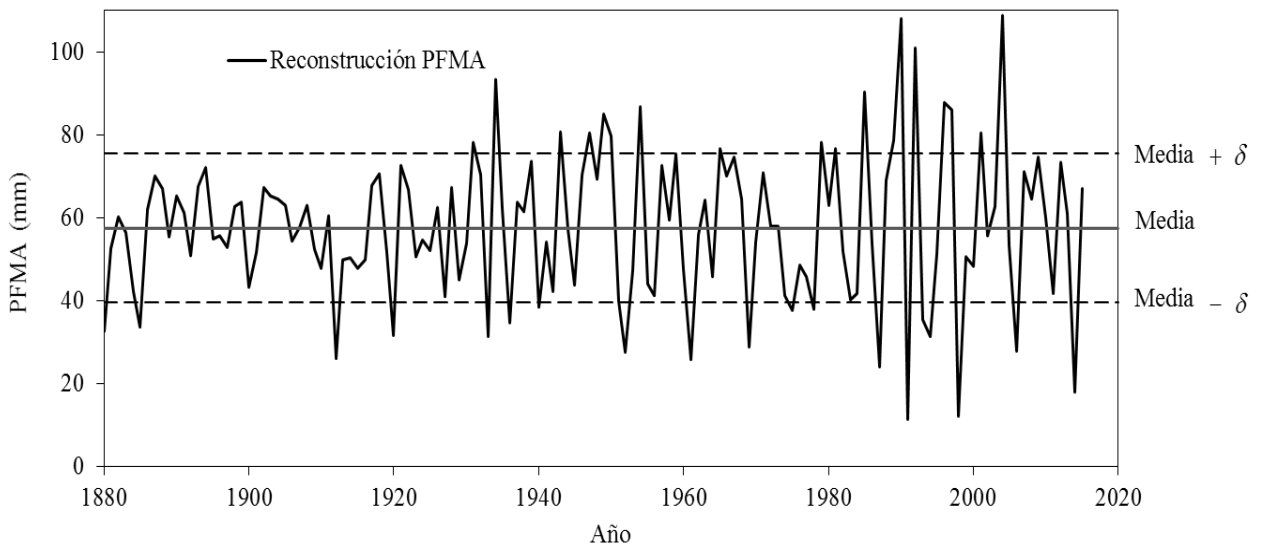


Figura 1. 6. Reconstrucción de la P_{MFA} en los últimos 136 años (1880-2015), en Ixtlán de Juárez Oaxaca. Las líneas horizontales punteadas representan los umbrales para establecer los años secos y húmedos extremos, de acuerdo con la metodología propuesta por Sun *et al.* (2018).

En siglo XX las sequías más intensas ocurrieron en 1934-1935, 1940-1941, 1945-1950, 1954, 1957-1958, 1977, 1983-1984 y 1987; las cuales coinciden con los años de sequías severas identificadas a través del índice de severidad de sequía de palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) para el estado (Liverman, 1999) y los reconstruidos con el Atlas de sequías de México (MXDA) (Stahle *et al.*, 2016) (Figura 1.7). Los resultados del análisis espectral permitieron identificar la variabilidad de la P_{MFA} reconstruida (1880-2015). Los períodos significativos ($p < 0.01$) fueron de 2.2 y 3.8 años (Figura 1.8).

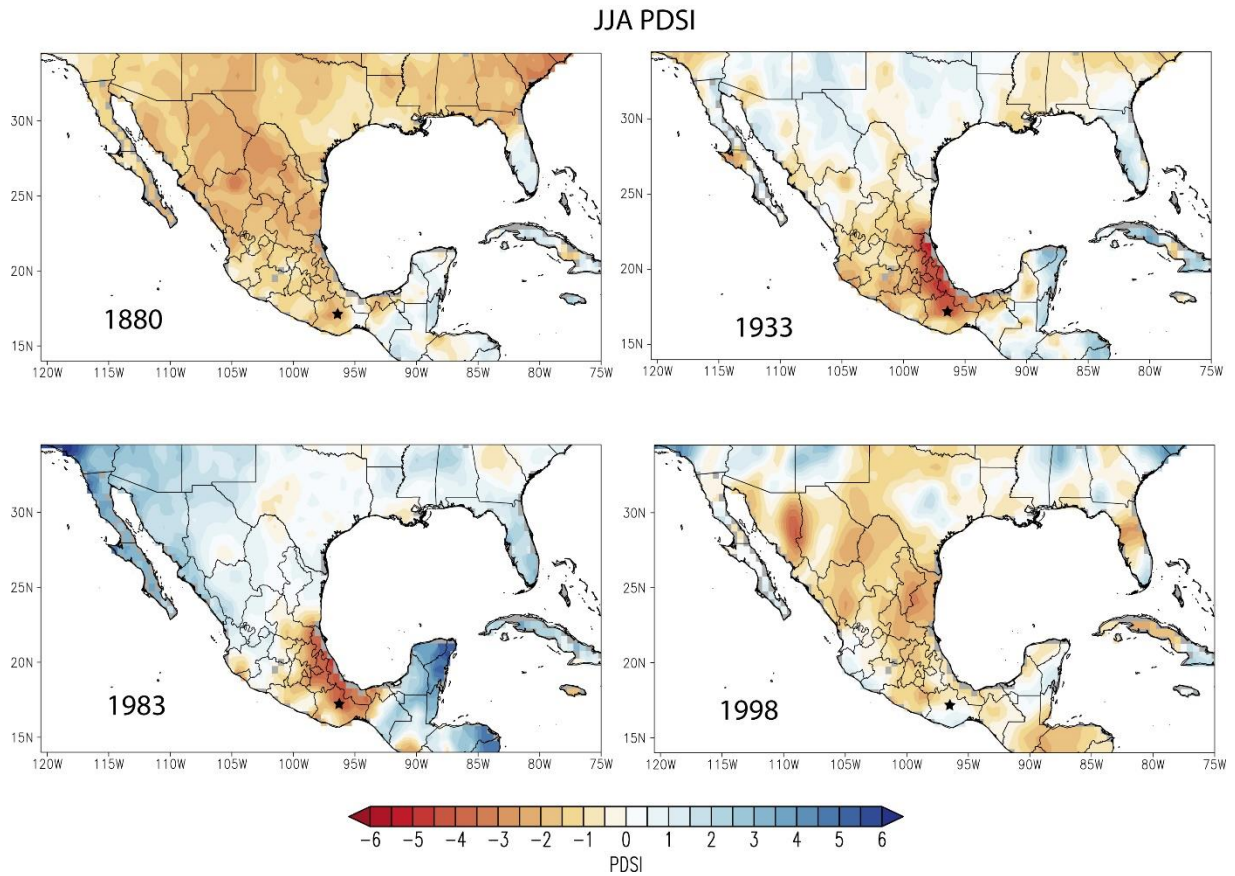


Figura 1. 7. Mapas de sequías generados con el Atlas de sequía para México (MXDA) (Stahle *et al.*, 2016). Condiciones de sequías en el sur de México y su coincidencia con los años más extremos de las sequías reconstruidas con *Abies guatemalensis* en Ixtlán de Juárez Oaxaca. Los valores -6 (color rojo) y 6 (color azul) en la escala PDSI indican condiciones de sequía extrema y humedad extrema. La estrella negra en los mapas muestra el área de estudio.

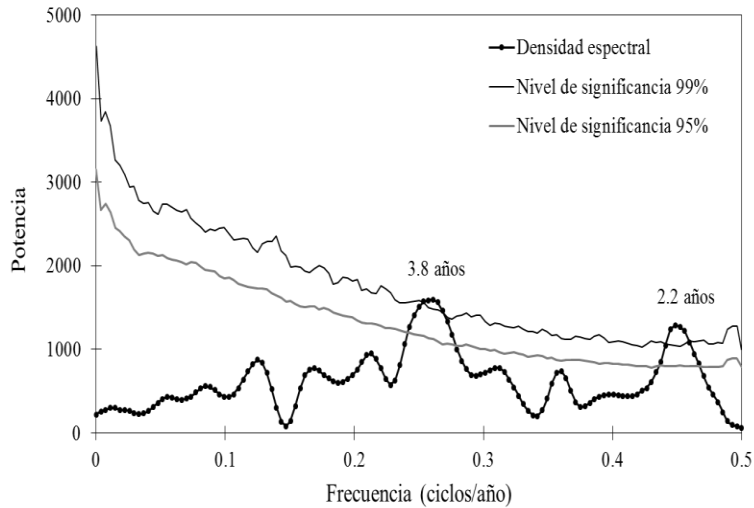


Figura 1. 8. Densidad espectral para la reconstrucción de la P_{MFA} (1880-2015) en la región de Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

1.6.5 Influencia de fenómenos circulatorios

La correlación entre los diferentes índices de ancho de anillo (EWI, LWI, RWI) de *A. guatemalensis* y los índices climáticos fueron bajos (Cuadro 1.3). Los índices SST 3.4 y TRI expresaron una asociación negativa significativa con la cronología de anillo total versión residual para el período estacional febrero-marzo ($r = -0.365$, $p < 0.05$) y para el mes de mayo ($r = -0.191$, $p < 0.05$), respectivamente. De igual manera, el índice MEI manifestó una relación negativa con la cronología de madera temprana versión estándar (EWI_STD) para el mes de febrero ($r = -0.276$, $p < 0.05$). Una correlación positiva se manifestó con AMO y la cronología de madera tardía versión residual (LWI_RES) para período estacional enero febrero ($r = 0.259$, $p < 0.05$). Por lo que respecta al PDO no se presentó asociación significativa con las series de anillo total para el mes de febrero ($r = -0.164$, $p > 0.05$).

Cuadro 1. 3. Asociación entre las cronologías de *Abies guatemalensis* en Ixtlán de Juárez Oaxaca y los diferentes índices de fenómenos de circulación global.

Fenómeno circulatorio	Índice	Cronología	Período (años)	Meses	Correlación (p < 0.05)
	SOI	RWI_RES	1880-2015	febrero-mayo	-0.182
	MEI	EWI_STD	1880-2005	enero-febrero	-0.276
	MEI	RWI_RES	1880-2005	enero-febrero	-0.224
ENSO	Niño 3.4 SST	RWI_RES	1880-2015	febrero-marzo	-0.365
	Niño 3.4 SST	EWI_STD	1880-2015	febrero	-0.248
	TRI	RWI_RES	1894-1995	mayo	-0.191
PDO	PDO	RWI_RES	1900-2015	febrero	-0.164NS
AMO	AMO	LWI_RES	1887-2011	enero-febrero	0.259

NS: no significativo.

1.7 Discusión

Con base en los parámetros dendrocronológicos descritos, que manifiestan una señal climática común entre las series de *A. guatemalensis*, es posible catalogar a esta especie con potencial dendrocronológico para reconstrucciones climáticas. La correlación entre series y la sensibilidad media en este estudio fue similar al obtenido por Anchukaitis *et al.* (2013) (0.523, 0.244) en *A. guatemalensis* en la Sierra de los Cuchumatanes, Guatemala y a los reportados por Huante *et al.* (1991) (0.55, 0.15); Cerano *et al.* (2014) (0.47, 0.37) y Carlón *et al.* (2016) (0.54, 0.22) en *A. religiosa* en Michoacán, México. Sin embargo, estos

parámetros son inferiores a los de *Pseudotsuga menziesii* (0.71, 0.37) (Cerano-Paredes *et al.*, 2012) y *Pinus cembroides* (0.72, 0.30) (Constante-García *et al.*, 2009), especies reconocidas por su alto potencial dendrocronológico para reconstrucciones paleoclimáticas.

Los factores climáticos a los cuales responde positivamente el crecimiento de *A. guatemalensis* en la Sierra Norte de Oaxaca, fue a la precipitación acumulada febrero-abril; mientras que su respuesta es negativa a la temperatura máxima de marzo-mayo. En consecuencia, si las condiciones de precipitación al finalizar el invierno y principios de la primavera no son las adecuadas, un aumento en la temperatura durante la estación de primavera incrementaría la evapotranspiración y disminuiría la humedad del suelo, limitando así en el crecimiento radial (Dawadi *et al.*, 2013; Thapa *et al.*, 2015). En cambio, un año con alta precipitación estacional febrero-abril, favorecerá el crecimiento por su influencia directa en la disponibilidad de humedad del suelo, compensando así la pérdida de agua por el proceso de evapotranspiración (Li *et al.*, 2006).

La respuesta climática obtenida de *A. guatemalensis* en esta investigación es consistente a la reportada por Anchukaitis *et al.* (2013) para la misma especie. Así mismo, diferentes estudios dendroclimáticos realizados para *A. religiosa* en Michoacán, México, han indicado una relación positiva con la precipitación invierno-primavera y una respuesta negativa con la temperatura invernal del año previo y la temperatura de primavera del año actual de crecimiento (Huante *et al.*, 1991; Cerano *et al.*, 2014; Carlón *et al.*, 2016). Igualmente, otras especies de coníferas en el norte y noreste de México como *P. menziesii* (Villanueva *et al.*, 2015), *P. durangensis* Martínez, *P. cooperi* C.E. Blanco y *P. lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald (Chávez-Gándara *et al.*, 2017) han mostrado una respuesta climática positiva a la precipitación invierno-primavera. La similitud en la respuesta climática mostrada por las coníferas en las diferentes regiones de México, puede ser indicativo de

que fenómenos climáticos de amplio impacto pueden provocar las condiciones climáticas dominantes que caractericen la variabilidad observada en dicho período estacional; uno de estos fenómenos de amplio alcance es ENSO (Stahle *et al.*, 2011).

Los valores positivos de CE y RE en los dos subperíodos de verificación expresaron la potencia predictiva y la estabilidad del modelo de regresión (Cook *et al.*, 1999). El valor del estadístico DW para el período completo fue cercano a 2 lo que revela que no hay autocorrelación significativa en los residuales anuales del modelo de regresión (Durbin y Watson, 1950). El modelo explicó el 44 % de la variabilidad de la precipitación estacional febrero-abril, valor que fue superior al reportado por Anchukaitis *et al.* (2015) en la reconstrucción de la precipitación estacional enero-marzo con anillos anuales de *A. guatemalensis* donde el modelo capturó el 30 % de la variabilidad.

Aunque la precipitación del período estacional reconstruido (febrero-abril), sólo representa el 6 % del total anual, estos resultados coinciden con los períodos de sequía documentados en el estado de Oaxaca, como la ocurrida en 1885, registrada como una de las sequías más severas en el siglo XIX provocando pérdidas en las cosechas (Mendoza, Velasco y Jáuregui, 2006). Las sequías ocurridas en las décadas de 1940, 1950, 1960, 1970 que afectaron casi todo el país (Florescano *et al.*, 1980), también fueron registradas en otros estudios climáticos realizados en el norte y centro del país (Therrell *et al.*, 2006; Cerano *et al.*, 2014; Villanueva *et al.*, 2015). Otra sequía importante registrada en los últimos años de escala nacional fue la acontecida en 1998, misma que afectó la región oeste del país (Cerano *et al.*, 2014) y la del 2011 calificada como la peor sequía en las últimas siete décadas para los estados del norte y centro del país, incidiendo en 60 % del territorio mexicano (Domínguez, 2016). Al contrario, los años en que se presentaron lluvias atípicas

fueron 1934, 1949, 1954, 1985, 1990 y 2004, mismas que fueron registradas en la reconstrucción.

Los períodos significativos de la reconstrucción (2.2 y 3.8 años), se sitúan dentro de los picos espectrales (2-8 años) que caracterizan la variabilidad de la oscilación del fenómeno de ENSO (Santoso *et al.*, 2017), sugiriendo una posible vinculación con la variabilidad interanual de la precipitación local. De la misma manera, los cuasi-ciclos de 2-3 años podrían estar relacionados con la oscilación cuasi-bienal (Labitzke y Van Loon, 1999). La correlación entre el índice Niño 3.4 SST y la cronología residual del anillo total indicó una influencia negativa en el crecimiento radial y en la reconstrucción de la precipitación estacional. Los años considerados como eventos de El Niño moderados (1963, 1968, 1976, 1977, 1987, 1994, 2002 y 2006) a intensos (1973, 1983, 1991 y 1998) (Santoso *et al.*, 2017), la precipitación estacional febrero-abril disminuyó en un 21.37 % y 47.29 % con respecto a la media (57.59 mm), en tanto que el crecimiento se redujo con un valor de índice de ancho de anillo anual menor al promedio (<1.0).

Los ciclos de alta frecuencia asociados con ENSO como uno de los factores que influyen en la variación local de sequías y humedad, han sido registradas en otras reconstrucciones de precipitación en el norte y centro de México (Cerano *et al.*, 2014; Villanueva *et al.*, 2015). Las anomalías secas y cálidas durante los eventos del Niño afectan el crecimiento de los árboles, de tal forma que favorecen una mayor presencia de lluvia en la estación invierno-primavera en el norte y condiciones de sequía durante el verano en centro y sur de México (Méndez y Magaña; 2010). El fenómeno climático de escala global que ha tenido importantes efectos en la precipitación de México es ENSO (Magaña *et al.*, 2003); en la región sur del país, este fenómeno en su fase cálida (El Niño) tiene efectos negativos en la precipitación de verano y en su fase fría (La Niña) incrementa la

precipitación de invierno. Estudios realizados en el sur de México sobre reconstrucciones de sequías han demostrado que la variabilidad climática en esta región está influenciada por patrones climáticos de gran escala en particular con ENSO. Mendoza *et al.* (2006) al correlacionar una serie de tiempo de sequías (1502-1899) con el SOI se observó que 38 % de las sequías en Oaxaca estaban relacionadas con eventos de El Niño. De igual forma, Liverman (1999) encontró que las sequías de 1957-1958, 1977, 1982-1983 y 1987 en Oaxaca están asociadas con los valores bajos del SOI especialmente con los eventos del El Niño, donde las condiciones más secas que el promedio en el sur de México ocurren durante los años en el que el SOI cambia de signo de positivo a negativo y cuando las anomalías en la temperatura de la superficie del mar del Pacífico ecuatorial y oriental se vuelven fuertemente positivas (Kiladis y Diaz, 1993).

Los ciclos multidecadales de baja frecuencia asociados a los fenómenos circulatorios globales como el PDO y AMO no fueron significativos en la reconstrucción, probablemente debido a la corta longitud de la serie reconstruida (136 años). La influencia del PDO ha sido registrada en el noroeste de México modificando la precipitación de primavera y verano; mientras que cada cambio en el comportamiento de AMO altera los patrones de la precipitación invernal en el noreste del país (Alvarez- Olgún y Escalante- Sandoval, 2017).

Información importante para los administradores y planificadores de los recursos naturales, estudios hidrológicos y ecológicos. Las reconstrucciones realizadas con especies del género *Abies*, permitió analizar con mayor detalle la intensidad y extensión de fenómenos circulatorios que afectan esta región de México.

1.8 Conclusiones

Los parámetros dendrocronológicos obtenidos de las series de anillo total, madera temprana y madera tardía de *Abies guatemalensis* indicaron un fechado confiable y una señal de crecimiento común entre árboles. La precipitación de invierno-primavera y la temperatura máxima de primavera fueron las variables climáticas que afectaron el incremento radial anual de *Abies guatemalensis*. La serie dendrocronológica desarrollada permitió reconstruir la variabilidad interanual de la precipitación de febrero-abril, resaltando los períodos secos y húmedos en la zona de Ixtlán, Oaxaca durante los últimos 136 años (1880-2015). Las sequías en esta región de México están vinculadas con los sistemas de circulación atmosférica como ENSO.

La sensibilidad interanual y multianual de los índices de ancho de anillo y su asociación con variables climáticas como precipitación y temperatura, indican que *A. guatemalensis* tiene potencial para reconstruir la variabilidad hidroclimática del pasado más allá de los datos instrumentales disponibles.

1.10 Literatura Citada

- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). An Updated Review of Dendrochronological Investigations in Mexico, a Megadiverse Country with a High Potential for Tree-Ring Sciences. *Forests*, 8(5), 160.
- Alvarez- Olguin, G., & Escalante- Sandoval, C. (2017). Modes of variability of annual and seasonal rainfall in Mexico. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 144-157.
- Anchukaitis, K. J., Taylor, M. J., Leland, C., Pons, D., Martin-Fernandez, J., & Castellanos, E. (2015). Tree-ring reconstructed dry season rainfall in Guatemala. *Climate dynamics*, 45(5-6), 1537-1546.
- Anchukaitis, K. J., Taylor, M. J., Martin-Fernandez, J., Pons, D., Dell, M., Chopp, C., & Castellanos, E. J. (2013). Annual chronology and climate response in *Abies*

- guatemalensis* Rehder (*Pinaceae*) in Central America. *The Holocene*, 23(2), 270-277.
- Bernal-Salazar, S., Terrazas, T., y Alvarado, D. (2004). Impact of air pollution on ring width and tracheid dimensions in *Abies religiosa* in the Mexico City Basin. *Iawa Journal*, 25(2), 205-215.
- Bunn, A. G. (2010). Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*, 28(4), 251-258.
- Carlón A. T., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D. R., Villanueva-Díaz, J., & Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the monarch butterfly biosphere reserve, central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103-116.
- Cerano J. P., Díaz, J. V., Martínez, R. C., Selem, L. V., Caciono, R. T., & De la Cruz, V. G. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2014(83), 41-54.
- 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*, 2(10), 7-23.
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E. H., & Valencia-Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17-39.
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37-59.
- Cook, E. R., Meko, D. M., Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (1999). Drought reconstructions for the continental United States. *Journal of Climate*, 12(4), 1145-1162.
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., Cambrón-Sandoval, V. H., Cruz-Cobos, F. & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 38(2), 387-399.
- Dawadi, B., Liang, E., Tian, L., Devkota, L. P., & Yao, T. (2013). Pre-monsoon precipitation signal in tree rings of timberline *Betula utilis* in the central Himalayas. *Quaternary International*, 283, 72-77.
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 77-93.

- Durbin, J., & Watson, G. S. (1950). Testing for serial correlation in least squares regression: I. *Biometrika*, 37(3/4), 409-428.
- Florescano M. E., Sancho J. C., & Gavilán D. P. 1980. Las sequías en México: historia, características y efectos. *Comercio Exterior* 30:747-757.
- Frank, D., Esper, J., Zorita, E., & Wilson, R. (2010). A noodle, hockey stick, and spaghetti plate: a perspective on high- resolution paleoclimatology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(4), 507-516.
- Gaire, N. P., Bhujju, D. R., Koirala, M., Shah, S. K., Carrer, M., & Timilsena, R. (2017). Tree-ring based spring precipitation reconstruction in western Nepal Himalaya since AD 1840. *Dendrochronologia*, 42, 21-30.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Ciudad de México, México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Hare, S.R. & Mantua, N.J. (2000). Empirical evidence of North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography*, 47(2-4), 103-145.
- Holmes, R.L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69-78.
- Huante, P., Rincón, E., & Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin*. 51:15-28.
- IMTA. (2013). Estaciones climáticas extraído de ERIC III (Extractor Rápido De Información Climática). 1 Cd. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2010). Compendio de información geográfica municipal Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx>
- Islebe, G. A., Velázquez, A., & Cleef, A. M. (1995). High elevation coniferous vegetation of Guatemala. *Vegetatio*, 116 (1), 7-23.
- Kiladis, G. N. & Diaz, H. F. 1993. ENSO and precipitation variability over Mexico during the last 90 years. En Redmond, K. T. & Tharp, V L. (eds.). Proceedings of the Ninth Annual Pacific Climate Workshop (PACCLIM) Workshop, 21-24 April, 1992, California Department of Water Resources, Interagency Ecological Studies Program, Technical Report 34.
- Labitzke, K. G., & van Loon, H. (2012). *The stratosphere: phenomena, history, and relevance*. Springer: Berlin.180 p.

- Li, J., Gou, X., Cook, E. R., & Chen, F. (2006). Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in northwest China. *Geophysical Research Letters*, 33(7).
- Liverman, D. M. (1999). Vulnerability and adaptation to drought in Mexico. *Natural Resources Journal*, 99-115.
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313-330.
- Mann, M. E., & Lees, J. M. (1996). Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Climatic Change*, 33(3), 409-445.
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069-1079.
- Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175-1188.
- Mendoza, B., Velasco, V., & Jáuregui, E. (2006). A study of historical droughts in southeastern Mexico. *Journal of Climate*, 19(12), 2916-2934.
- Pérez-Morga, N., Kretzschmar, T., Cavazos, T., Smith, S. V., & Munoz-Arriola, F. (2013). Variability of extreme precipitation in coastal river basins of the southern Mexican Pacific region. *Geofísica Internacional*, 52(3), 277-291.
- R Development Core Team (2017). R: a Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ramírez, M. N., & González E. M. (2015). Distribución, variación morfológica-genética, manejo y conservación de *Abies guatemalensis*. En M.R. Pineda L., L.R. Sánchez V. & J.C. Noa-Carrazana (eds.), *Ecología, Biotecnología y conservación del género Abies en México* (pp. 186-205). Editorial Académica Española, Saarbrücken, Alemania.
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, C. E., & Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14).
- Ropelewski, C. F., & Jones, P. D. (1987). An extension of the Tahiti–Darwin southern oscillation index. *Monthly Weather Review*, 115(9), 2161-2165.
- Santoso, A., McPhaden, M. J., & Cai, W. (2017). The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079-1129.

- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press. Tucson, AZ.
- Stahle, D. W., Villanueva D. J., Burnette, D. J., Cerano P. J., Heim, R. R., Fye, F. K., Acuna S., Therrell M. D. Cleaveland, M.K. & Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38(5).
- Stahle, D.W., Cook, E.R., Burnette, D.J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J.N., Griffin, D., Cook, B.J., Acuña, R., Torbenson, M.C.A, Szejner, P. & Howard, J.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 Review*, 149, 34-60.
- Sun, C., Liu, Y., Song, H., Mei, R., Payomrat, P., Wang, L., & Liu, R. (2018). Tree- ring- based precipitation reconstruction in the source region of Weihe River, northwest China since AD 1810. *International Journal of Climatology*, 38(8), 3421-3431.
- Thapa, U. K., Shah, S. K., Gaire, N. P., & Bhujju, D. R. (2015). Spring temperatures in the far-western Nepal Himalaya since AD 1640 reconstructed from *Picea smithiana* tree-ring widths. *Climate dynamics*, 45(7-8), 2069-2081.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Diaz, J. V., Oviedo, E. H. C., & Cleaveland, M. K. (2006). Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474–2001. *Climatic Change*, 74(4), 493.
- Van Oldenborgh, G.J., Te Raa, L.A., Dijkstra, H.A. & Philip, S.Y. (2009). Frequency- or amplitude-dependent effects of the Atlantic meridional overturning on the tropical Pacific Ocean. *Ocean Science*, 5 (3), 293-301.
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Fulé, P. Z., Cortés, M. C., Vázquez, S. 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*, (87), 141-153.
- Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201-213.
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (1998). Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank?. *Weather*, 53(9), 315-324.
- Wright, P. B. (1979). Persistence of rainfall anomalies in the central Pacific. *Nature*, 277(5695), 371.
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy- climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431-436.

Zhang, Z. (2015). Tree-rings, a key ecological indicator of environment and climate change. *Ecological Indicators*, 51, 107-116.

CAPÍTULO II. INFLUENCIA CLIMÁTICA EN EL CRECIMIENTO DE *Abies religiosa* EN LA SIERRA JUÁREZ DE OAXACA, MÉXICO

2.1 Resumen

El entendimiento de las relaciones entre el clima y el crecimiento de los bosques de alta montaña permitirá evaluar su respuesta climática ante los efectos del cambio climático global y de esta forma, proponer estrategias de conservación y manejo. En el presente estudio, se desarrolló la primera cronología de ancho de anillo de *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. & Cham. en la Sierra Juárez de Oaxaca, México, que abarcó un período de 314 años (1702-2015). Para determinar que variables climáticas controlan el crecimiento de los árboles, se realizó un análisis de correlación mensual, estacional y anual entre la cronología de ancho de anillo y las variables climáticas locales (precipitación, temperatura e índices de sequía) y los modos a gran escala de la variabilidad climática (ENSO, PDO, AMO). Se observó una correlación positiva significativa con la precipitación de invierno-primavera y una correlación negativa significativa con la temperatura máxima de primavera del año en curso, expresando que la disponibilidad de agua en primavera es el principal controlador en la variabilidad del crecimiento anual. Igualmente, la cronología de ancho de anillo mostró una correlación negativa con la temperatura de la superficie del mar (SST) del Pacífico tropical oriental, y con el Índice Multivariado del ENSO (MEI) y el Índice Oscilación del Sur (SOI) durante invierno-primavera, revelando una influencia en el crecimiento arbóreo mediante la teleconexión con este fenómeno. Los resultados obtenidos permiten una mejor comprensión de la respuesta de los bosques de *A. religiosa* a la variabilidad climática del pasado y en relación con futuros escenarios de cambio climático. La sensibilidad climática registrada en los anillos expresa su potencial para reconstruir las variaciones climáticas en los bosques de alta montaña del sur de México.

Palabras clave: Bosques de montaña, Crecimiento radial, Dendrocronología, ENSO, Variabilidad climática.

2.2 Summary

Understanding the relationship between climate and growth of high-elevation forests allows for the assessment of their response to the effects of global climate change in order to propose proper conservation and management strategies. In the present study, the first ring width chronology of *Abies religiosa* (Kunth) Schltl & Cham., was developed in the Sierra Juarez of Oaxaca, Mexico, spanning a period of 314 years (1702-2015). A monthly, seasonal and annual correlation analysis between the ring-width chronology and local climate variables (precipitation, temperature and drought indices) and large-scale climatic drivers (ENSO, PDO, AMO) was performed to determine the most influential climatic variables on growth. A significant positive correlation with winter-spring precipitation and a significant negative correlation with maximum spring temperature of the current year was observed, expressing that water availability in the spring season is the main controller factor of annual growth variability. Likewise, the ring-width chronology showed a negative correlation with sea surface temperature (SST) of eastern tropical Pacific, and with a Multivariate Index (MEI) of ENSO and with the Southern Oscillation Index (SOI) during winter-spring months, revealing a teleconnection with tree growth. The obtained results will allow for a better understanding of the response of *A. religiosa* forests to past climate variability and in relation to future climatic scenarios. The climate sensitive tree-ring series indicated potential to reconstruct climatic variations at the high-elevation forests of southern Mexico.

Keywords: Climate variability, Dendrochronology, ENSO, Mountain forests, Radial growth.

2.3 Introducción

Los bosques de montaña son de alta diversidad biológica y son considerados zonas de gran biodiversidad, con importancia ecológica como fuentes de agua y otros servicios ambientales para millones de personas que viven en su entorno (Sohar *et al.*, 2017; Panayotov *et al.*, 2019). Estos ecosistemas de montaña de latitudes tropicales son ecológicamente sensibles y vulnerables al cambio climático (La Sorte y Jetz, 2010), por lo cual son de alta prioridad en las estrategias de conservación a nivel global (Brooks *et al.*, 2006; Malhi *et al.*, 2014). Dado que los impactos proyectados por el cambio climático anticipan cambios ambientales importantes, los cuales incluyen variaciones en los patrones de precipitación y un incremento de la temperatura (Evans, 2019), así como un aumento en la probabilidad de eventos climáticos extremos a escalas local, regional y global (Yuan *et al.*, 2017; Auerbach *et al.*, 2018; Kharin *et al.*, 2018), es necesario implementar estrategias de manejo y conservación de estos ecosistemas, con base en el conocimiento detallado de las respuestas climáticas específicas de las especies arbóreas que los conforman (Bolte *et al.*, 2009; Elliott *et al.*, 2015; Altman *et al.*, 2017). Se considera que una de las mejores formas de evaluar la capacidad futura de las especies de árboles es un análisis retrospectivo de las respuestas del crecimiento del pasado con el clima (Zang *et al.*, 2014).

Los anillos de crecimiento de los árboles son archivos naturales que proveen información retrospectiva de la respuesta del crecimiento de los bosques a los cambios ambientales y climáticos (Peng *et al.*, 2008; Speer, 2010; Altman *et al.*, 2017; Sohar *et al.*, 2017), así como la distribución espacial de estas relaciones (Zhang y Alfaro, 2003). Por lo

anterior, el entendimiento de las relaciones entre el crecimiento radial de los árboles y el clima es importante para los estudios dendroecológicos y dendroclimáticos (Henderson y Grissino-Mayer, 2009), así como para observar las respuestas del crecimiento de los bosques al cambio climático (Zhang *et al.*, 2012; Altman *et al.*, 2017).

La Sierra Juárez forma parte de la Sierra Norte y es considerada como uno de los sistemas montañosos más diversos en el sur de México, derivado de su compleja fisiografía, que forma una gran variedad de micro-ambientes interconectados (Arriaga *et al.*, 2000). Este sistema montañoso posee diferentes tipos de vegetación, sobresaliendo los bosques de pino-encino y el bosque mesófilo de montaña, que registran tasas altas de biodiversidad (Del Castillo *et al.*, 2004; Meave *et al.*, 2006; Ponce-Reyes *et al.*, 2012). Algunos estudios sugieren, que la Sierra Norte de Oaxaca es un área clave para la protección inmediata de muchas especies endémicas ante los impactos negativos del cambio climático y los cambios ambientales actuales (Ponce-Reyes *et al.*, 2012; Rojas-Soto *et al.*, 2012). El ensamble de escenarios de cambio climático para esta región sugiere que para el 2050 la temperatura aumentará entre 1.5 y 2.5° C, y la precipitación variará entre +5 y -10 % en relación con la precipitación total anual actual, condiciones bajo las cuales, se restringiría la distribución de los géneros *Abies* y *Pinus* (Gómez-Mendoza *et al.* 2008). En este sentido, el pinabete (*Abies religiosa* Kunth Schltdl. et Cham.) es una especie nativa de las montañas centrales y sur de México, que se localiza entre los 17°30' y 20°00' de latitud norte y los 97°104' de longitud oeste, y crece en altitudes desde 2500 a 4100 m. Estos bosques son considerados de importancia ecológica y económica, ya que son proveedores de madera, leña, árboles de ornato, protección de cuencas hidrográficas y hábitat para la vida silvestre (Malhi *et al.*, 2014).

Sin embargo, los principales estudios de la relación entre el crecimiento radial de *A. religiosa* y el clima, sólo se han realizado en la región oeste de México (Huante *et al.*, 1991; Bernal-Salazar *et al.*, 2000; Cerano *et al.*, 2014; Carlón *et al.*, 2016), y sugieren la existencia de potencial de esta especie en estudios de dendroclimatología. No obstante, los estudios dendrocronológicos de *A. religiosa* en los bosques de alta montaña en el sur de México no existen, por lo que es necesario investigar la relación de su crecimiento radial con el clima local a lo largo del tiempo para poder establecer estrategias de conservación y manejo de estos bosques en respuesta a los diferentes escenarios futuros del cambio climático global.

Los objetivos de este estudio fueron: (i) desarrollar una cronología de ancho de anillo de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., y (ii) analizar la relación entre crecimiento radial y la variabilidad climática a escala local, regional y a gran escala en la Sierra Juárez de Oaxaca, México.

2.4 Materiales y métodos

2.4.1 Sitios de muestreo

El estudio se realizó en las montañas de la Sierra Juárez del estado de Oaxaca, en el sur oeste de México (17.6-16.98°N, 96.81-96.11°W) (Figura 2.1). La Sierra Juárez forma parte de la Sierra Madre Oriental de México en el sur después de su unión con el Eje Volcánico Transversal. Este sistema montañoso es caracterizado por una topografía accidentada con una gran variedad de micro-ambientes (Gómez-Mendoza *et al.*, 2008), lo que ha favorecido la formación de áreas para la biodiversidad, manejo forestal y ecoturismo. El clima de la región es templado subhúmedo con lluvias en verano C (w2), temperatura media anual

entre 12 °C y 18 °C, temperatura de los meses más frío (diciembre-febrero) entre -3 °C y 18 °C y temperatura del mes más caliente (abril) por debajo de 28 °C (García, 2004; Figura 2.2). La precipitación total anual es de 809 mm, la mayor cantidad se registra en verano (junio-septiembre) con una disminución de lluvias y un incremento en las temperaturas en julio y agosto, período que es denominado como “canícula”. La precipitación invernal sólo aporta del 5% al 10.2 % de la precipitación total anual.

Los suelos en el área de estudio son calcáreos y arcillosos, en particular cambisoles y litosoles (INEGI, 2000a). La vegetación predominante en las montañas altas de la Sierra Juárez de Oaxaca son los bosques templados que incluyen los bosques de pino-encino (de 2000-3200 msnm), bosques de encino y encino-pino (1400-2000 msnm) y bosques mesófilos de montaña (de los 1000-2600 msnm) (INEGI, 2000b). Dentro de las principales especies arbóreas asociadas *A. religiosa* se encuentran *Pinus oaxacana* Mirov, *P. rudis* Endl., *P. ayacahuite* C. Ehrenb. ex Schltdl., *P. leiophylla* Schiede. ex Schltdl. & Cham., *P. patula* Schltdl. & Cham. y encinos como *Quercus dysophylla* Benth. , *Q. laurina* Bonpl., *Q. ocoteifolia* Liebm.; arbustos como *Arbutus xalapensis* Kunth, *Arctostaphylos pungens* Kunth, *Pernettya prostrata* (Cav.) DC, *Litsea glaucescens* Kunth. El manejo forestal comunal es la actividad preponderante en las comunidades de esta zona; sin embargo, la falta de regulación de las actividades agrícolas está afectando las áreas forestales (Klooster y Masera, 2000; Gómez-Mendoza *et al.*, 2006).

El Pinabete u oyamel es una conífera nativa del centro y sur de México, y se distribuye en las altas montañas cerca del límite superior de la vegetación arbórea (entre 2400 y 3600 msnm) (Cuevas-Guzmán *et al.*, 2011). Los árboles de esta especie crecen hasta 1.80 m de diámetro normal y de 35 a 40 m de altura. En general, estos bosques se presentan en manchones aislados, muchas veces restringidos a un cerro, a una ladera o a una cañada,

protegidos de la acción de vientos fuertes y de insolación intensa (Madrigal, 1967; Rzedowski, 2006). Esta especie se desarrolla en condiciones de humedad, es muy resistente al frío, en rangos de temperatura media anual entre 7 y 15 °C, máxima de 25 °C y una precipitación anual alrededor de 1000 mm o más (Rzedowski, 2006).

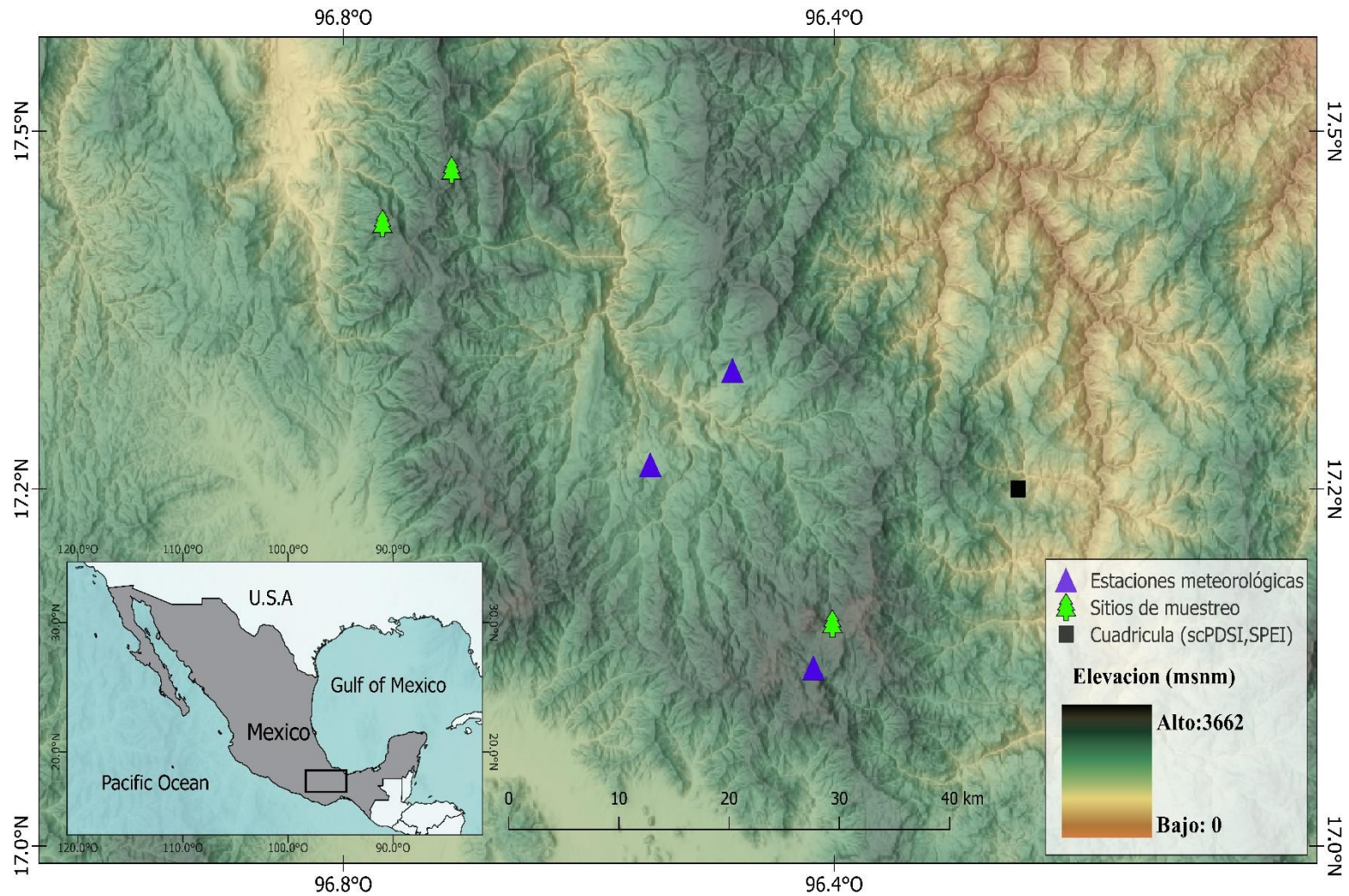


Figura 2. 1.Región de estudio que muestra los sitios de muestreo de *Abies religiosa*, estaciones meteorológicas y puntos de cuadrícula de la unidad de investigación climática (CRU) en la Sierra Juárez de Oaxaca, región sur de México.

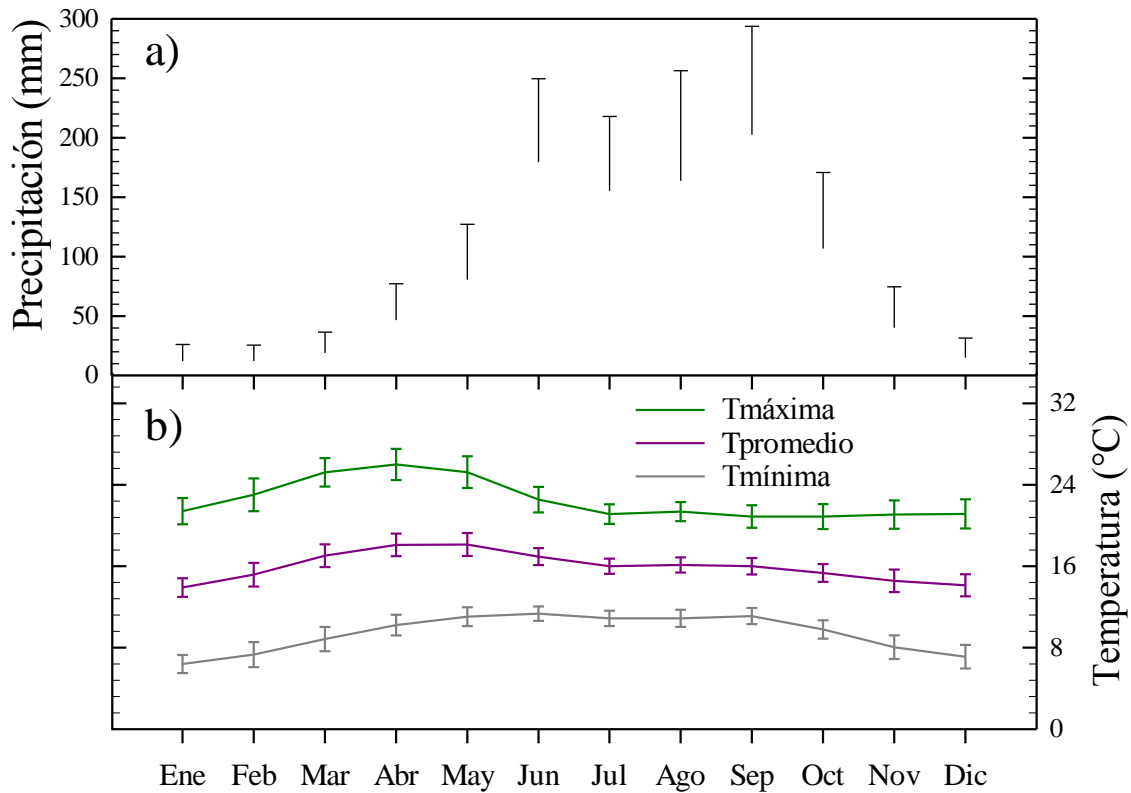


Figura 2. 2. Diagrama climático del área de estudio para el período de 1956-2013. Se muestran la temperatura (máxima, promedio, mínima) y la precipitación mensual. Los registros climáticos fueron promediados de las estaciones Atepec, Estudiante, Ixtlán y Telixtlahuaca. Las barras muestran la desviación estándar.

2.4.2 Muestreo de árboles

Se establecieron tres sitios de muestreo en un intervalo altitudinal de 2500 a 3100 m (Cuadro 2.1; Figura 2.3). Se obtuvieron de dos a tres núcleos de incremento por árbol en cada sitio, a una altura de 1.30 m, utilizando un barrenador de incremento Pressler marca Haglöf (Cuadro 2.1). La obtención de núcleos múltiples permitió medir anillos en al menos dos radios diferentes, lo que posibilita corregir las variaciones radiales en el incremento del

diámetro y facilita la detección de anillos muy estrechos y parcialmente faltantes (Stokes y Smiley, 1968). En total se obtuvieron 145 núcleos de incremento provenientes de 70 árboles en los tres sitios de muestreo.

2.4.3 Procesamiento de las muestras

Los núcleos de incremento fueron procesados en el laboratorio, por medio de técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968; Speer, 2010); todas las muestras se montaron en molduras de madera, se secaron al aire y se lijaron hasta que los límites de los anillos de los árboles fueran visibles. Las muestras se fecharon de manera visual y luego se obtuvo el ancho de anillo utilizando un sistema de medición Velmex con una resolución de 0.001 mm. La precisión del fechado de las series individuales de ancho de anillo, se realizó con el programa de computo COFECHA para detectar anomalías en el crecimiento del anillo, tales como errores de medición, anillos faltantes o falsos (Holmes, 1983). Las series de anillo del árbol que mostraron una correlación débil con la serie maestra, se eliminaron antes del desarrollo de la cronología final para robustecer la señal climática.

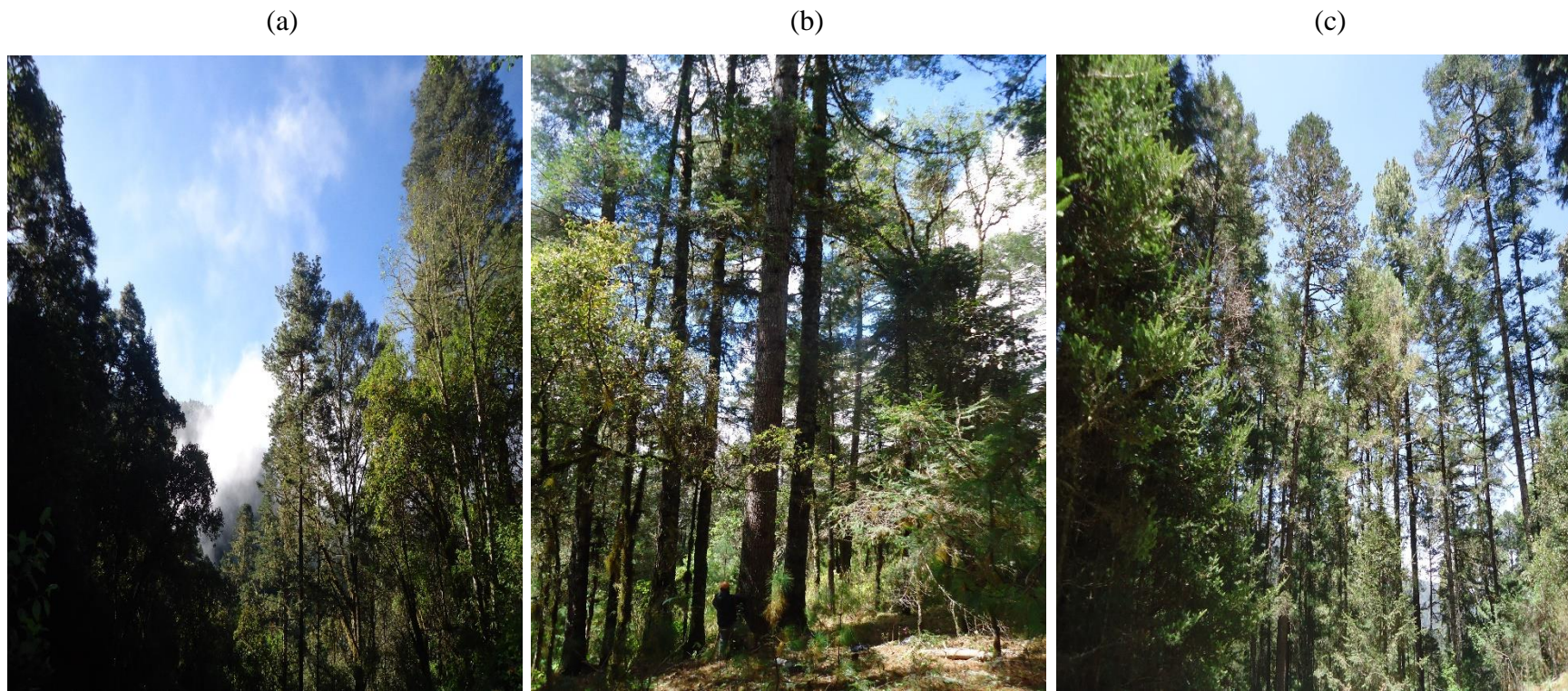


Figura 2. 3. Sitios de muestro para la obtención de núcleos de crecimiento de *Abies religiosa* en la Sierra Juárez de Oaxaca, México. a) San Juan Bautista Jayacatlán, b) San Miguel Aloápam y c) San Juan Atepec Llano de Flores.

Cuadro 2. 1. Localización geográfica y características de los sitios de muestreo de *Abies religiosa* y de las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis dendroclimático en la Sierra Juárez de Oaxaca, México.

Sitio/estación meteorológica	Latitud (°N)	Longitud (°W)	Elevación (msnm)	Aspecto	Número de virutas	Período
Jayacatlán	17.43	96.76	2500	NE	18	1880-2014
Aloápam	17.47	96.71	3000	NE	27	1702-2015
Llano de Flores	17.15	96.40	3100	NE	34	1850-2015
Telixtlahuaca	17.30	96.90	2260			1961-2013
Estudiante	17.13	96.62	3034			1982-2013
Atepec	17.43	96.55	1975			1956-1984/2000-2013
Ixtlán	17.33	96.48	2312			1956-1984/200-2013

2.4.4 Estandarización y desarrollo de la cronología

Cada serie de ancho de anillo fue estandarizada ajustando un spline de 20 años dependiente de la edad con el programa de computo ARSTAN (Cook y Holmes, 1986), para eliminar las tendencias de crecimiento biológicas y geométricas resultantes de competencia entre los árboles y de la dinámica del rodal, y para preservar las variaciones relacionadas con el clima. Los índices de ancho de anillo sin dimensiones se calcularon dividiendo la medición de ancho de anillo de cada año por el valor de la curva de ajuste (Cook, 1987) y, las series resultantes, fueron pre-blanqueadas a través de modelos autorregresivos para eliminar la autocorrelación temporal. Por último, la cronología final se desarrolló calculando una función de media bi-ponderada a las series de índices de ancho de anillo para minimizar los impactos de los valores atípicos (Cook y Kairiukstis, 1990). La cronología residual fue elegida para los análisis posteriores, ya que elimina el efecto de la autocorrelación y la influencia del crecimiento radial del año anterior del árbol, por lo que la varianza interanual remanente puede atribuirse a factores exógenos (Cook y Peters, 1997).

La calidad de la cronología fue evaluada con estadísticos descriptivos, tales como correlación media entre árboles (R_{bar}), sensibilidad media (MS), autocorrelación de primer orden (AC1), relación señal-ruido (SNR) y señal expresada de la población (EPS). El R_{bar} evalúa la señal de crecimiento común durante un período de tiempo dado, la MS describe el cambio porcentual medio de cada valor de anillo anual medido al siguiente, AC1 evalúa la influencia del crecimiento del año previo sobre el crecimiento del año actual (Fritts, 1976; Briffa y Jones 1990). El EPS indica el grado en que el tamaño de la muestra con que se generó la cronología es representativo de una población teórica con un número infinito de

individuos. Un umbral de 0.85 del EPS es considerado con calidad satisfactoria de la cronología (Wigley *et al.*, 1984). En este estudio, el EPS y el R_{bar} fueron calculados en ventanas móviles de 30 años con una superposición de 15 años, con el fin de detectar los cambios de intensidad de los patrones de crecimiento de los árboles a lo largo del tiempo.

2.4.5 Datos climáticos

Los datos instrumentales del clima fueron descargados de la red de estaciones climatológicas de México (CONAGUA) y del programa Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) (IMTA, 2013). Los registros mensuales de precipitación promedio, temperatura máxima, temperatura promedio y temperatura mínima fueron obtenidos de cuatro estaciones más cercanas al área de estudio para el posterior análisis de correlación con el crecimiento radial del árbol (Cuadro 2.1).

Además, el índice de severidad de sequía de Palmer auto-calibrado (scPDSI, por sus siglas en inglés) y el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) fueron seleccionados para evaluar la influencia combinada de la temperatura y la precipitación en el crecimiento de los árboles. Los datos mensuales del scPDSI y SPEI se obtuvieron del sistema de cuadrículas global CRU scPDSI 3.25 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/>) y CSIC SPEI mensual (<http://sac.csic.es/spei/index.html>) con una resolución espacial de medio grado, utilizando el KNMI Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>). El SPEI es una extensión del SPI (Índice de precipitación estandarizado; Mckee *et al.*, 1993) combina los aspectos de escalas de tiempo múltiples del SPI con información sobre la evapotranspiración, lo que lo hace más confiable para los estudios de cambio climático. Una limitación del SPEI es su sensibilidad al método de cálculo de la evapotranspiración potencial (PET) (Vicente-

Serrano *et al.*, 2010). Por otro lado, el scPDSI se basa en los conceptos de oferta y demanda de la ecuación del balance hídrico. Se calcula con base en los datos de precipitación y temperatura, como también en el contenido de agua del suelo. Sus desventajas incluyen la no comparabilidad entre regiones y características de escala de tiempo múltiples faltantes (Dai *et al.*, 2004; Wells *et al.*, 2004). Los puntos de la cuadrícula del scPDSI y SPEI más cercanos a los tres sitios de muestreo fueron promediados y utilizados en este estudio (17.25 N, W y 96.75 W, 17.25 N, 96.75 W). Debido a que los registros instrumentales del clima en la región de estudio únicamente se encuentran disponibles después de la década de 1960, sólo se utilizaron los datos scPDSI y SPEI para el período de 1960 a 2015.

2.4.6 Relación entre crecimiento del árbol y clima

Para determinar la influencia climática local en el crecimiento radial de *A. religiosa*, se calculó una función de correlación de Pearson entre las variables climáticas y los índices de sequía con la cronología de ancho de anillo. Dado que el crecimiento radial con frecuencia exhibe una influencia con las condiciones climáticas un año antes de la formación de un anillo anual (Fritts, 1976), los coeficientes de correlación fueron calculados de forma mensual, estacional y anual, abarcando una ventana de 14 meses de crecimiento desde septiembre del año previo (t-1) a octubre del año actual (t). Las funciones de correlación mensual se obtuvieron con los paquetes *bootRes* (Zang y Biondi, 2013) y *treeclim* (Zang y Biondi, 2015) del software estadístico R versión 3.8.1 (R Core Team, 2018), los cuales permitieron calcular intervalos de confianza para la significancia estadística de los coeficientes de correlación con base en 1000 muestras aleatorias con reemplazo a un nivel de confianza del 95 %. La correlación estacional fue analizada utilizando la función *seascorr* incluida en el paquete *treeclim* (Zang y Biondi, 2015). Asimismo, se calcularon

coeficientes de correlación móvil en una ventana de 25 años con un año de compensación entre ventanas consecutivas durante el período de 1956 a 2015, para detectar los cambios temporales y la estabilidad de las relaciones dendroclimáticas.

2.4.7 Relación entre el crecimiento del árbol y los modos a gran escala de la variabilidad climática

Para evaluar la conexión entre el crecimiento del árbol y los modos a gran escala de la variabilidad climática, se utilizó una función de correlación entre la cronología de ancho de anillo de la especie en estudio con los índices El Niño-Oscilación del Sur (ENSO; Ropelewski y Halpert, 1987), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO; Mantua *et al.*, 1997) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO; van Oldenborgh *et al.*, 2009). El Índice Multivariado del ENSO (MEI) es una serie de tiempo bimensual que permite caracterizar los eventos del ENSO, se fundamenta en seis variables registradas en el Pacífico tropical, las cuales son presión al nivel del mar (SLP), componentes del viento superficial tanto zonal como meridional, temperatura de la superficie del mar (SST), temperatura de la superficie del aire y la nubosidad total (Wolter y Timlin, 1998, 2011). Asimismo, se utilizó el índice de Oscilación del Sur (SOI), que es otro indicador del ENSO, y el cual se basa en las diferencias de presión de la temperatura del agua del mar entre las islas de Tahiti y Darwin, Australia (Trenberth y Hoar, 1997). Los valores positivos de los índices MEI y negativos del SOI representan la fase cálida (El Niño) del ENSO; mientras que los valores positivos del SOI representan la fase fría (La Niña). Las series de tiempo mensuales de los índices MEI, SOI, PDO y AMO fueron obtenidas de la base de datos del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>).

También se exploró la relación temporal y espacial entre la cronología de ancho de anillo con la temperatura de la superficie del mar del océano Pacífico (SST), para lo cual, se utilizó el conjunto de datos del Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST1; Rayner *et al.*, 2003) y el KNMI Climate Explorer para el análisis de correlación espacial (Royal Netherlands Meteorological Institute, 2015).

2.5 Resultados

2.5.1 Características del crecimiento del árbol y la cronología

La cronología de ancho de anillo consistió de 79 series procedentes de 35 árboles, cubriendo el período de 1702-2015 (Figura 2.4). El grupo de árboles promedió 130 años de edad, el individuo más viejo con más de 300 años se localizó en el sitio Aloápam (Cuadro 2.1). Los anillos fueron relativamente grandes en la mayoría de las muestras, lo que facilitó el fechado, mientras que la presencia de anillos falsos fue común en los últimos años. El ancho de anillo total promedio fue de 2.26 ± 1.10 mm año⁻¹. Los parámetros estadísticos de los datos sin estandarizar y de la cronología de ancho de anillo residual se presentan en el Cuadro 2.2. Las series de anillo total en los tres sitios mostraron una inter-correlación entre series de 0.59, sensibilidad media de 0.27, valores promedio de Rbar de 0.36 y EPS de 0.93, lo que indica un fechado cruzado confiable y una señal común entre árboles. La confiabilidad de la cronología se mostró a partir de 1800 cuando el valor del EPS (0.86) superó el umbral recomendado de 0.85 (Wigley *et al.*, 1984), después de incluir 8 núcleos a la base de datos (Figura 2.4c).

Los años que mostraron un mayor crecimiento radial fueron 1803, 1816, 1832, 1840, 1847, 1860, 1883, 1890, 1907, 1914, 1943, 1950, 1967-1968, 1974, 1979-1980, 1985,

1992, 1996-1997, 2000, 2004 y 2015, mientras que los menores crecimientos ocurrieron en 1804, 1807-1808, 1811, 1818, 1825, 1839, 1846, 1849, 1861, 1865, 1878, 1892, 1919, 1924, 1933, 1940, 1945, 1958, 1969-1970, 1977, 1983, 1987-1988, 1998, 2003 y 2010 (Figura 4a).

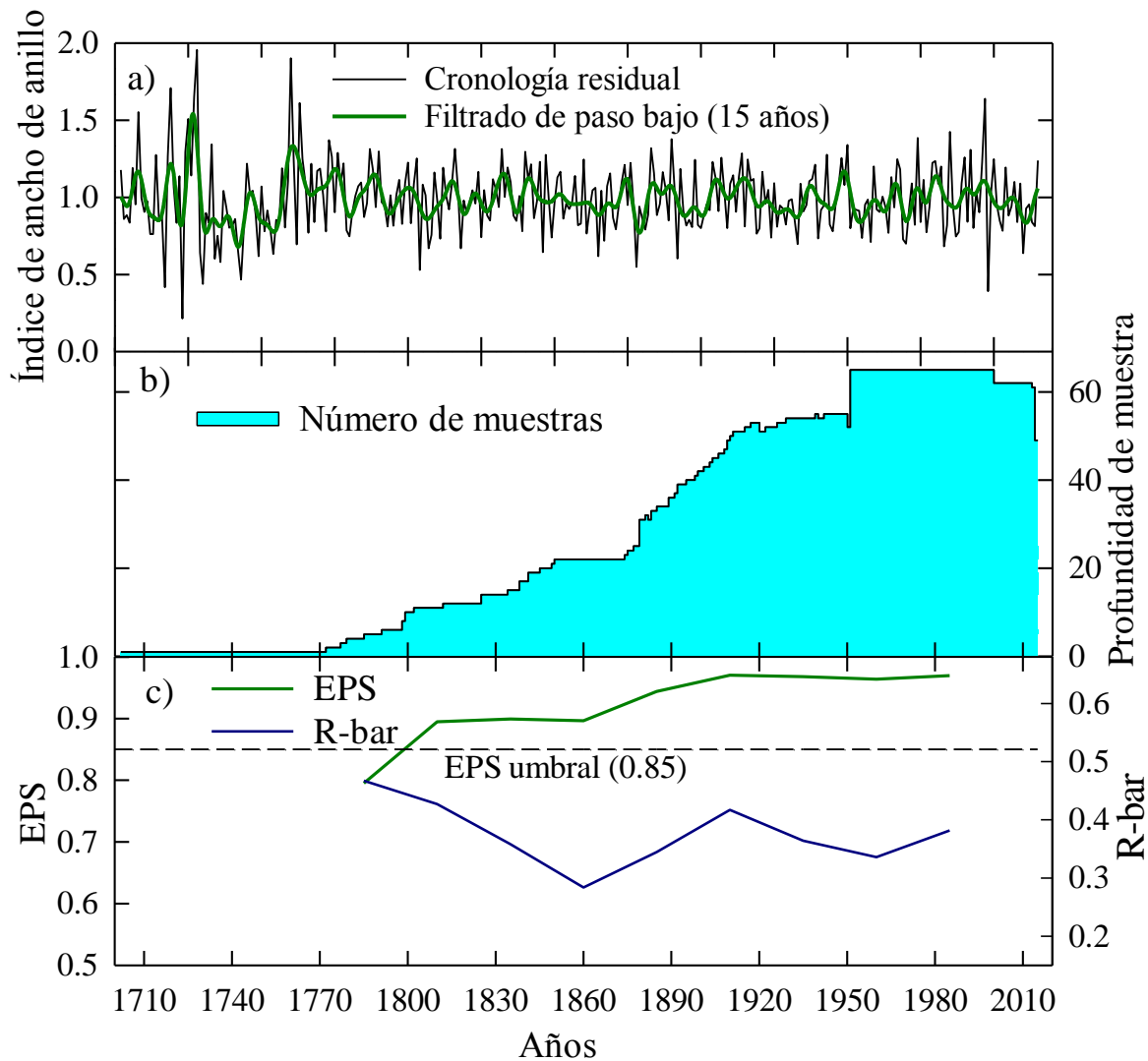


Figura 2. 4. Cronología residual de ancho de anillo de *Abies religiosa* en la Sierra Juárez de Oaxaca, México con un a) filtrado de paso bajo (15 años), b) número de núcleos de árboles utilizados para desarrollar la cronología y c) valores de EPS y R-bar en ventanas móviles de 30 años con una superposición de 15 años.

Cuadro 2. 2. Estadísticos de la cronología residual de ancho de anillo de *Abies religiosa* en la Sierra Juárez de Oaxaca, México.

Estadísticos	Valor
Período de la cronología	1702-2015
No. de núcleos	79
Longitud media de la serie (años)	130
Ancho medio del anillo (mm) \pm SD	2.26 \pm 1.10
Inter-correlación de series	0.592
Coefficiente de correlación media (R_{bar})	0.367
Sensibilidad media (MS)	0.273
Señal de cronología efectiva	0.396
Autocorrelación de primer orden(AC1)	0.659
Relación señal-ruido (SNR)	9.267
Señal de población expresada (EPS)	0.932

2.5.2 Relación clima-crecimiento radial

A escala local, el análisis de correlación mensual mostró una relación significativa ($p < 0.05$) entre los datos climáticos instrumentales y los índices de sequía con la cronología de ancho de anillo del árbol de 1956 a 2013 (Figura 2.5). Los coeficientes de correlación indicaron que el crecimiento radial estuvo influenciado positivamente con la precipitación de primavera (marzo a mayo), pero negativamente con la precipitación de julio y septiembre del año actual de crecimiento. La cronología de ancho de anillo se correlacionó de forma negativa con la temperatura máxima y la temperatura promedio de primavera actual (marzo-mayo), y con la temperatura mínima de noviembre del año previo al crecimiento. El crecimiento de anillo del árbol mostró una correlación positiva con los índices scPDSI y SPEI de abril-mayo, y una correlación negativa con el SPEI de julio.

Por otro lado, el análisis de correlación estacional mostró una alta correlación significativa ($p < 0.05$, $r = 0.49$) entre la cronología de *A. religiosa* y la precipitación acumulada de diciembre previo año a mayo del año actual (Figura 2.5a). Sin embargo, la temperatura máxima y promedio estacional de marzo-abril del año actual, se correlacionaron de forma negativa ($p < 0.05$, $r = -0.40$ y $r = -0.34$) con el crecimiento del árbol, mientras que la temperatura mínima estacional no mostró ningún efecto en la cronología de ancho de anillo. Se encontraron correlaciones positivas significativas ($p < 0.05$) entre el ancho de anillo del árbol con los datos estacionales de abril-mayo del SPEI ($r = 0.46$) y scPDSI ($r = 0.35$).

El análisis de correlación móvil fue desarrollado para una ventana de 25 años en el período 1957-2013, y mostró diferentes respuestas del crecimiento de la especie bajo estudio con las variables climáticas (Figura 2.7 a-f). Por otro lado, predominaron correlaciones negativas débiles y discontinuas en el tiempo entre el crecimiento de los árboles con la temperatura mínima, y con la temperatura promedio de noviembre y agosto del año previo, así como la de los meses de marzo, abril y mayo del año actual. La influencia negativa de la temperatura máxima mensual y estacional de los meses de primavera (marzo a mayo) fue predominante y estable en el crecimiento radial.

La relación entre scPDSI y el crecimiento fue positiva para septiembre, en el año previo a mayo del año actual, con altas correlaciones significativas después de 1979 y hasta el final del período de estudio. La correlación positiva del SPEI estacional de abril a mayo con el crecimiento mostró un patrón estable en los últimos 60 años, mientras que la correlación de SPEI de abril y julio únicamente fue significativa durante algunos de los intervalos de 25 años. La precipitación de noviembre y diciembre del año previo y de marzo a abril del año actual presentó una correlación positiva y fragmentada con el

crecimiento radial; en cambio, la precipitación estacional de invierno-primavera (diciembre a mayo) mostró la relación más significativa y estable desde 1957 a 2013 (Figura 2.7).

La asociación entre el crecimiento radial con las anomalías de la temperatura, precipitación y SPEI son ilustradas en la Figura 2.8. La sincronía del crecimiento radial con las anomalías de la precipitación de invierno-primavera (diciembre-mayo) y los valores promedios del SPEI de primavera (abril-mayo) fueron positivas y elevadas en los años de 1959, 1969, 1974, 1982, 1987, 1998 y 2008. Sin embargo, la temperatura máxima de primavera (abril-mayo) y la cronología residual mostraron una sincronía estrecha, pero de forma inversa para esos mismos años (Figura 2.8c). La correlación espacial verificó la sensibilidad de las poblaciones de esta especie a las condiciones de humedad favorables de primavera en las latitudes 21- 45 ° N de América Septentrional para el período 1960–2013 (Figura 2.9).

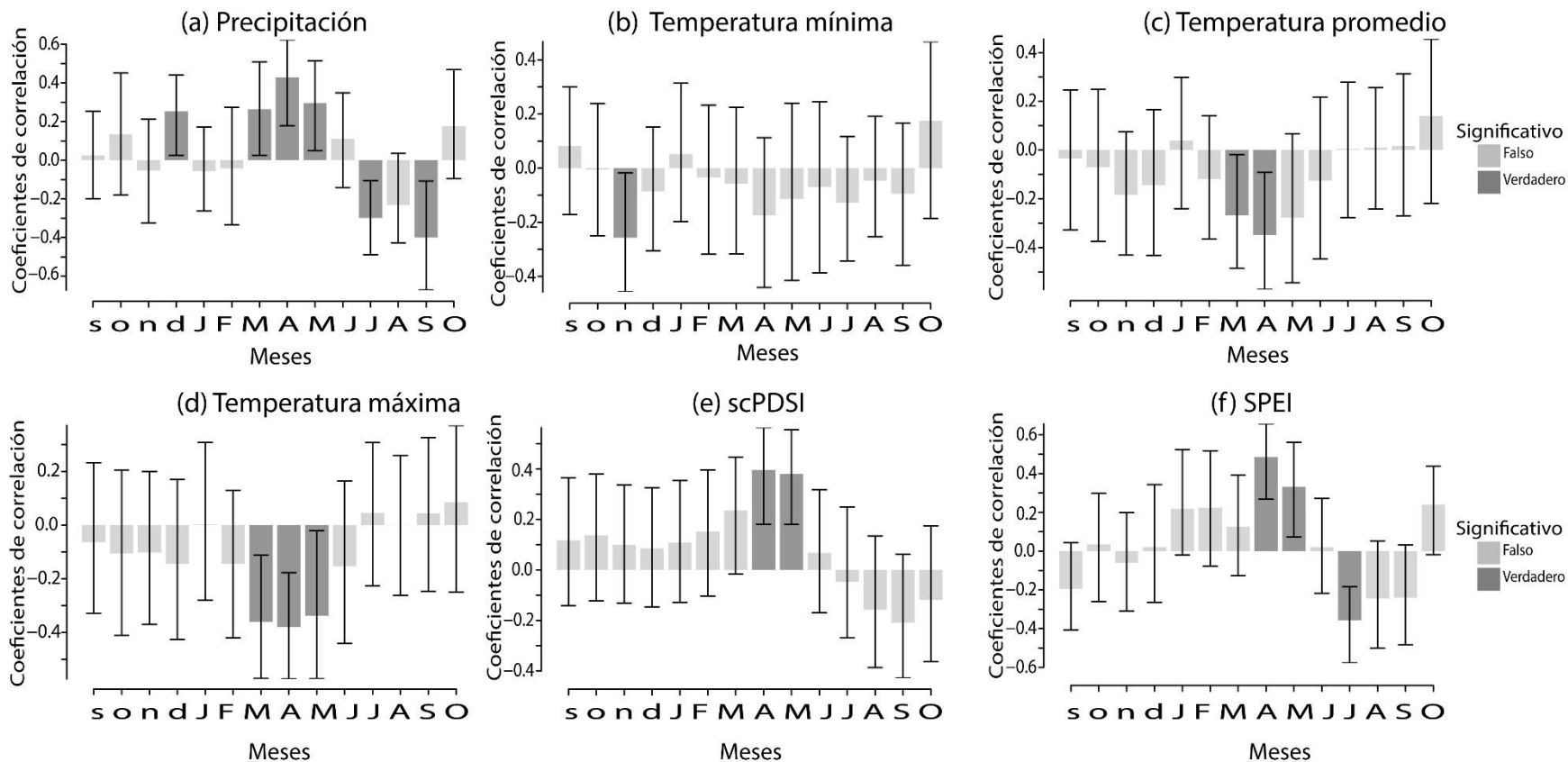


Figura 2. 5. Coeficientes de correlación entre la cronología de anillo total de *A. religiosa* con las variables climáticas mensuales: a) precipitación, b) temperatura mínima, c) temperatura media, d) temperatura máxima; y los índices de sequía: e) scPDSI y f) SPEI. Las correlaciones se realizaron en una ventana que se extiende desde septiembre del año previo hasta octubre del año actual de crecimiento. Las correlaciones significativas ($p < 0.05$) se indican en las barras oscuras.

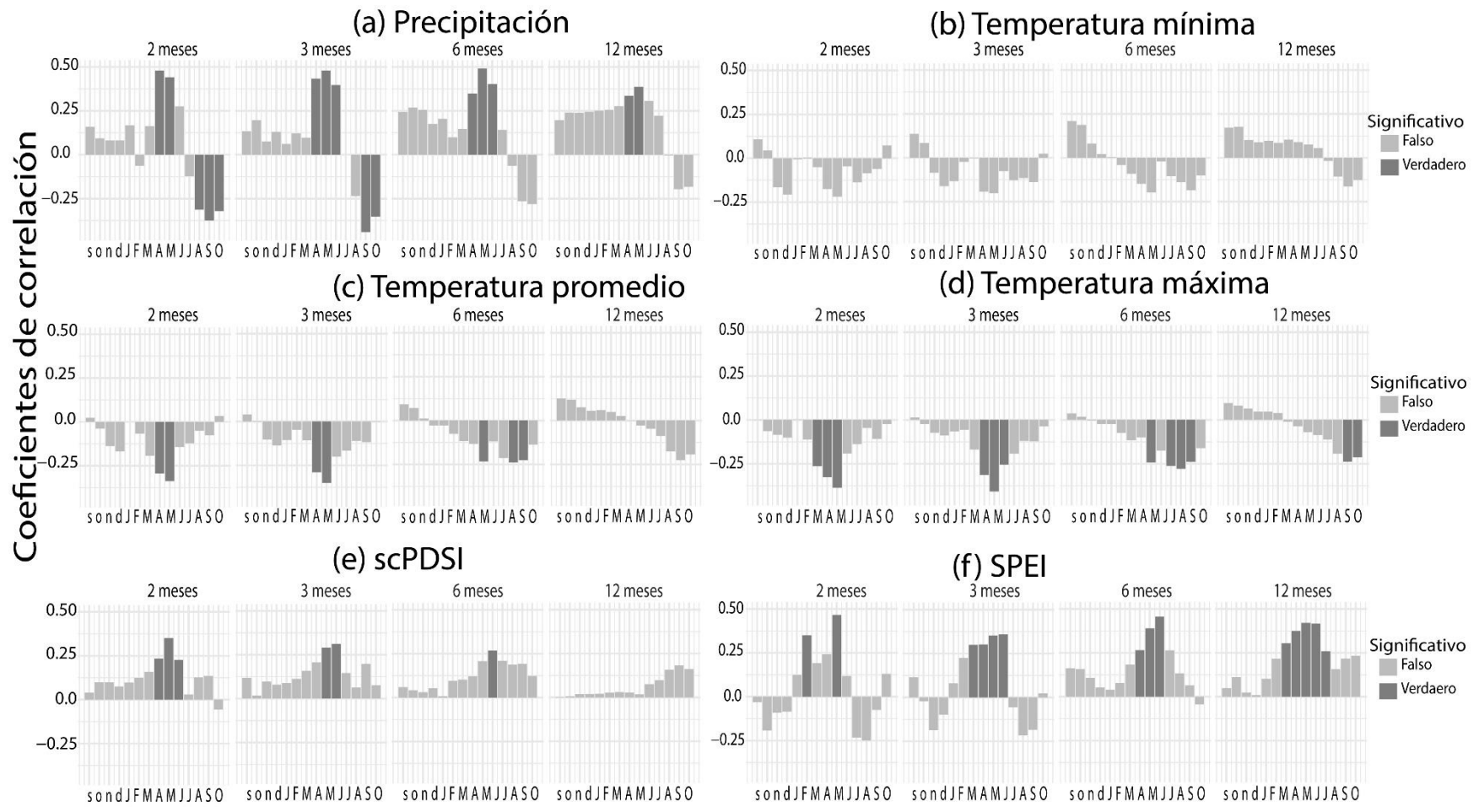
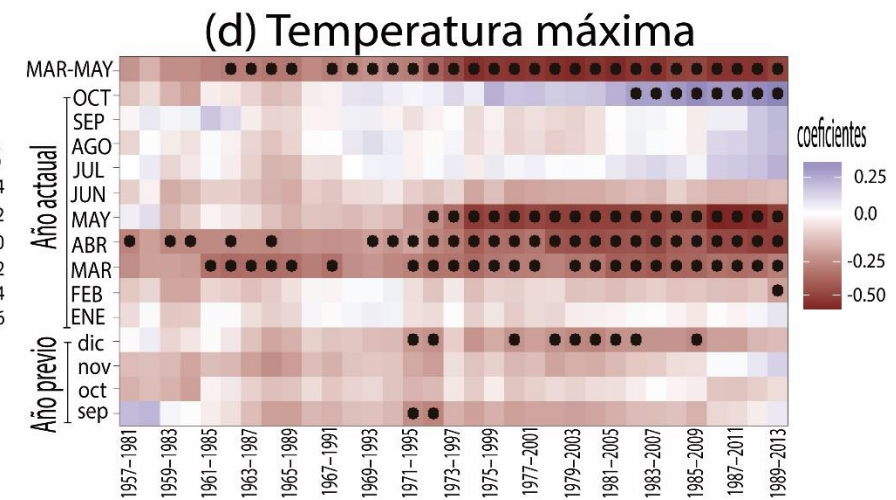
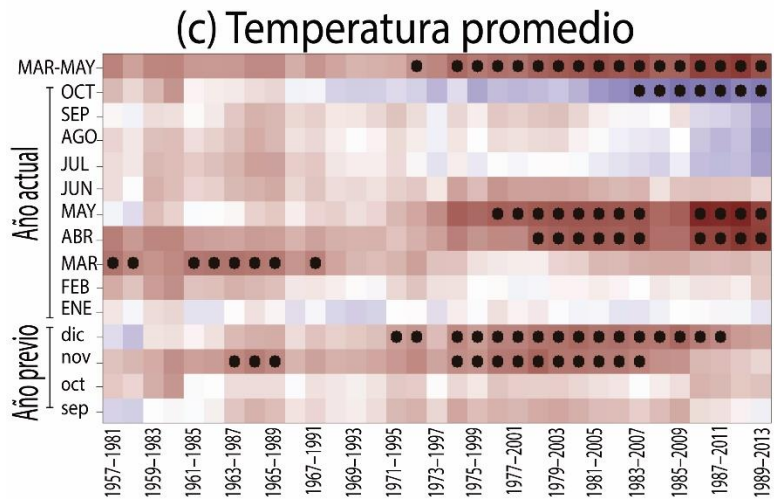
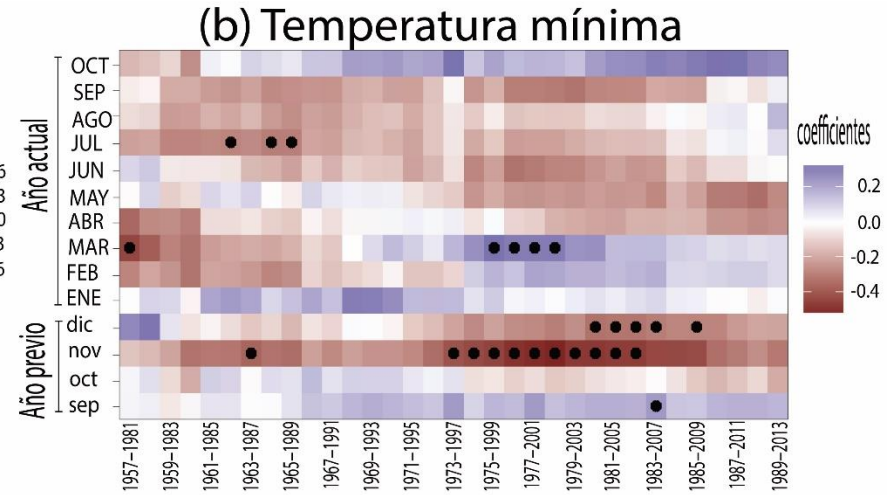
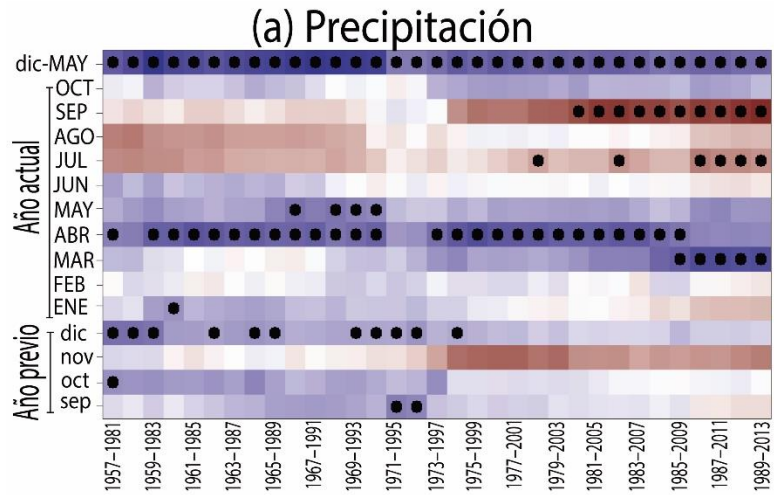


Figura 2. 6. Correlaciones estacionales (2, 3, 6 y 12 meses) entre la cronología de ancho de anillo del árbol de *Abies religiosa* y variables climáticas: a) precipitación, b) temperatura mínima, c) temperatura media, d) temperatura máxima; y los índices de sequía: e) scPDSI y f) SPEI. Las correlaciones se realizaron en una ventana que se extiende desde septiembre del año previo hasta octubre del año actual de crecimiento. Las correlaciones significativas ($p < 0.05$) se indican en barras oscuras.



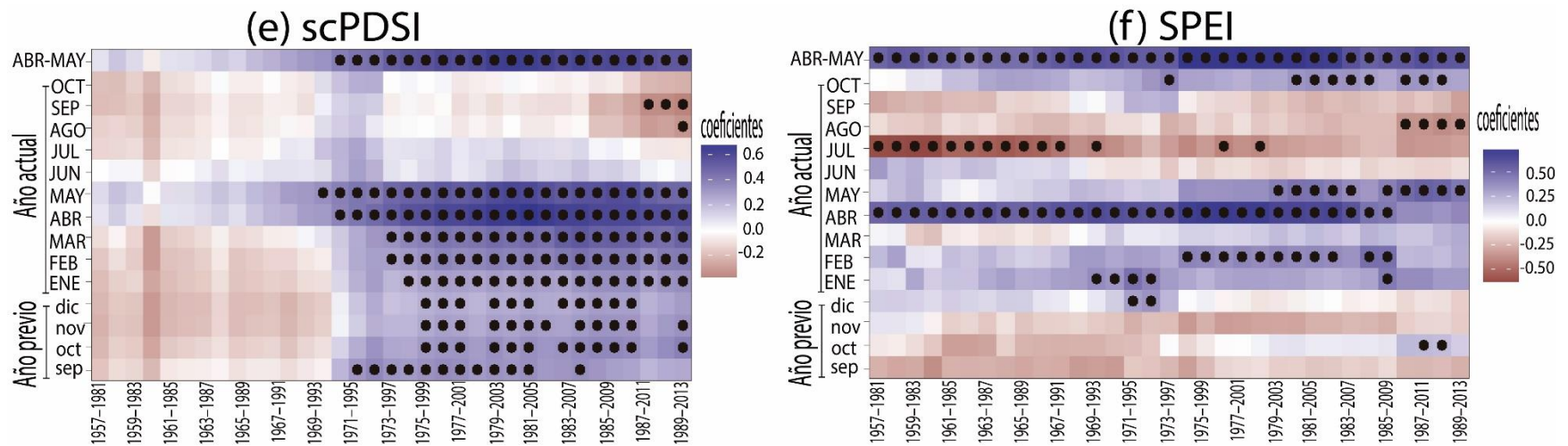


Figura 2. 7. Análisis de correlación móvil entre la cronología de ancho de anillo con: a) precipitación, b) temperatura mínima, c) temperatura promedio, d) máxima temperatura, e) scPDSI y f) SPEI de septiembre previo año a octubre del año actual. La correlación móvil se llevó acabo en ventanas de 25 años, compensación de 1 año, y las correlaciones significativas ($p < 0.05$) se indican con puntos negros.

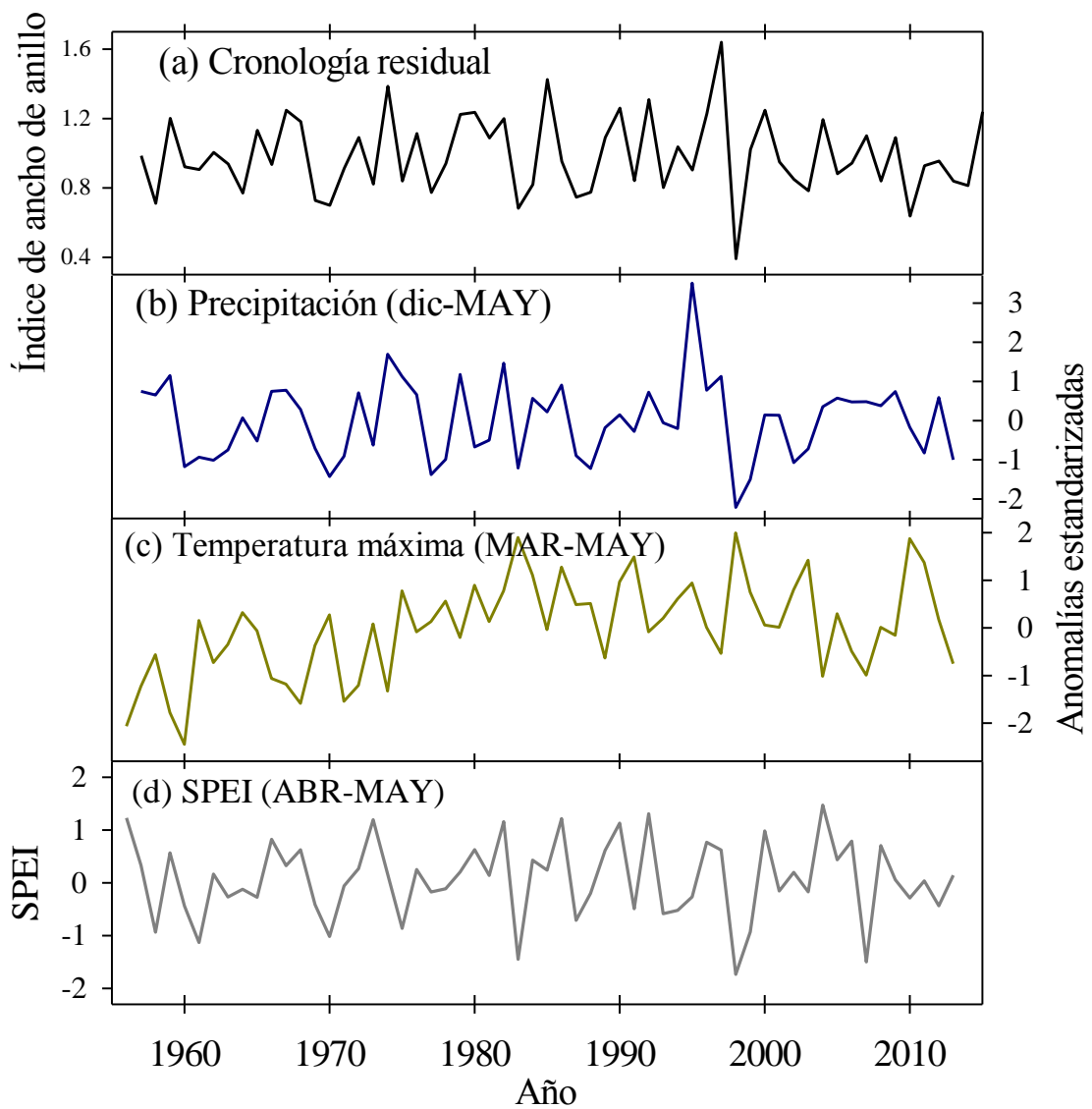


Figura 2. 8. Sincronía entre a) el crecimiento radial de *Abies religiosa* y las anomalías de b) precipitación, c) temperatura y d) SPEI (abril-mayo). El área sombreada representa los años con mayor sincronía.

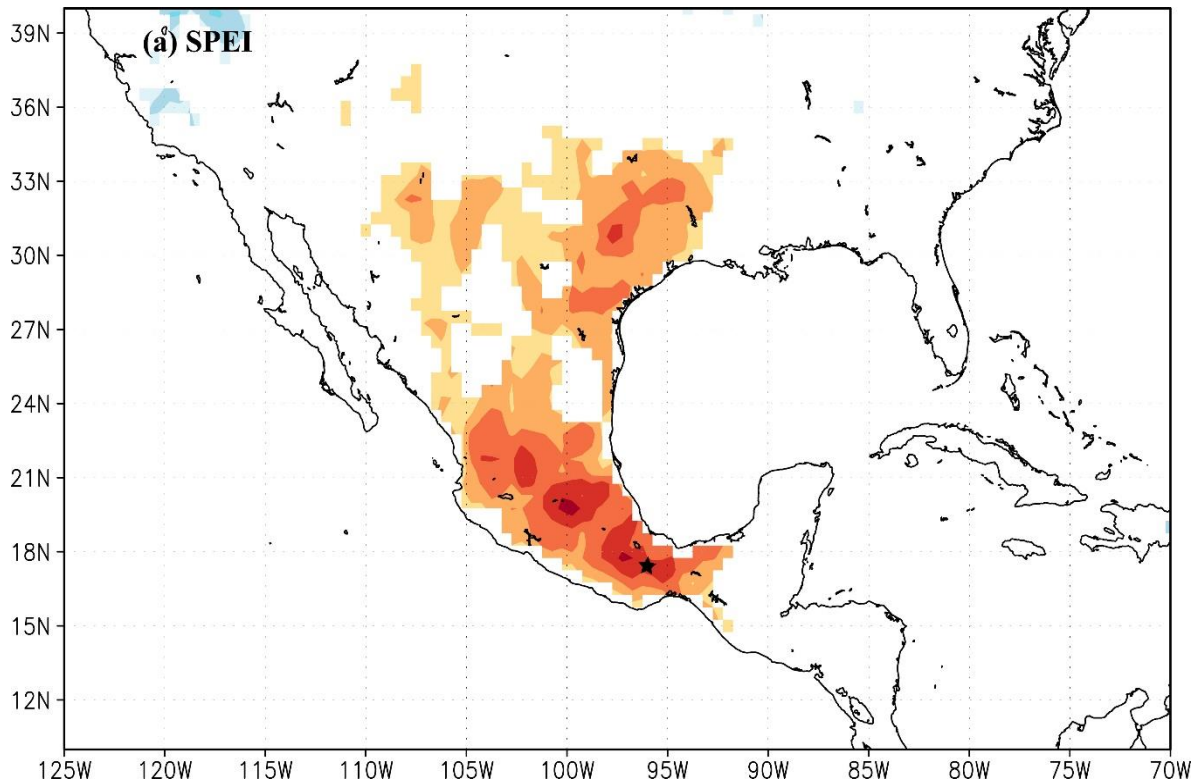


Figura 2. 9. Correlación espacial entre cronología residual de *Abies religiosa* y a) el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) (calculado a escala de un mes) de abril a mayo para el período de 1960-2013. Asimismo, la estrella negra en (a) indica el área de estudio. El análisis fue realizado por KNMI Climate Explorer (The Royal Netherlands Meteorological Institute, <http://climexp.knmi.nl/>). La barra de colores horizontal representa la escala de los coeficientes de correlación. Las áreas coloreadas en los mapas representan las zonas que son estadísticamente significativas ($p < 0.10$).

2.5.3 Relación de los modos a gran escala de la variabilidad climática

A escala global, el crecimiento radial mostró una asociación negativa débil con la variación mensual del PDO (febrero) y la variación temporal del AMO (julio-agosto) (Figura 2.10 c-d). Sin embargo, se obtuvo una correlación negativa significativa alta ($r = -$

0.42, $p < 0.05$) de la variación temporal de los índices SOI y MEI de febrero a marzo con el crecimiento radial (Figura 2.10 a-b). La influencia del ENSO en el crecimiento radial se observó en los eventos de El Niño, considerados moderados para los años 1907, 1957, 1972 y 1991 a intensos 1877, 1982 y 1998, en donde el crecimiento se redujo con un valor de índice de ancho de anillo anual menor al promedio (<1.0). La relación de valores negativos del SOI y MEI con el crecimiento, indican un calentamiento sostenido del océano Pacífico central y oriental tropical, una disminución de la fuerza de los vientos alisios del Pacífico y una reducción de las lluvias de invierno y primavera.

La influencia de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST) en el crecimiento de los árboles en el sur de México fue ratificada con el análisis de correlación espacial, donde la cronología residual mostró un comportamiento dipolar con la temperatura de la superficie del mar (SST) en el Pacífico ecuatorial, en particular en la región Niño 3.4, con una relación negativa de enero a marzo y una relación positiva de julio a septiembre (Figura 2.11 a-b).

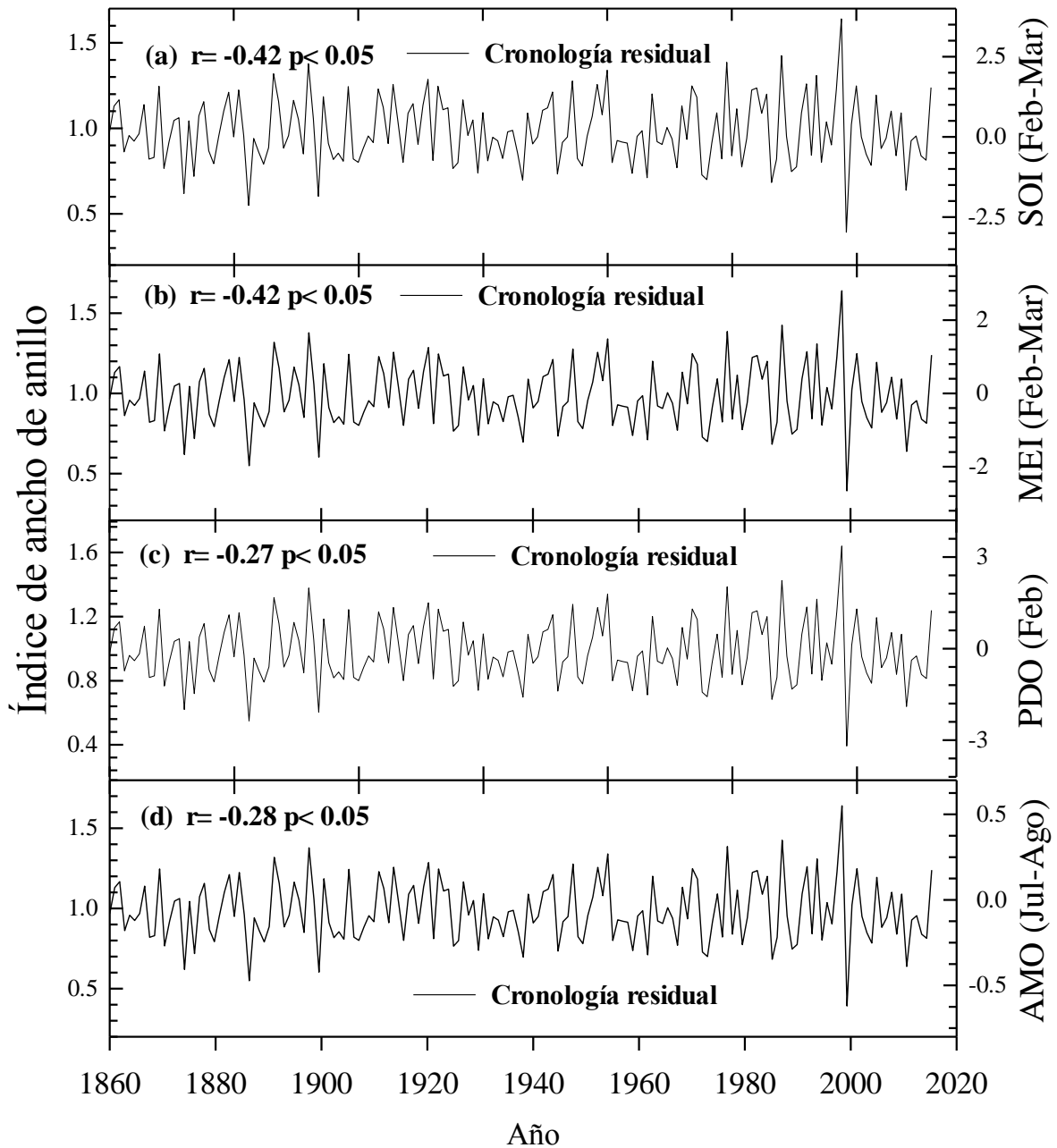
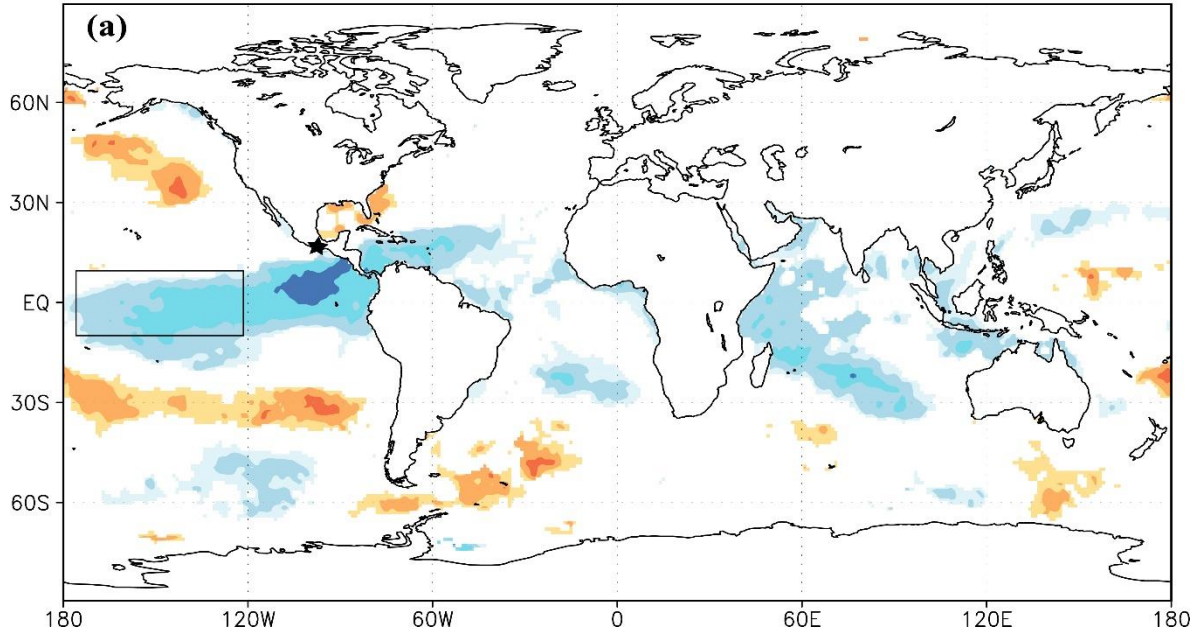


Figura 2. 10. Comparación entre la cronología residual de *Abies religiosa* y a) SOI de febrero-abril (1880-2015); b) MEI de febrero-abril (1950-2015); c) PDO de febrero (1900-2015) y d) AMO de julio-agosto (1880-2015).

corr Jan–Mar averaged chronology Abies
with Jan–Mar averaged HadISST1 SST 1950:2015 $p < 10\%$



corr Jul–Sep averaged chronology Abies
with Jul–Sep averaged HadISST1 SST 1950:2015 $p < 10\%$

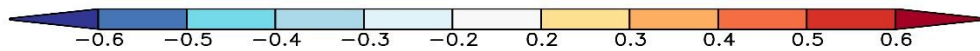
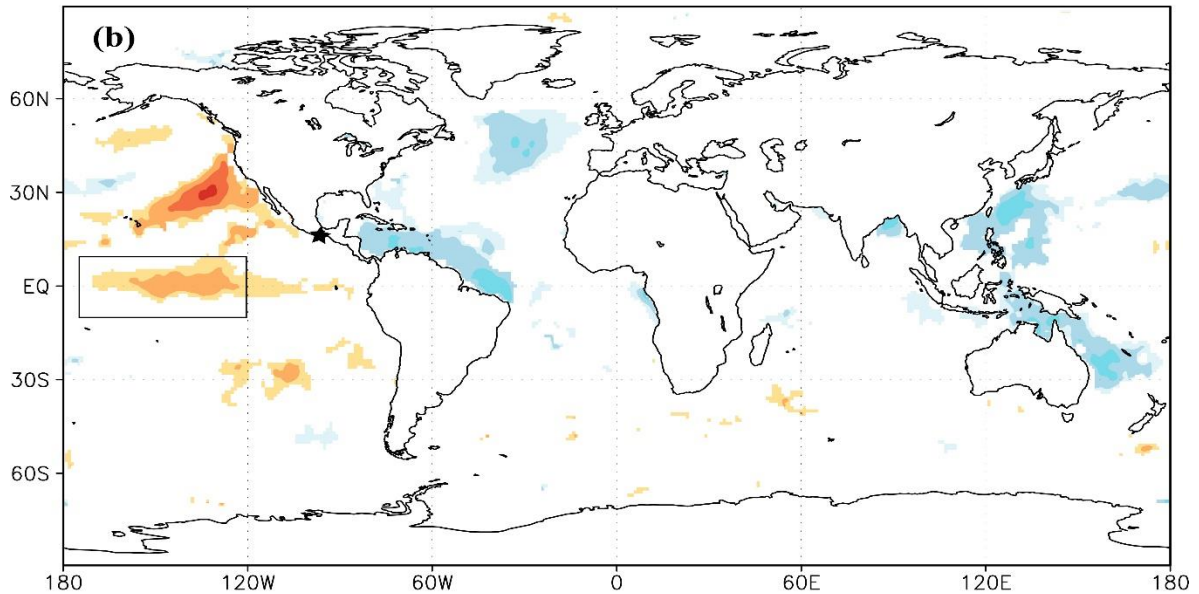


Figura 2. 11. Correlación espacial entre cronología residual de *Abies religiosa* y a) temperatura de la superficie del mar (SST) (HadISST 1 reconstrucción $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$) de enero a marzo; b) temperatura de la superficie del mar (SST) (HadISST 1 reconstrucción

1.0°×1.0°) de julio a septiembre. La barra de colores horizontal representa la escala de los coeficientes de correlación. Las áreas coloreadas en los mapas representan las zonas que son estadísticamente significativas ($p < 0.10$). La región Niño 3.4 está indicada por un rectángulo negro. Asimismo, la estrella negra en indica el área de estudio. El análisis fue realizado en el KNMI Climate Explorer (The Royal Netherlands Meteorological Institute, <http://climexp.knmi.nl/>).

2.6 Discusión

La mayoría de los registros dendrocronológicos de *A. religiosa* en México provienen de la región oeste del país (Huante *et al.*, 1991; Bernal-Salazar *et al.*, 2000; Cerano *et al.*, 2014; Carlón *et al.*, 2016), mientras que las cronologías en las regiones de montaña tropical en el sur son escasos. En este estudio, se desarrolló la primera cronología de ancho de anillo de *A. religiosa* en la Sierra Juárez de Oaxaca, al sur de México.

El potencial dendrocronológico de *A. religiosa* se observó en el fechado cruzado de los árboles, con una correlación promedio superior al valor crítico de COFECHA (0.423, 99 % de nivel de confianza), y de la respuesta a factores climáticos locales y globales (Stahle, 1999). Los parámetros dendrocronológicos obtenidos de intercorrelación entre series (0.59) y sensibilidad media (0.27), demuestran que la variación similar en el patrón de crecimiento entre las series individuales de la especie no es una coincidencia (Stahle, 1999) y que una adecuada señal climática común influye de la misma manera en el crecimiento radial de los árboles. El valor de intercorrelación entre series fue alto en comparación a los obtenidos en otros estudios de anillos de crecimiento de esta especie en México, por ejemplo, los reportados por Huante *et al.* (1991) ($r = 0.55$), Cerano *et al.* (2014) ($r = 0.47$) y Carlón *et al.* (2016) ($r = 0.54$). Sin embargo, estos parámetros son inferiores a los de *Pseudotsuga*

menziesii (MIRB) Franco ($r=0.71$) (Cerano-Paredes *et al.*, 2012) y *Pinus cembroides* Zucc ($r=0.72$) (Constante-García *et al.*, 2009), las cuales son reconocidas por su alto potencial dendrocronológico para reconstrucciones climáticas en México. El valor de EPS de 0.93 (por encima del umbral de 0.85) indicó una señal común robusta en toda la cronología de 1880-2015 (116 años).

Los resultados del análisis de correlación indicaron que el crecimiento radial de *A. religiosa* es sensible a la variabilidad climática local y global. La precipitación de diciembre del año previo, a mayo del año actual, fue la variable climática limitante en el crecimiento de los árboles, lo que indica una estrecha dependencia con el contenido de agua del suelo derivadas de las lluvias estacionales de invierno-primavera para beneficiar el crecimiento. En cambio, una relación negativa fue encontrada con la precipitación de julio y septiembre, por lo que el exceso de agua no muestra influencia en el crecimiento y en ciertas condiciones puede limitar los procesos fisiológicos de los árboles, en particular en los suelos inundables (Granato-Souza *et al.*, 2018); además, el aumento de presencia de nubosidad durante los períodos de lluvia reduce la radiación solar, lo que frena el desarrollo de los árboles, dificultando así el engrosamiento de la pared celular y, por lo tanto, el ancho del anillo (Lovejoy y Schertzer 2006; Gamboa *et al.* 2011).

La segunda variable climática limitante en el crecimiento fue la temperatura máxima estacional de primavera (marzo-mayo), siendo abril el mes en que esta respuesta negativa alcanza su punto máximo. Un aumento de la temperatura durante la temporada de primavera (abril-mayo), combinado con bajos niveles de precipitación, favorece un incremento de la evapotranspiración, lo que resulta en un abatimiento más rápido del agua almacenada en el suelo y en consecuencia estrés hídrico y reducción en el crecimiento del árbol (Venegas-González *et al.*, 2018). Además, el aumento de la sequedad del suelo

causada por una evapotranspiración alta puede llevar a la formación de acículas de menor tamaño, que no sólo reducen la pérdida de agua, sino también la cantidad de fotosintatos disponibles para el crecimiento (Oberhuber *et al.*, 1998).

Las relaciones positivas del crecimiento de los árboles de *A. religiosa* con la precipitación invierno-primavera, y las relaciones negativas con la temperatura invernal del año previo y la temperatura de primavera del año actual de crecimiento, han sido reportadas en diversos estudios en los bosques de Michoacán, México (Huante *et al.*, 1991; Cerano *et al.*, 2014; Carlón *et al.*, 2016). Asimismo, se ha reportado una influencia positiva de la precipitación local de invierno sobre el ancho de anillo de los árboles en el suroeste de Estados Unidos y parte del norte de México (St. George, 2014), lo que indica, que las bolsas de nieve profundas y persistentes, recargan el reservorio de humedad del suelo y permiten que los árboles formen anillos amplios durante la siguiente temporada de crecimiento (Appleton, 2018).

Sin embargo, a pesar de que hasta 50% de la precipitación anual en esta región puede ocurrir durante el verano (Adams y Comrie, 1997; Ray *et al.*, 2007) se tiene un impacto modesto en el suministro de agua disponible para los árboles, debido a que gran parte de la lluvia durante el verano se evapora o escurren después de haber cubierto la capacidad de almacenamiento del perfil de suelo (Sheppard *et al.*, 2002). En contraste, aunque la precipitación durante el invierno es menor, ésta se precipita principalmente como nieve en elevaciones altas donde existen bosques o bien son lluvias de baja intensidad que no sobrepasan la capacidad de infiltración del suelo y quedan almacenadas, por lo que tienen alta influencia en el crecimiento arbóreo, particularmente al inicio de la estación de crecimiento (Barnett *et al.*, 2005). En la sierra Juárez de Oaxaca es característica la presencia de nieve invernal en las altas montañas que, al derretirse junto a la precipitación

de invierno-primavera, puede favorecer al desarrollo de los árboles durante la estación de crecimiento.

Los efectos combinados de la precipitación y la temperatura en el crecimiento de *A. religiosa* sugieren que la disponibilidad de humedad del suelo podría ser el principal factor limitante del crecimiento radial. Esto se confirmó con la alta correlación entre la cronología residual con el índice de sequía SPEI de primavera (abril-mayo), cuando la disponibilidad de agua en el suelo es el principal factor limitante para el crecimiento y el estrés hídrico se ve acentuado por el aumento de la temperatura. Un balance de agua insuficiente en condiciones de alta temperatura puede ser responsable del bajo crecimiento anual (Martín-Benito *et al.*, 2008).

La alta correlación del índice SPEI puede deberse a que es una medida indirecta de las condiciones de humedad que involucra tanto la precipitación como la evapotranspiración potencial (con la temperatura) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Esta limitación ecológica del crecimiento se expresa por la alta correlación con la precipitación (positiva) y la temperatura (negativa) (Chen *et al.*, 2015). De la misma manera, el scPDSI que es otro índice de sequía para evaluar el impacto de la disponibilidad de agua en el crecimiento de los árboles, mostró un comportamiento similar al SPEI, con una correlación baja pero significativa entre el crecimiento radial y el scPDSI de primavera (abril-mayo). Esto podría explicarse, por el hecho de que scPDSI es una medida directa de las condiciones de humedad, que consideran tanto la temperatura como la precipitación para meses previos al cálculo del índice (Palmer, 1965; Dai *et al.*, 2004). Resultados similares de Vicente-Serrano *et al.* (2012) indicaron que las correlaciones más altas se observaron entre el crecimiento de los árboles y el índice de sequía SPEI en comparación con PDSI cuando se consideraron para una escala de tiempo de mensual.

La circulación atmosférica en regiones tropicales está modulada principalmente por las temperaturas del océano, y los patrones termodinámicos se modifican profundamente en años cuando ocurren anomalías en las temperaturas superficiales del océano Pacífico, lo que provoca cambios en las células de Hadley y Walker, que interfieren con la dinámica de la precipitación de los trópicos (Ferreira y Mello, 2005). Las anomalías de la SST en el Pacífico tropical ecuatorial mostraron diferentes influencias temporales en el crecimiento de los árboles de *A. religiosa* (Figura 2.10 b-c). Este resultado, sugiere que el crecimiento radial disminuye durante los episodios de El Niño (fase cálida) y aumenta en episodios de La Niña (fase fría); hallazgos similares han sido encontrados en otras especies de coníferas en el norte y centro de México (Cerano *et al.*, 2014; Villanueva *et al.*, 2015; Astudillo-Sánchez *et al.*, 2015), así como en *Abies guatemalensis* en América central (Anchukaitis *et al.*, 2013).

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) es un fenómeno océano-atmosférico centrado en el océano Pacífico tropical, que causa una reorganización de las temperaturas de la superficie del mar y en la circulación de Walker aproximadamente de 2-7 años (McPhaden *et al.*, 2006). La influencia negativa en el crecimiento radial de ENSO fue confirmada por la alta correlación negativa significativa de los índices MEI y SOI con la cronología residual. Las anomalías secas y cálidas durante los eventos del Niño afectan el crecimiento de los árboles, de tal forma que, favorecen una mayor presencia de lluvia en la estación invierno-primavera en el norte y condiciones de sequía durante el verano en el centro y sur de México (Méndez y Magaña, 2010). En contraste, en la fase fría (La Niña), las condiciones más húmedas generalizadas son dominantes en todas las regiones tropicales que se encuentran al sur de la latitud 22° N, con precipitaciones que regresan a su normalidad e incluso superan este umbral (Melgarejo *et al.*, 2017). En los años considerados como

eventos de El Niño moderados (1907, 1957, 1972 y 1991) a intensos (1877, 1982 y 1998) (Santoso *et al.*, 2017), el crecimiento radial fue menor al promedio y los valores tanto del MEI y SOI, fueron negativos (Figura 9 a-b); sin embargo, en la cronología de los años con eventos La Niña (1950, 1974, 1996,1997, 2000), el crecimiento fue mayor a la media.

Los ciclos multidecadales de baja frecuencia asociados a los fenómenos circulatorios del PDO y AMO mostraron una correlación negativa baja, debido probablemente a que el impacto en la modulación del clima local en la región, no es tan evidente como en otras zonas del país. La influencia del PDO ha sido registrada en el noroeste de México, modificando la precipitación de primavera y verano (Meko *et al.*, 2013); mientras que cada cambio en el comportamiento de AMO, altera los patrones de la precipitación invernal en el noreste del país (Alvarez- Olguin y Escalante- Sandoval, 2017).

Los resultados obtenidos confirman que a pesar de que la cronología exhibe principalmente variaciones climáticas locales, también evidencia que el crecimiento radial puede capturar variaciones oceánicas múltiples (SST) y modos a gran escala de la variabilidad climática (MEI y SOI) y que están estrechamente relacionadas con el clima regional de las montañas del sur de México.

2.7 Conclusiones

La variación en los patrones de crecimiento de los anillos anuales mostró sensibilidad a la variabilidad climática local, especialmente en las variables climáticas relacionadas con la disponibilidad hídrica. La precipitación estacional invierno-primavera es el principal factor limitante del crecimiento radial, seguido por temperatura máxima de primavera. Asimismo, el crecimiento se relacionó negativamente con frecuencias de ENSO, particularmente con la fase Niño.

Los estadísticos de la cronología de *Abies religiosa* indican adecuado potencial dendrocronológico, lo que sugiere que esta especie puede ser útil para estudios de reconstrucción climática del pasado y del historial de crecimiento a largo plazo.

2.8 Literatura Citada

- Adams, D. K., & Comrie, A. C. (1997). The North American monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(10), 2197-2214.
- Aerenson, T., Tebaldi, C., Sanderson, B., & Lamarque, J. F. (2018). Changes in a suite of indicators of extreme temperature and precipitation under 1.5 and 2 degrees warming. *Environmental Research Letters*, 13(3), 035009.
- Altman, J., Fibich, P., Santruckova, H., Dolezal, J., Stepanek, P., Kopacek, J., Hunova, I., Oulehle F., JanTumajer J., & Cienciala, E. (2017). Environmental factors exert strong control over the climate-growth relationships of *Picea abies* in Central Europe. *Science of the Total Environment*, 609, 506-516.
- Alvarez- Olguin, G., & Escalante- Sandoval, C. (2017). Modes of variability of annual and seasonal rainfall in Mexico. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 144-157. doi: 10.1111/1752-1688.12488
- Anchukaitis, K. J., Taylor, M. J., Martin-Fernandez, J., Pons, D., Dell, M., Chopp, C., & Castellanos, E. J. (2013). Annual chronology and climate response in *Abies guatemalensis* Rehder (*Pinaceae*) in Central America. *The Holocene*, 23(2), 270-277.
- Appleton, S. N., & George, S. S. (2018). High-elevation mountain hemlock growth as a surrogate for cool-season precipitation in Crater Lake National Park, USA. *Dendrochronologia*, 52, 20-28.
- Arriaga, L., Espinosa, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., & Loa, E. (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., Nava-Bernal, G. E., & Gómez-Albores, M. A. (2017). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees*, 31(2), 441-453.
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303.
- Bernal-Salazar, S., & Salgado, T. T. (2000). Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques*, 6(1), 73-86.

- Bolte, A., Ammer, C., Löf, M., Madsen, P., Nabuurs, G. J., Schall, P., & Rock, J. (2009). Adaptive forest management in central Europe: climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24(6), 473-482.
- Briffa, K., Jones, P. (1990). Basic chronology statistics and assessment. In: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (Eds.), *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, pp. 137–152.
- Brooks, T. M., Mittermeier, R. A., da Fonseca, G. A., Gerlach, J., Hoffmann, M., Lamoreux, J. F., Mittermeier C. G., Pilgrim J. D., & Rodrigues, A. S. (2006). Global biodiversity conservation priorities. *Science*, 313(5783), 58-61.
- Carlón A. T., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D. R., Villanueva-Díaz, J., & Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the monarch butterfly biosphere reserve, central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103-116.
- Cerano J. P., Díaz, J. V., Martínez, R. C., Selem, L. V., Cacicano, R. T., & De la Cruz, V. G. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2014(83), 41-54.
- 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*, 2(10), 7-23.
- Chen, Z., Zhang, X., Cui, M., He, X., Ding, W., & Peng, J. (2012). Tree-ring based precipitation reconstruction for the forest–steppe ecotone in northern Inner Mongolia, China and its linkages to the Pacific Ocean variability. *Global and Planetary Change*, 86, 45-56.
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo-Oviedo, E. H., & Valencia-Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17-39.
- Cook, E. R. & Holmes R.L. (1999). Program ARSTAN – Chronology Development with Statistical Analysis (User's manual for program ARSTAN). Tucson, AZ: *Laboratory of Tree-Ring Research*, The University of Arizona.
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37-59.
- Cook, E.R., Holmes, R.L. (1986). Users Manual for ARSTAN. Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, Tucson.

- Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (Eds.). (1990). *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Springer, Netherlands.
- Cook, E.R., Peters, K. (1997). Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *Holocene* 7, 361–370.
- Cuevas-Guzmán, R., Cisneros-Lepe, E. A., Jardel-Peláez, E. J., Sánchez-Rodríguez, E. V., Guzmán-Hernández, L., Núñez-López, N. M., & Rodríguez-Guerrero, C. (2011). Análisis estructural y de diversidad en los bosques de Abies de Jalisco, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4), 1219-1233.
- Dai, A., Trenberth, K. E., & Qian, T. (2004). A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), 1117-1130.
- Del Castillo, R.F., J.A. Pérez de la Rosa, G. Vargas Amado y R. Rivera García. (2004). Coníferas. En: A.J. García-Mendoza, M.J. Ordóñez y M. Briones-Salas (eds.). *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund, México, pp. 141-158.
- Eguiarte, L. E., & Furnier, G. R. (1997). Niveles y patrones de variación genética del género Abies en México. *Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. Bases de datos SNIB2010-CONABIO proyecto*, (B138).
- Elliott, K. J., Miniati, C. F., Pederson, N., & Laseter, S. H. (2015). Forest tree growth response to hydroclimate variability in the southern Appalachians. *Global Change Biology*, 21(12), 4627-4641.
- Evans, G. W. (2019). Projected behavioral impacts of global climate change. *Annual Review of Psychology*, 70: 6.1-6.26.
- Ferreira, A. G., & da Silva Mello, N. G. (2005). Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, 1(1).
- Fritts, H.C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London 567 pp.
- Gamboa, C. C., Rozendaal, D. M., Ceccantini, G., Angyalossy, V., van der Borg, K., & Zuidema, P. A. (2011). Evaluating the annual nature of juvenile rings in Bolivian tropical rainforest trees. *Trees*, 25(1), 17-27.
- García, A.J., Díaz, M.D.J.O., Briones-Salas, M. (eds.). (2004). *Biodiversidad de Oaxaca*. UNAM.
- George, S. S. (2014). An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews*, 95, 132-150.

- Gómez-Mendoza, L., Galicia, L., & Aguilar-Santelises, R. (2008). Sensibilidad de grupos funcionales al cambio climático en la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas*, (67), 76-100.
- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Barbosa, A. C., Feng, S., Torbenson, M. C., de Assis Pereira, G., & Griffin, D. (2018). Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. *Climate Dynamics*, 1-13.
- Henderson, J. P., & Grissino-Mayer, H. D. (2009). Climate–tree growth relationships of longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) in the Southeastern Coastal Plain, USA. *Dendrochronologia*, 27(1), 31-43.
- Holmes, R.L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.* 44, 69–75.
- Huante, P., Rincón, E., & Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin.* 51:15-28.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, MX). (2009). *Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC)*. Morelos, México: Software, Jiutepec.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (2000a). Mapa de Edafología. Escala 1:250,000. México: INEGI.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (2000b). Modelo digital del terreno. Escala 1:250,000. México: INEGI.
- Jaramillo- Correa, J. P., Aguirre- Planter, E. R. I. K. A., Khasa, D. P., Eguiarte, L. E., Pinero, D., Furnier, G. R., & Bousquet, J. (2008). Ancestry and divergence of subtropical montane forest isolates: molecular biogeography of the genus *Abies* (Pinaceae) in southern México and Guatemala. *Molecular Ecology*, 17(10), 2476-2490.
- Kharin, V. V., Flato, G. M., Zhang, X., Gillett, N. P., Zwiers, F., & Anderson, K. J. (2018). Risks from climate extremes change differently from 1.5° C to 2.0° C depending on rarity. *Earth's Future* 6, 704–715.
- Klooster, D., & Masera, O. (2000). Community forest management in Mexico: carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. *Global Environmental Change*, 10(4), 259-272.
- La Sorte, F. A., & Jetz, W. (2010). Projected range contractions of montane biodiversity under global warming. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 277(1699), 3401-3410.
- Lovejoy, S., & Schertzer, D. (2012). Low frequency weather and the emergence of the Climate. *Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective*, *Geophys. Monogr. Ser.*, 196, 231-254.

- Madrigal, S. X. (1967). Contribución al conocimiento de la ecología de los bosques de oyamel *Abies religiosa* (H.B.K. Sh1. Et Cham), en el Valle de México. Bol. Tec. No. 18. Mexico: I.N.I.F. de la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Malhi, Y., Gardner, T. A., Goldsmith, G. R., Silman, M. R., & Zelazowski, P. (2014). Tropical forests in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 39.
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 1069-1079.
- Martín-Benito, D., Cherubini, P., Del Río, M., & Cañellas, I. (2008). Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. *Trees*, 22(3), 363-373.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Water* 179, 17–22.
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. *science*, 314(5806), 1740-1745.
- Meave, J. A., Rincón, A., & Romero-Romero, M. A. (2006). Oak forests of the hyper-humid region of La Chinantla, Northern Oaxaca Range, Mexico. En: *Ecology and conservation of Neotropical montane oak forests* (pp. 113-125). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Meko, D. M., Touchan, R., Díaz, J. V., Griffin, D., Woodhouse, C. A., Castro, C. L., & Leavitt, S. W. (2013). Sierra San Pedro Mártir, Baja California, cool- season precipitation reconstructed from earlywood width of *Abies concolor* tree rings. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), 1660-1673.
- Melgarejo, A. E., Ordóñez, P., Nieto, R., Gimeno, L., & Ribera, P. (2017). Moisture transport related to the ENSO effects in the Mexican precipitation. In *First International Electronic Conference on the Hydrological Cycle*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175-1188.
- Oberhuber, W., Stumboeck, M., & Kofler, W. (1998). Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. *Trees*, 13(1), 19-27.
- Palmer WC (1965) *Meteorological Drought*. Technical Report, U.S. Weather Bureau Research Paper 45.
- Panayotov, M., Tsvetanov, N., Tsavkov, E., Gogushev, G., Bebi, P., Zhelev, P., & Yurukov, S. (2019). Effect of Climate Change on the High-Mountain Tree Species and

- Their Genetic Resources in Bulgaria. In *Forests of Southeast Europe Under a Changing Climate* (pp. 429-447). Springer, Cham.
- Peng, J., Gou, X., Chen, F., Li, J., Liu, P., & Zhang, Y. (2008). Altitudinal variability of climate–tree growth relationships along a consistent slope of Anyemaqen Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Dendrochronologia*, 26(2), 87-96.
- Ponce-Reyes, R., Reynoso-Rosales, V. H., Watson, J. E., van Der Wal, J., Fuller, R. A., Pressey, R. L., & Possingham, H. P. (2012). Vulnerability of cloud forest reserves in Mexico to climate change. *Nature climate change*, 2(6), 448–452.
- R Development Core Team (2018). R: a Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ray, A. J., Garfin, G. M., Wilder, M., Vásquez-León, M., Lenart, M., & Comrie, A. C. (2007). Applications of monsoon research: Opportunities to inform decision making and reduce regional vulnerability. *Journal of Climate*, 20(9), 1608-1627.
- Rojas-Soto, O. R., Sosa, V., & Ornelas, J. F. (2012). Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity and Conservation*, 21(10), 2671-2690.
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1986). North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*, 114(12), 2352-2362.
- Royal Netherlands Meteorological Institute. (2015). KNMI climate explorer. <http://climexp.knmi.nl>. Accessed 25 Aug 2018.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 504 p.
- Santoso, A., Mcphaden, M. J., & Cai, W. (2017). The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079-1129. doi: 10.1002/2017RG000560
- Sheppard, P. R., Comrie, A. C., Packin, G. D., Angersbach, K., & Hughes, M. K. (2002). The climate of the US Southwest. *Climate Research*, 21(3), 219-238.
- Sohar, K., Altman, J., Lehečková, E., & Doležal, J. (2017). Growth–climate relationships of Himalayan conifers along elevational and latitudinal gradients. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2593-2605.
- Speer, J.H. (2010). Fundamentals of Tree-ring Research. University of Arizona Press.
- Stahle D. W. (1999) Useful strategies for development of tropical tree-ring chronologies. *IAWA J.* 20, 249–53.

- Stokes, M. A. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Stokes, M. A., and T. L. Smiley. (1968). *An Introduction to Tree- Ring Dating*. The University of Arizona Press, Tucson.
- Trenberth, K. E., & Hoar, T. J. (1997). El Niño and climate change. *Geophysical Research Letters*, 24(23), 3057-3060.
- Van Oldenborgh, G. J., Te Raa, L. A., Dijkstra, H. A., & Philip, S. Y. (2009). Frequency-or amplitude-dependent effects of the Atlantic meridional overturning on the tropical Pacific Ocean. *Ocean Science*, 5(3), 293-301.
- Venegas-González, A., Roig, F. A., Lisi, C. S., Albiero-Junior, A., Alvares, C. A., & Tomazello-Filho, M. (2018). Drought and climate change incidence on hotspot Cedrela forests from the Mata Atlântica biome in southeastern Brazil. *Global Ecology and Conservation*, 15, e00408.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., & Sanchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions*, 16(10), 1-27.
- Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335-2351.
- Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201-213.
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (1998). Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank?. *Weather*, 53(9), 315-324.
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext). *International Journal of Climatology*, 31(7), 1074-1087.
- Yuan, X. C., Wei, Y. M., Wang, B., & Mi, Z. (2017). Risk management of extreme events under climate change. *Journal of Cleaner Production*, 166, 1169-1174.
- Zang, C., & Biondi, F. (2013). Dendroclimatic calibration in R: the bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, 31(1), 68-74.

- Zang, C., & Biondi, F. (2015). Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy- climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431-436.
- Zang, C., Hartl- Meier, C., Dittmar, C., Rothe, A., & Menzel, A. (2014). Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. *Global Change Biology*, 20(12), 3767-3779.
- Zhang, Q. B., & Alfaro, R. I. (2003). Spatial synchrony of the two- year cycle budworm outbreaks in central British Columbia, Canada. *Oikos*, 102(1), 146-154.
- Zhang, W. T., Jiang, Y., Dong, M. Y., Kang, M. Y., & Yang, H. C. (2012). Relationship between the radial growth of *Picea meyeri* and climate along elevations of the Luyashan Mountain in North-Central China. *Forest Ecology and Management*, 265, 142-149.

CAPÍTULO III. RESPUESTA CLIMÁTICA DEL ANCHO DE ANILLO DE *Abies hickelii* EN LA SIERRA SUR DE OAXACA, MÉXICO

3.1 Resumen

La información sobre la variabilidad del crecimiento radial de los árboles de alta montaña es fundamental para mejorar las predicciones de las respuestas de los ecosistemas forestales al cambio climático. En este estudio, se desarrolló la primera cronología de 205 años (1811-2015) de *Abies hickelii* Flous & Gausson en la Sierra Sur de Oaxaca, México. La influencia climática local y regional en el crecimiento de los árboles fue explorada mediante un análisis de correlación. La cronología mostró una correlación positiva con la precipitación de invierno-primavera (abril-mayo) ($r = 0.46$, $p < 0.05$) y una correlación negativa con la temperatura mínima de invierno (diciembre-enero) ($r = -0.19$, $p < 0.05$). Asimismo, los modos a gran escala de la variabilidad climática como la temperatura de la superficie del mar (SST) y los índices de la variabilidad El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Niño 3.4 e Índice Multivariado del ENSO) durante los meses verano-invierno mostraron una influencia con las variaciones en el crecimiento de los árboles, particularmente en eventos El Niño, con una disminución en crecimiento de los anillos de esta especie. Los resultados obtenidos mejoraran la comprensión de cómo la variabilidad del clima puede afectar el crecimiento radial, así mismo, demuestran la importancia de la especie para reconstruir las variaciones climáticas en los bosques de alta montaña en el sur de México.

Palabras clave: Ancho de anillo, crecimiento radial, dendrocronología, ENSO, señal climática.

3.2 Summary

Information on the variability of radial growth of high-elevation trees is essential to improve the behavior of forest ecosystem under a warming climate. In this study, we developed the first 205 (1811-2015)-year long chronology of *Abies hickelii* Flous & Gaussen in the Sierra Sur of Oaxaca, Mexico. The local and regional climatic influence on tree growth was determined using correlation analyses. The chronology showed a positive correlation with the winter-spring precipitation (April-May) ($r = 0.4635$, $p < 0.05$) and a negative correlation with the minimum winter temperature (December-January) ($r = -0.1916$, $p < 0.05$). Likewise, large-scale modes of climatic variability such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) indices like the Southern Oscillation Index (Niño 3.4) and the Multivariate ENSO Index (MEI) during the summer-winter months showed a significant influence on tree growth, particularly, warm ENSO events (El Niño) causing a decrease annual growth. The results obtained will improve the understanding of how climate variability can affect radial growth, as well as demonstrate the importance of this species to reconstruct climatic variations in high-elevation forests of southern Mexico.

Keywords: Climatic signal, dendrochronology, ENSO, radial growth, tree-ring width.

3.2 Introducción

Los elementos del clima afectan los microclimas en ecosistemas forestales, los entornos operativos y los procesos fisiológicos, estos a su vez, controlan el crecimiento (Fritts, 1976; Wang *et al.*, 2013). Los árboles son una fuente valiosa de registros indirectos y pueden revelar cambios climáticos a diferentes escalas temporales y espaciales (Briffa *et al.*, 2002; Carrer *et al.*, 2010). Los estudios dendrocronológicos han permitido evaluar las respuestas de crecimiento de los árboles a factores ambientales contrastados dentro del complejo árbol-clima-sitio a escalas regionales, resaltando las interacciones entre el sitio y las condiciones climáticas (Cook *et al.*, 2001; Mazza *et al.*, 2014). Las señales climáticas registradas en el ancho de los anillos de los árboles están generalmente relacionadas con la variabilidad de alta y baja frecuencia expresando una gama muy amplia de respuestas de crecimiento al clima y, con más detalle, similitudes o señales contrastantes en los patrones de crecimiento entre diferentes sitios y rodales forestales (Carrer y Urbinati, 2001; Pfeifer *et al.*, 2005). Los anillos de los árboles han sido utilizados como una herramienta eficiente, no sólo para reconstruir las condiciones climáticas del pasado, sino también para evaluar los impactos de los cambios climáticos en la productividad forestal, la dinámica de la vegetación, la diversidad de plantas y la riqueza de especies (Saxe *et al.*, 2001; Thuiller *et al.*, 2005; Kwiaton y Wang, 2015).

Los bosques que se desarrollan en los límites de su distribución con frecuencia presentan una mayor sensibilidad del crecimiento radial a la variabilidad climática local y a las tendencias climáticas a largo plazo, respondiendo de manera diferente a lo largo de los gradientes ambientales (Fritts, 1976; Macias *et al.*, 2006; Linares, 2011; Panthi *et al.*, 2018). En regiones de alta montaña, generalmente el crecimiento radial de los árboles es

controlado por la temperatura (Fan *et al.*, 2008; Villanueva *et al.*, 2016; Yin *et al.*, 2018), y se ha encontrado que, tanto la temperatura en la estación de crecimiento, como la temperatura invernal del año previo, son factores importantes en el crecimiento de los árboles (Elliott, 2012; Zhang *et al.*, 2017). Sin embargo, algunos estudios han documentado que la humedad en la estación de crecimiento también puede influir en el incremento radial de los árboles de los bosques de alta elevación (Morales *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2014). Por lo tanto, las relaciones climáticas con el crecimiento de los árboles de alta montaña deben ser comprendidas para mejorar su respuesta al cambio climático y proyecciones de crecimiento en el futuro.

El oyamel hickelii (*Abies hickelii* Flous & Gaussen) es una especie nativa que crece en el sur de México, con una distribución muy limitada a pocos rodales localizados en las altas montañas fragmentadas y aisladas del este del Eje Neo volcánico Transversal y en la Sierra Madre del Sur en los estados de Veracruz, Oaxaca y Chiapas en México (Martínez, 1948; Farjon, 1990). Esta especie de oyamel crece alrededor de 2500 a 3000 msnm en ambientes más húmedos que en las elevaciones superiores y, de acuerdo con la norma ecológica mexicana NOM-059 SEMARNAT 2010 y a la Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN (The International Union for Conservation of Nature, por sus siglas en inglés), está catalogada como en peligro de extinción (Norma Oficial Mexicana, 2010; Farjon, 2013).

La persistencia de los bosques de oyamel *hickelii* en México se ve amenazada por el aumento de las actividades antropogénicas, como el cambio del uso del suelo, la sobreexplotación, el pastoreo y los incendios forestales. Así mismo, la alteración de los patrones de temperatura y precipitación, por efecto de cambio climático y de acuerdo a los modelos de circulación general bajo distintos escenarios de emisiones, sugieren que las poblaciones de esta especie en México experimentarán una reducción del área de

distribución del 50 al 79% de la superficie potencial (0.29×10^6 ha) (Guitérrez y Trejo, 2014). Sin embargo, la influencia climática en crecimiento radial de *A. hickelii* en los bosques de alta montaña, es desconocida, por lo que es importante generar información para comprender mejor y predecir la respuesta de esta especie al cambio climático. En México, los estudios dendrocronológicos de *Abies hickelii* son escasos, y únicamente un estudio ha sido realizado en el sur con un resultado no exitoso. Naylor (1971) analizó el potencial dendrocronológico de *A. hickelii* en la costa de Oaxaca encontrando que los anillos de los árboles muestreados no mostraron una sensibilidad a la variabilidad ambiental.

Por lo tanto, los objetivos de este estudio fueron: (i) evaluar el potencial dendroclimático, e (ii) identificar los principales factores climáticos y controladores climáticos a gran escala (ENSO, PDO, AMO) que afectan el crecimiento del ancho de anillo de *Abies hickelii* en las altas montañas de la Sierra Sur de Oaxaca, México.

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Área de estudio

El estudio se realizó en los bosques de alta montaña en la Sierra Sur de Oaxaca, en el sur de México (Figura 3.1). Los sitios de estudio están ubicados en la localidad de San Pedro Leapi del municipio de San Carlos Yautepec y en San Juan Ozolotepec, en el estado de Oaxaca (Figura 3.2). Los dos sitios de oyamel *hickelii* crecen en cañadas orientadas al norte dentro de un intervalo altitudinal de 3200 a 3400 m. El clima es semifrío, subhúmedo con verano fresco largo Cb' (w2) (García, 1998), registrándose una temperatura media anual de 14.4°C (desde 1961 hasta 2011). El mes más frío es enero (7.2°C) y el mes más

cálido abril (22.2 ° C). La precipitación total anual promedio es de 1225.4 mm, de los cuales aproximadamente el 73 % ocurre en verano (junio y septiembre) y el 2.3 % de lluvia invernal del total anual (Figura 3). El tipo de suelo en los dos sitios de muestreo es acrisol húmico (INEGI, 2010).

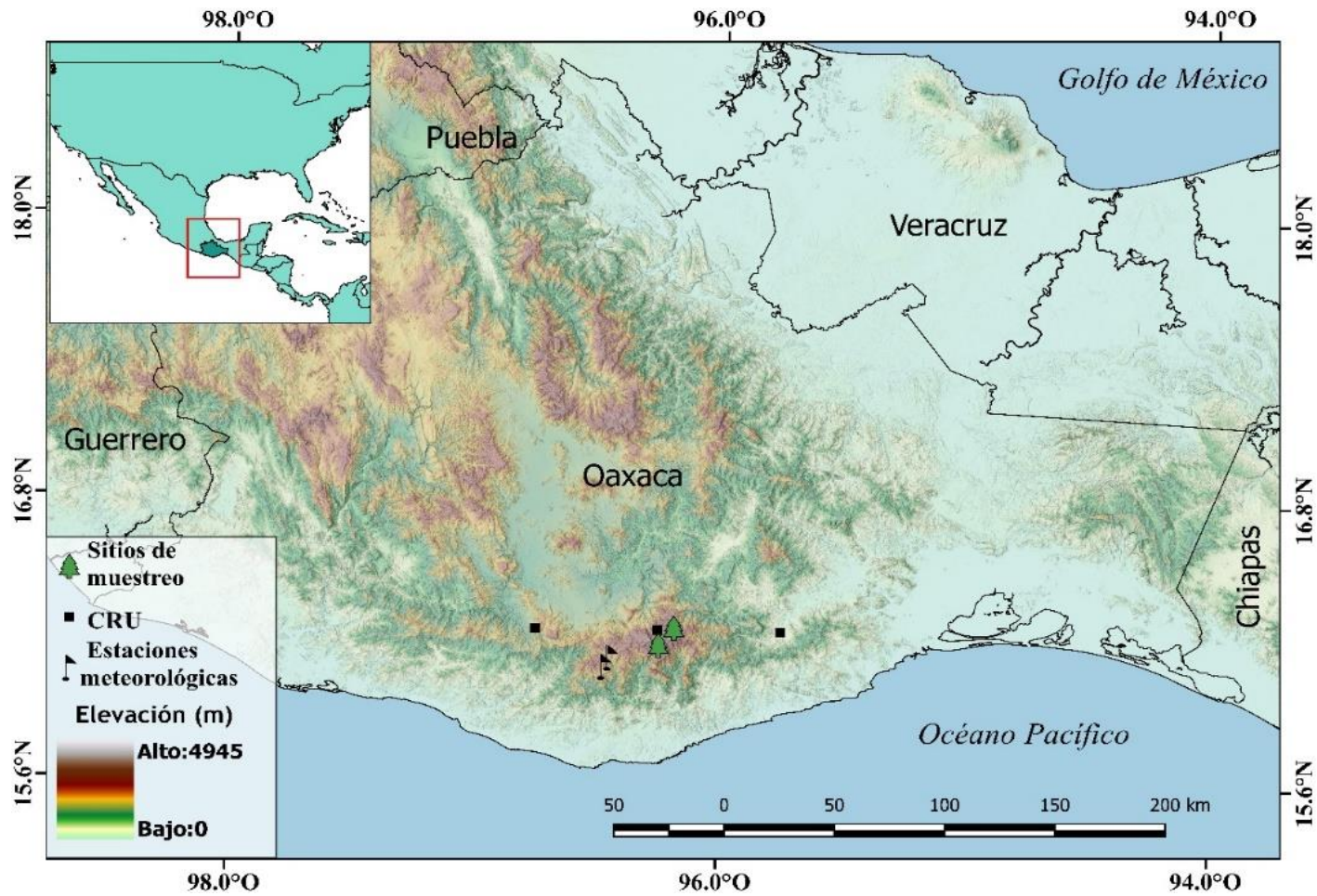


Figura 3. 1. Región de estudio que muestra los sitios de muestreo para extraer núcleos de crecimiento de *Abies hickelii*, estaciones meteorológicas y puntos de cuadrícula de la unidad de investigación climática (CRU) en la Sierra Sur de Oaxaca, región sur de México.



Figura 3. 2. Ubicación de los sitios para obtención de muestras de anillos de árboles de *Abies hickelii* en la Sierra Sur de Oaxaca, México. (a) San Pedro Leapi y (b) San Juan Ozolotepec.

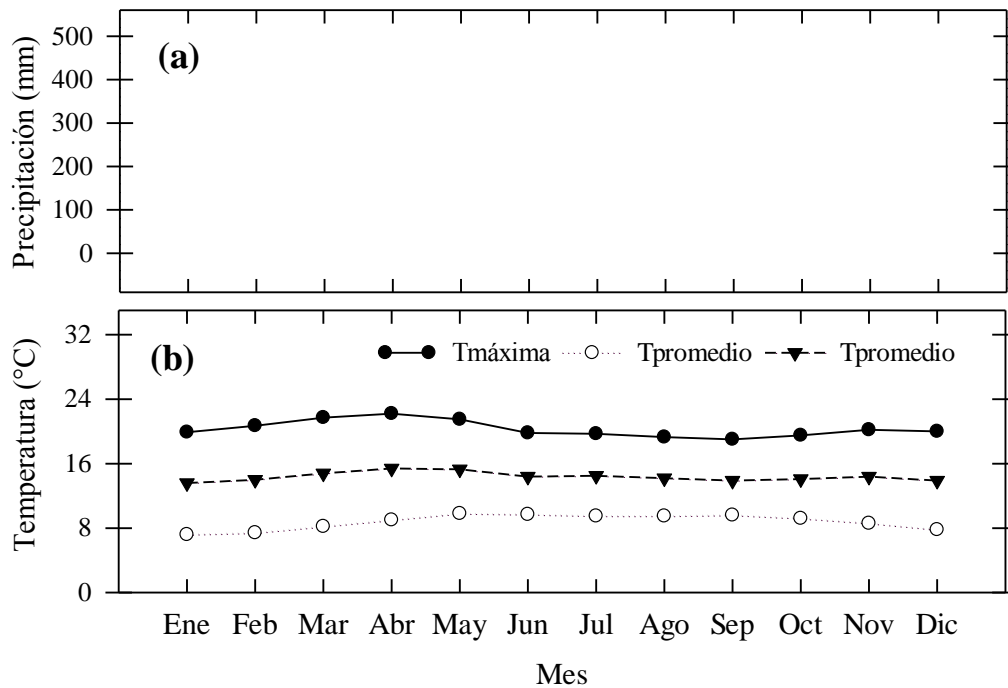


Figura 3. 3. Diagrama climático del área de estudio. (a) Distribución de la precipitación y (b) temperatura mínima, promedio y máxima durante el período de referencia 1961-2011.

3.3.2 Desarrollo de la cronología

Se obtuvieron muestras de anillos de árboles en dos sitios ubicados en la Sierra Sur de Oaxaca, México (Cuadro 3.1). En cada sitio de muestreo, se extrajeron de dos a tres núcleos por árbol con la ayuda de un taladro Pressler marca Haglöf Sweden de 12 mm de diámetro. Los núcleos fueron etiquetados y transportados al Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA INIFAP en Gómez Palacio, Durango México. Las muestras fueron secadas al aire libre y montadas en soportes de madera, posteriormente, las superficies de las muestras fueron lijadas utilizando papel de lija de grano de 120 a 1200 para mejorar la visibilidad de los límites de crecimiento de los anillos anuales. El fechado de los anillos se realizó utilizando técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968; Swetnam, 1985), y la medición del ancho de cada anillo anual con un sistema de

medición Velmex y precisión de 0.001 mm. La verificación del fechado y de la medición se realizó en el programa COFECHA (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983). Cada serie de ancho de anillo medido fue estandarizada ajustado un spline de 20 años dependiente de la edad para eliminar las tendencias biológicas, así como cualquier otra variación de baja frecuencia debida a la dinámica del rodal, al mismo tiempo que conserva las señales climáticas que influyen en el crecimiento del árbol (Cook y Kairiukstis, 1990). Este procedimiento se realizó utilizando el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1999). La cronología final se desarrolló utilizando una media robusta “bi-ponderada” para promediar todas las series individuales de índices de ancho de anillo y minimizar los impactos de los valores atípicos (Cook y Kairiukstis, 1990; Cook y Holmes, 1999). Una cronología residual fue desarrollada a partir de la alta correlación entre las series de ancho de anillo de los dos sitios, con este tipo de cronología se elimina cualquier efecto de autocorrelación y mejora las señales comunes.

La correlación promedio entre las series (R_{bar}) y la señal de población expresada (EPS) (Wigley *et al.*, 1984), medidas de intensidad de la señal común de las cronologías fueron calculadas en ventanas móviles de 30 años y una superposición de 15 años. El EPS se usó para identificar el período durante el cual, los datos disponibles de la serie de tiempo de los anillos del árbol tienen una señal lo suficientemente robusta como para capturar un alto porcentaje de la señal de los anillos de la población común en un sitio (Wigley *et al.*, 1984). Un valor de EPS de 0.85 es considerado como un umbral para determinar la parte de la cronología que tiene una intensidad de señal común aceptable capturada por una profundidad de muestra adecuada (Cook y Kairiukstis, 1990; Wigley *et al.*, 1984). Adicionalmente, los siguientes parámetros fueron obtenidos para evaluar la calidad de la

cronología: la sensibilidad media (MS), la desviación estándar (SD) y la autocorrelación de primer orden (AC1) (Fritts, 1976).

Cuadro 3. 1. Localización y descripción de los sitios de los muestreos de *Abies hickelii* en la Sierra Sur de Oaxaca, México.

Nombre del sitio	Elevación (msnm)	Elevación promedio (msnm)	Lat.	Lon.	Núcleos	Aspecto
San Pedro Leapi	3250-3300	3275	16.25	96.18	20	Norte
San Juan Ozolotepec	3200-3400	3300	16.18	96.24	40	Norte

Lat: latitud (°N); Lon: longitud (°W)

3.3.3 Datos climáticos

Para investigar la influencia del clima local en el crecimiento de oyamel hickelii se compararon los índices de ancho de anillo con los datos mensuales de precipitación y temperatura (mínima, promedio, máxima) derivados de la red de estaciones climatológicas de México (CONAGUA) y del programa Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) para el período de 1961-2013 (IMTA, 2013). Las estaciones seleccionadas fueron San Miguel Suchixtepec (N 16. 09°, W 96.46°, 2453 msnm) y San Mateo Rio Hondo (N 16.13°, W 96.44°, 2226 msnm) (Figura 3.1, Cuadro 3.2). Los datos climáticos regionales de temperatura y precipitación que abarcan el período de 1960 a 2015 se extrajeron del conjunto de datos de la Unidad de Investigación del Clima (CRU) TS 4.01 con una resolución espacial de 0. 5 ° (Harris *et al.*, 2014). El conjunto de datos CRU es una interpolación de datos de estaciones meteorológicas cercanas, sin embargo, las

observaciones más extensas en la región no comenzaron hasta después de la década de 1960, por lo que se decidió utilizar los datos después de esta década. Los puntos de la cuadrícula del CRU (N 16.25, W 96.75; N 16.25, W 96.25; N 16.25, W 95.75) más cercanos a los dos sitios de muestreo fueron promediados y utilizados en este estudio.

Cuadro 3. 2. Información de las estaciones meteorológicas utilizadas para los análisis de correlación.

Nombre de la estación	Elevación (msnm)	Lat.	Lon.	Intervalo de temperatura	Intervalo de precipitación
Suchixtepec	2453	16.09	96.46	1961-2010	1961-2011
Rio Hondo	2226	16.13	96.44	1980-2008	1980-2008

Lat: latitud (°N); Lon: longitud (°W)

3.3.4 Análisis estadísticos

Las relaciones entre las variaciones interanuales de los índices de crecimiento del oyamel *hickelii* y el clima, se calcularon utilizando funciones de correlación (Fritts, 1976; Holmes, 1999). Los registros locales y regionales mensuales del clima fueron analizados en una ventana de 24 meses de crecimiento desde enero del año previo (t-1) a diciembre del año actual (t) para el período de 1961-2010, teniendo en cuenta que el crecimiento radial con frecuencia exhibe una influencia con las condiciones climáticas un año antes de la formación de un anillo anual (Fritts, 1976). Las funciones de correlación mensual fueron obtenidas con los paquetes bootRes (Zang y Biondi, 2013) y treeclim (Zang y Biondi, 2015) del software estadístico R versión 3.8.1 (R Core Team, 2018), los cuales permitieron calcular intervalos de confianza para la significancia estadística de los coeficientes de correlación con base a 1000 muestras aleatorias con reemplazo a un nivel de confianza del

95 %. La correlación estacional fue analizada utilizando la función “seascorr” incluida en el paquete “treeclim” (Zang y Biondi, 2015).

3.3.5 Modos a gran escala de la variabilidad climática

La influencia del El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) en el crecimiento radial de oyamel *hickelii* fue evaluado usando el Índice El Niño 3.4 y el Índice Multivariado del ENSO (MEI) (Ropelewski y Halpert, 1987; Wolter y Timlin, 1998; 2011). El Índice El Niño 3.4 es un indicador basado en las anomalías promedio de la temperatura de la superficie del mar en la región delimitada por 5 ° N a 5 ° S, desde 170 ° W a 120 ° W, mientras que el MEI es una medida multivariable de la señal del ENSO y se calcula bimestralmente a partir de seis variables principales en el Pacífico tropical. Los valores negativos del Índice El Niño 3.4 representan la fase fría del fenómeno ENSO, mientras que los valores positivos representan su fase cálida. Así mismo, la teleconexión entre los índices Oscilación Decadal del Pacífico (PDO; Mantua *et al.*, 1997) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO; Van Oldenborgh *et al.*, 2009) con la cronología residual fueron analizados. Las series de tiempo mensuales de los índices El Niño 3.4, MEI, PDO y AMO fueron obtenidas de la base de datos del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>).

El mapa de correlación espacial entre la cronología de *A. hickelii* con la temperatura de la superficie del mar (SST) del océano Pacífico se generaron utilizando el KNMI Climate Explorer (Trouet *et al.*, 2013) y el conjunto de datos cuadrículados mensuales (1x1°) y estacionales del Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature (HadISST1; Rayner *et al.*, 2003).

3.4 Resultados y discusión

El desarrollo de la cronología residual de *A. hickelii* en la Sierra Sur de Oaxaca se basó en 60 series de 30 árboles. El ancho promedio de los anillos de los árboles fue de 1.7 ± 0.63 mm. La longitud media del conjunto de series de anillos fue de 166 años. La cronología residual desarrollada abarca desde 1765 hasta 2015, su parte confiable inicia en 1810 con más de 12 series disponibles (Figura 3.4). Los años que mostraron un mayor crecimiento radial con un índice de ancho de anillo mayor fueron 1907, 1921, 1943, 1950, 1972, 1985, 1996-1997, 2000 y 2015, mientras que los de menor crecimiento fueron 1811, 1878, 1933, 1941, 1964, 1973, 1977, 1998 y 2006.

La cronología de oyamel *hickelii* presentó correlación entre series de 0.55 y sensibilidad media de 0.27 y autocorrelación de primer orden de 0.47. El valor del EPS promedio fue de 0.92, superior al umbral de 0.85 a partir del año 1820 indicando un buen desempeño de la cronología para estudios dendroclimáticos (Wigley *et al.*, 1984). La coherencia en el crecimiento del ancho del anillo entre árboles y radios es claramente evidente y, como resultado, la correlación media (R_{bar}) obtenida entre todos los radios fue de 0.32 (Cook y Krusic, 2005) (Figura 4d). Los estadísticos obtenidos revelan una cronología de buena calidad y una buena señal común entre los árboles.

La intercorrelación y sensibilidad obtenida en este estudio fue similar a los obtenidos en otros estudios dendrocronológicos de coníferas en México, por ejemplo, en *Pinus oocarpa* Shiede (0.50, 28) (López-Hernández *et al.*, 2018), *P. cembroides* Zucc. (0.51, 0.22) (Carlón *et al.*, 2018) y *P. hartwegii* Lindl. (0.5, 0.32) (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2016); así como en estudios previos de *Abies religiosa* Kunt Schltl. *et* Cham. (0.47-0.54, 0.26-0.32) (Cerano *et al.* 2014; Carlón *et al.*, 2016). Sin embargo, el estudio realizado por

Naylor (1971) en la costa de Oaxaca para *A. hickelii* no obtuvo resultados satisfactorios debido a problemas en el fechado, ya que los anillos de la especie no mostraron una sensibilidad a la variabilidad ambiental, esto probablemente por el número limitado de muestras que no permiten la representatividad del crecimiento del árbol (Therrell *et al.*, 2006), así como también, a que los sitios de muestreo no fueron lo suficientemente sensibles a los cambios ambientales (Fritts, 1976).

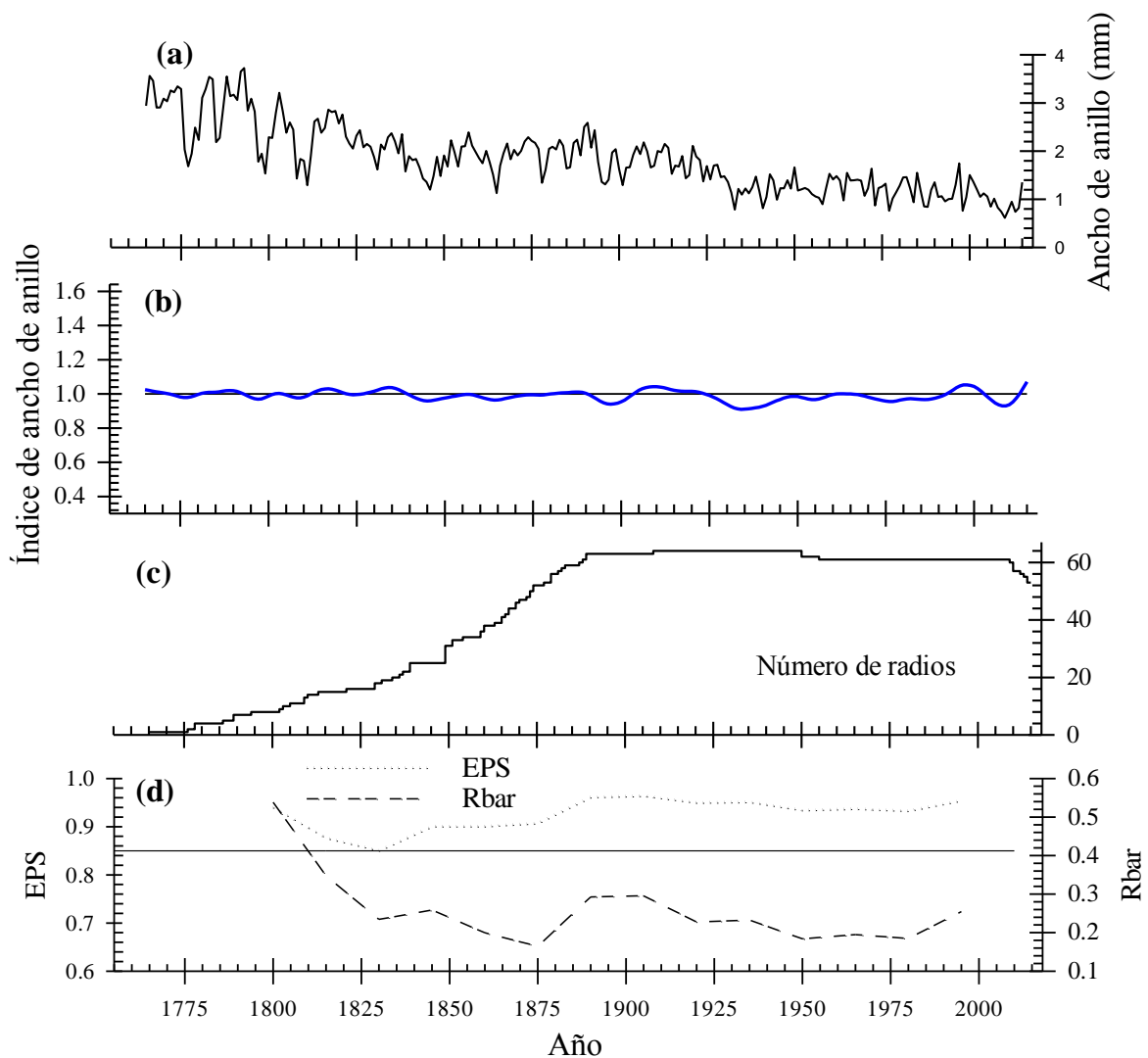


Figura 3. 4. a) Series de crecimiento de ancho de anillo promedio de *Abies hickelii* en el sur de México. b) cronología residual de anillo total, c) número de radios utilizados y d) estadísticos EPS y Rbar en ventanas móviles de 30 años y superposición de 15 años.

La cronología residual de anillo residual mostró una mayor correlación con precipitación, que con temperatura. Correlaciones positivas significativas ($p < 0.05$) fueron encontradas entre el crecimiento del árbol y la precipitación mensual de marzo, abril y mayo del año en curso (Figura 3.5a), así como correlacionadas negativamente con la temperatura máxima de abril y mayo durante la temporada de crecimiento (Figura 5b). La temperatura mínima de los meses de diciembre del año previo y enero del año actual mostraron una influencia negativa en el crecimiento del ancho de anillo (Figura 3.5c). La correlación estacional más alta fue obtenida entre la cronología residual y la precipitación acumulada de febrero-abril ($r = 0.4635$, $p < 0.05$). En cambio, correlaciones negativas fueron observadas entre el crecimiento radial y la temperatura máxima de abril-mayo ($r = -0.1835$, $p < 0.05$), la temperatura mínima de diciembre-enero ($r = -0.1916$, $p < 0.05$) y la temperatura promedio de octubre-mayo ($r = -0.1225$, $p < 0.05$) (Figura 3.6).

A escala regional, el crecimiento del ancho de anillo de *A. hickelii* mostró una influencia positiva con la precipitación estacional de agosto del año previo a junio del año actual de crecimiento ($r = 0.3822$, $p < 0.05$), pero negativamente con la temperatura mínima de octubre a diciembre del año previo ($r = -0.3134$, $p < 0.05$). La temperatura máxima y temperatura promedio anual (mayo previo año a mayo del año actual) influyeron negativamente en el crecimiento radial ($r = -0.2759$ y $r = -0.2630$, $p < 0.05$) (Figura 3.5).

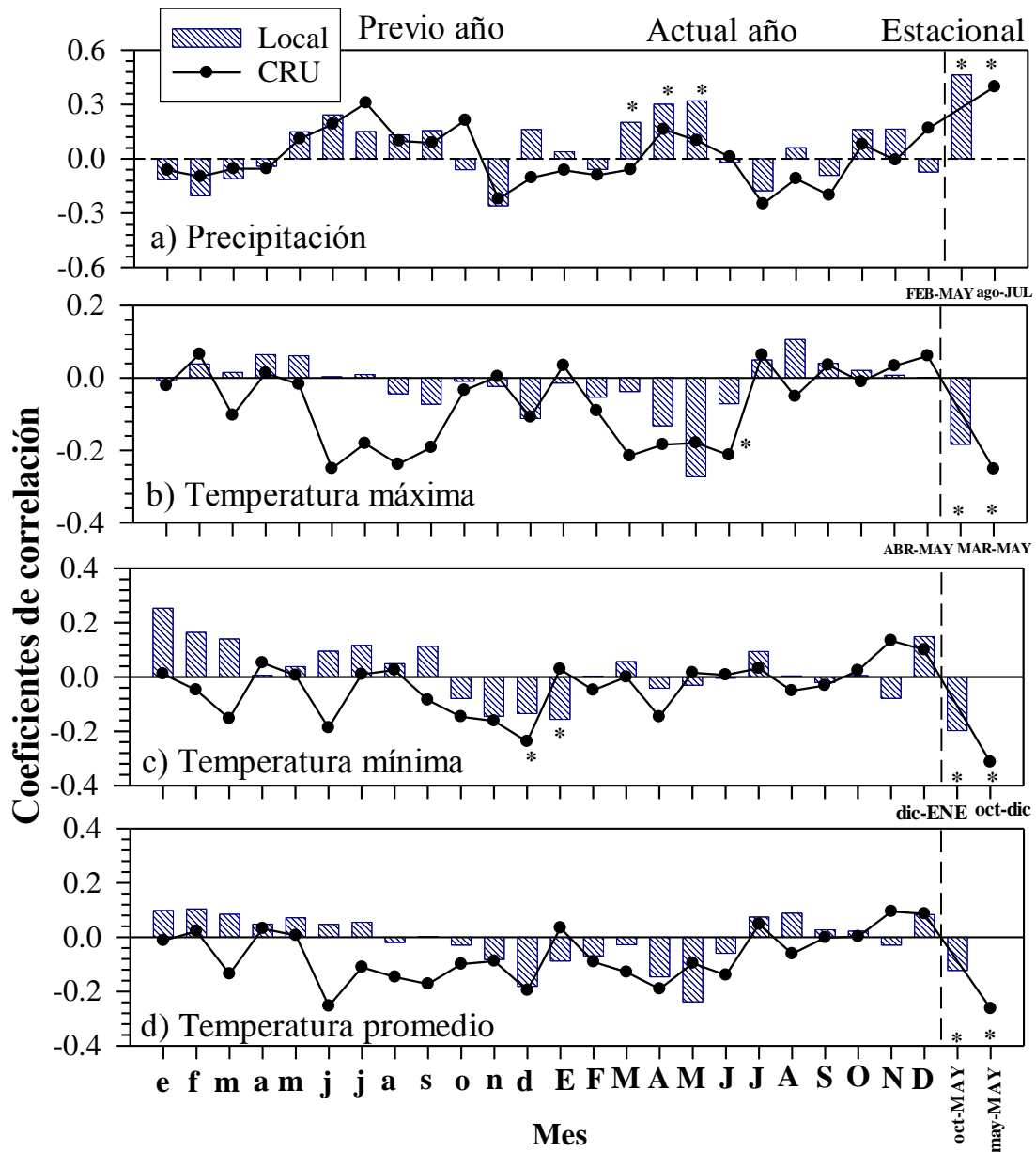


Figura 3. 5. Coeficientes de correlación entre variables climáticas locales y regionales (CRU TS4) con la cronología de ancho de anillo de *Abies hickelii* para el período de 1961-2010 en la Sierra Sur de Oaxaca, México. Las letras en minúsculas indican los meses del año previo y las letras mayúsculas indican los meses del actual año. Los asteriscos muestran coeficientes de correlación significativos ($p < 0.05$).

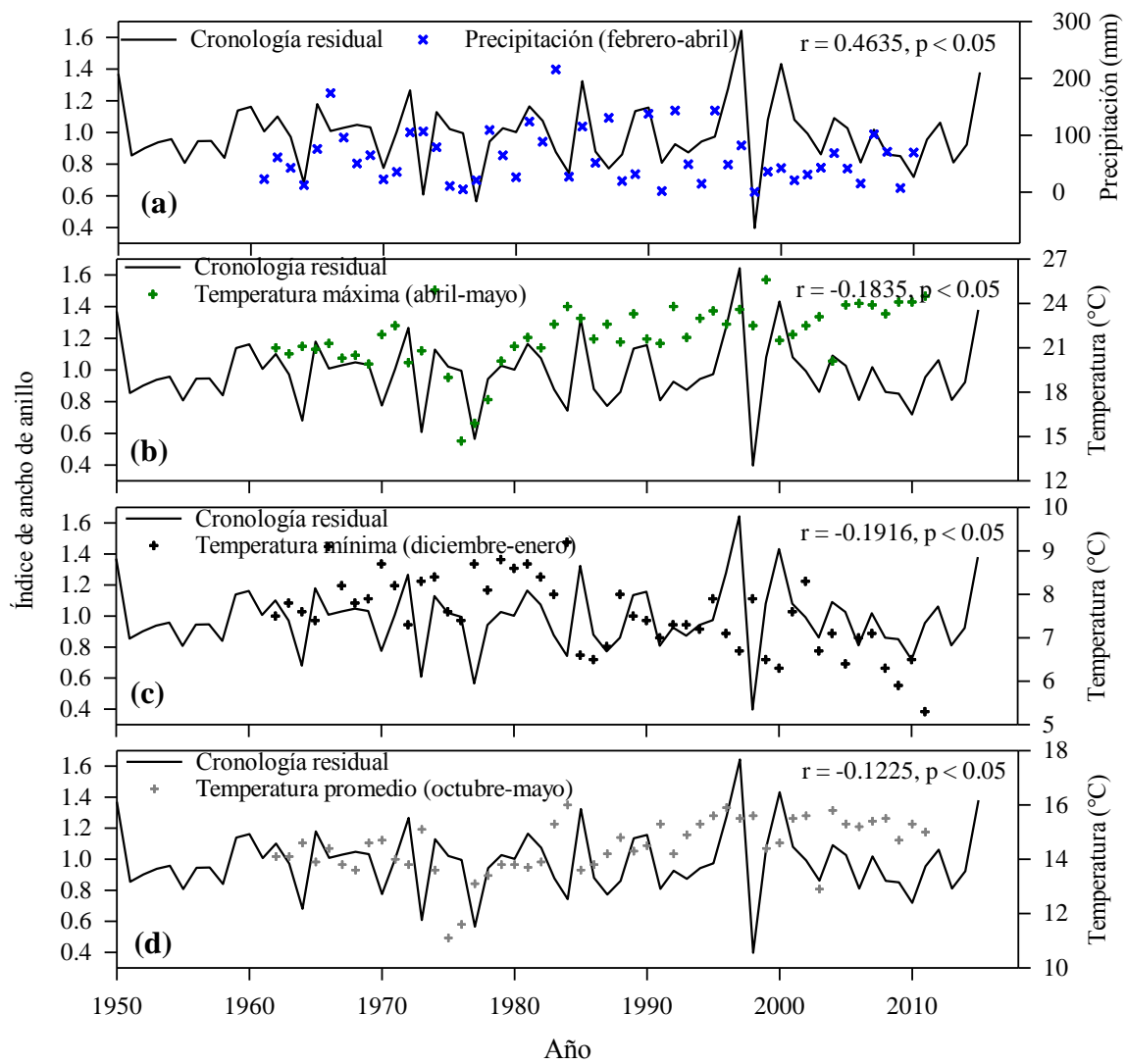


Figura 3. 6. Correlaciones entre las series de crecimiento radial de *Abies hickelii* y a) precipitación, b) temperatura máxima, c) temperatura mínima y d) temperatura promedio.

Generalmente, el crecimiento de los árboles que crecen en altitudes elevadas y cerca de sus límites de distribución natural, el factor limitante es la temperatura (Sohar *et al.*, 2016). Sin embargo, en este estudio, el principal factor limitante en el crecimiento del ancho de anillo de *A. hickelii* es la precipitación de invierno-primavera. Estos resultados son similares a los obtenidos en *P. hartwegii*, conífera que se desarrolla en las altas montañas del centro de México, donde el crecimiento está influenciado fuertemente por la precipitación de invierno-primavera (Villanueva *et al.*, 2015; Astudillo-Sánchez *et al.*, 2016). De igual manera, este comportamiento ha sido registrado en los bosques de *A. religiosa* en Michoacán, México (Huante *et al.*, 1991; Cerano *et al.*, 2014; Carlón *et al.*, 2016), indicando que este patrón de crecimiento es una característica a gran escala regional en el país. Un año con alta precipitación estacional febrero-abril, favorecerá el crecimiento radial por su influencia directa en la disponibilidad de humedad del suelo, compensando así la pérdida de agua por el proceso de evapotranspiración (Li *et al.*, 2006) y un aumento en la temperatura durante la estación de primavera incrementaría la evapotranspiración y disminuiría la humedad del suelo, limitando así en el crecimiento radial (Dawadi *et al.*, 2013; Thapa *et al.*, 2015). Por otro lado, un invierno frío puede reducir las actividades de raíz y brotes e incluso causarles daños, como la desecación por helada (Zhu *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2010), además puede retrasar el comienzo de la temporada de crecimiento y, por lo tanto, causar un crecimiento reducido (Shutova *et al.*, 2006; Karlsen *et al.*, 2007).

Las variaciones temporales del índice Niño 3.4 mostraron una asociación negativa ($r = -0.4960$, $p < 0.05$) con los valores medios de agosto a diciembre del año previo con el crecimiento radial para el período de 1857-2015 (Figura 3.7a). De igual manera, la cronología residual se correlacionó negativamente con el MEI de septiembre previo año ($r = -0.4821$, $p < 0.05$, 1951-2015) (Figura 3.7b). En la figura 3.8 indica que los crecimientos de

árboles se correlacionan negativamente con la temperatura de la superficie del mar (SST) en el Pacífico ecuatorial. Estos resultados confirman la influencia del ENSO en la región de estudio, registrándose un crecimiento menor con un valor de índice de ancho de anillo anual menor al promedio (<1.0) particularmente en eventos El Niño considerados como moderados a intensos para los años 1811, 1878, 1933, 1964, 1977 y 2006 a extremos 1878 y 1998. Por lo contrario, la correlación entre el crecimiento de los árboles con el PDO y AMO fueron bajas (Figura 6 c-d).

La reducción en el crecimiento radial ha sido reportada en otras coníferas en combinación con intensos eventos del ENSO que afectan en el centro de México (Stahle *et al.*, 2012; Villanueva-Díaz *et al.*, 2016; Astudillo-Sánchez *et al.*, 2016). En eventos El Niño (fase cálida) del ENSO la anomalía de la temperatura de la superficie del mar está por encima del promedio en el Pacífico oriental y central, cuyo período varía de tres a siete años (Glantz, 2000). Este evento, se ve acompañado por cambios en la intensidad de los vientos alisios, que incluso soplan en la dirección opuesta (Bravo *et al.*, 2017).

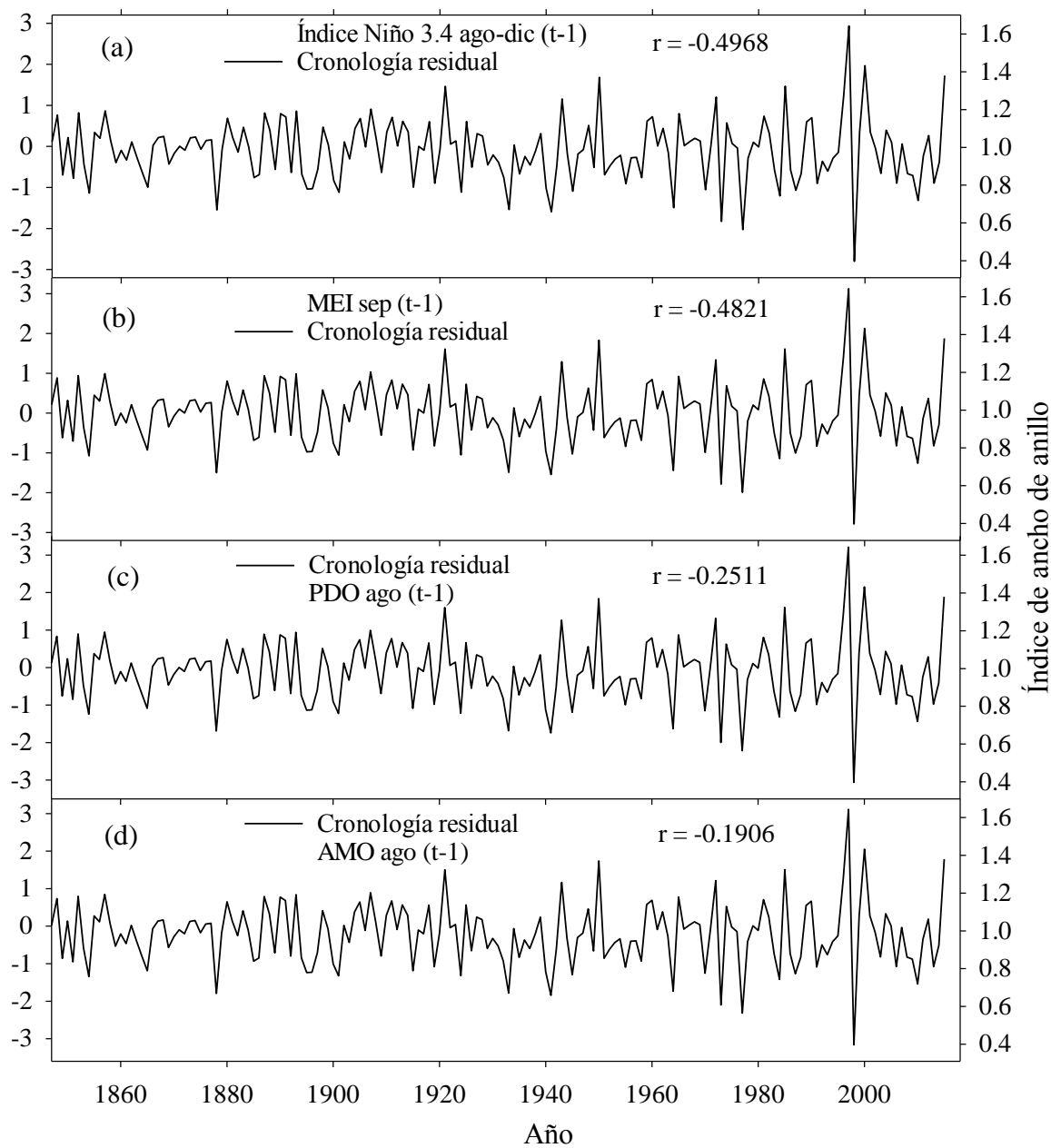


Figura 3. 7. Comparación entre la cronología residual de *Abies hickelii* y a) índice Niño 3.4 de agosto-diciembre (1857-2015); b) MEI de septiembre (1950-2015); c) PDO de agosto (1900-2015) y d) AMO agosto (1880-2015).

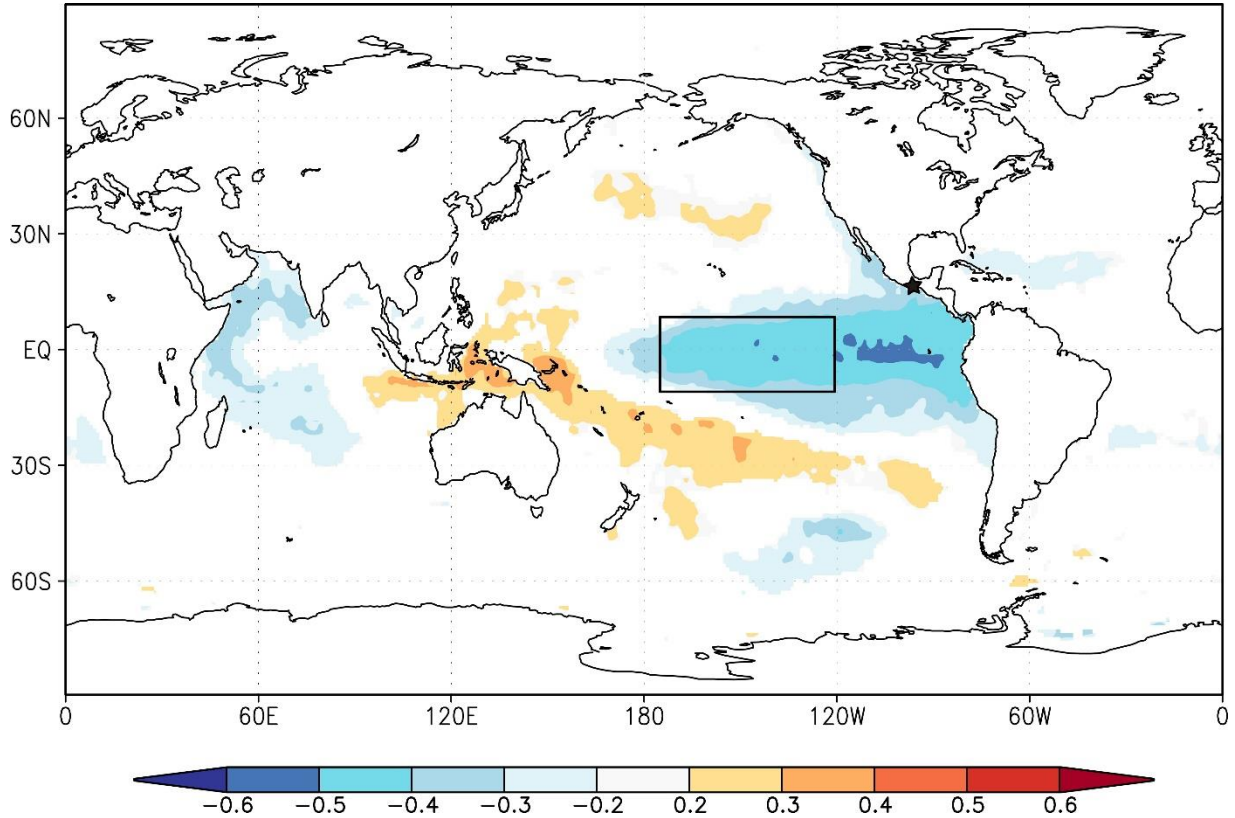


Figura 3. 8. Correlación espacial entre cronología residual de *Abies hickelii* y la temperatura de la superficie del mar (SST) (HadISST 1 reconstrucción $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$) de agosto-diciembre previo año (1870-2015). Las áreas coloreadas en los mapas representan las zonas que son estadísticamente significativas ($p < 0.10$). La región Niño 3.4 está indicada por un rectángulo negro. Así mismo la estrella negra indica el área de estudio. El análisis fue realizado por KNMI Climate Explorer (The Royal Netherlands Meteorological Institute, <http://climexp.knmi.nl/>).

En México, los efectos del ENSO en condiciones “El niño” sobre el territorio han sido documentados, los cuales indican que la precipitación decrece en la parte sur y se incrementa significativamente en el norte y el noroeste (Magaña *et al.*, 2003; Pavia *et al.*, 2006). Bravo-Cabrera *et al.* (2010) encontraron que en los años "El Niño" la precipitación disminuyó en los estados de Veracruz, Chiapas, Oaxaca y Guerrero para el período de 1950 a 2006, y estas tendencias en la precipitación se invierten de manera opuesta durante "La Niña". Estos resultados coinciden con los obtenidos en este estudio donde la variabilidad del crecimiento radial del oyamel hickelii disminuye en los años considerandos como eventos “El Niño”. El ENSO causa anomalías de una combinación de variables climáticas, las cuales están estrechamente relacionada con el crecimiento de los árboles, es decir, el ENSO y el crecimiento de los árboles están vinculados a una combinación similar de variables climáticas en lugar de una sola variable climática, como la temperatura o la precipitación. Una fase cálida (fría) del ENSO se relaciona con una circulación de Walker débil (fuerte) y, por lo tanto, la retirada de las aguas cálidas del océano Pacífico tropical occidental a su parte oriental, que se asocia con un área de calentamiento más grande (más pequeña) del océano Pacífico tropical y el transporte de calor mejorado (debilitado) desde los trópicos a las latitudes medias y altas (Fu *et al.*, 2006). Por lo tanto, se espera un clima generalmente más cálido (más frío) durante la fase cálida (fría) del ENSO para todo el Pacífico tropical. Esto puede ser particularmente el caso en invierno-primavera, cuando El Niño está en su fase de madurez y decadencia (Wang *et al.*, 2018).

3.5 Conclusiones

La variación en el crecimiento del ancho de anillo está influenciado por el clima local, y la precipitación de invierno-primavera y la temperatura mínima de invierno son los principales factores limitantes. La influencia de los controladores climáticos a gran escala (SST y ENSO) en el crecimiento de los árboles fue significativa. Las dos fases del fenómeno ENSO también tienen diferentes efectos sobre el crecimiento de los árboles. La reducción del crecimiento durante la fase El Niño es más prominente que el efecto positivo generado durante la fase La Niña. Las relaciones de crecimiento-clima observados en los anillos de los árboles de *Abies hickelii* son útiles para reconstruir datos climáticos, especialmente en las áreas de alta montaña del sur de México donde la información meteorológica disponible es limitada.

3.6 Literatura Citada

- Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., Nava-Bernal, G. E., & Gómez-Albores, M. A. (2016). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees*, 31(2), 441-453.
- Bravo-Cabrera, J. L., Azpra Romero, E., Zarraluqui Such, V., Gay García, C., & Estrada Porrúa, F. (2010). Significance tests for the relationship between "El Niño" phenomenon and precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 49(4), 245-261.
- Bravo-Cabrera, J. L., Azpra-Romero, E., Zarraluqui-Such, V., & Gay-García, C. (2017). Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atmósfera*, 30(3), 221-232.
- Briffa, K. R., Osborn, T. J., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Shiyatov, S. G., & Vaganov, E. A. (2002). Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 1, local and regional climate signals. *The Holocene*, 12(6), 737-757.
- Carlón A. T., Mendoza, M. E., Pérez-Salicrup, D. R., Villanueva-Díaz, J., & Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the monarch butterfly biosphere reserve, central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103-116.

- Carlson, C. T., Mendoza, M. E., Díaz, J. V., & Li, Y. (2018). Climatic response of *Pinus cembroides* Zucc. radial growth in Sierra del Cubo, Guanajuato, Mexico. *Trees*, 1-13.
- Carrer, M., & Urbinati, C. (2001). Assessing climate-growth relationships: a comparative study between linear and non-linear methods. *Dendrochronologia*, 19(1), 57-65.
- Carrer, M., Nola, P., Motta, R., & Urbinati, C. (2010). Contrasting tree- ring growth to climate responses of *Abies alba* toward the southern limit of its distribution area. *Oikos*, 119(9), 1515-1525.
- Cerano J. P., Díaz, J. V., Martínez, R. C., Selem, L. V., Caciano, R. T., & De la Cruz, V. G. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2014(83), 41-54.
- Cook, E. R. & Holmes R.L. (1999). Program ARSTAN – Chronology Development with Statistical Analysis (User's manual for program ARSTAN). Tucson, AZ: *Laboratory of Tree-Ring Research*, The University of Arizona.
- Cook, E. R., & Kairiukstis, L. A. (eds.). (2013). *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Springer Science & Business Media.
- Cook, E. R., Glitzenstein, J. S., Krusic, P. J., & Harcombe, P. A. (2001). Identifying functional groups of trees in west Gulf Coast forests (USA): a tree- ring approach. *Ecological applications*, 11(3), 883-903.
- Dawadi, B., Liang, E., Tian, L., Devkota, L. P., & Yao, T. (2013). Pre-monsoon precipitation signal in tree rings of timberline *Betula utilis* in the central Himalayas. *Quaternary International*, 283, 72-77.
- Farjon, A. (2013). *Abies hickelii*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2013*: e.T42286A2969866. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T42286A2969866.en>. Downloaded on : 09 December 2018
- Fritts, H.C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London 567 pp.
- Fu, Q., Johanson, C. M., Wallace, J. M., & Reichler, T. (2006). Enhanced mid-latitude tropospheric warming in satellite measurements. *Science*, 312(5777), 1179-1179.
- García, E. (1998). *Climas, Clasificación de Köppen, modificado por García. Carta de climas, escala 1:1 000 000*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio].
- Glantz, M. H., & Glantz, M. H. (2001). *Currents of change: impacts of El Niño and La Niña on climate and society*. Cambridge University Press.
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring Research*, 57, 205–221.

- Guitérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 85(1), 179-188.
- Harris, I. P. D. J., Jones, P. D., Osborn, T. J., & Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3), 623-642.
- Holmes, R.L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull.* 44, 69–75.
- Huante, P., Rincón, E., & Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin*. 51:15-28.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, MX). (2009). *Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC)*. Morelos, México: Software, Jiutepec.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (2010). Mapa de Edafología. Escala 1:250,000. México: INEGI.
- Karlsen, S. R., Solheim, I., Beck, P. S., Høgda, K. A., Wielgolaski, F. E., & Tømmervik, H. (2007). Variability of the start of the growing season in Fennoscandia, 1982–2002. *International Journal of Biometeorology*, 51(6), 513-524.
- Kwiaton, M., & Wang, J. R. (2015). Radial growth responses of four deciduous species to climate variables in central Ontario, Canada. *American Journal of Plant Sciences*, 6(14), 2234.
- Li, J., Gou, X., Cook, E. R., & Chen, F. (2006). Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in northwest China. *Geophysical Research Letters*, 33(7).
- Linares, J. C., Camarero, J. J., & Carreira, J. A. (2009). Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Global Ecology and Biogeography*, 18(4), 485-497.
- López-Hernández, M. I., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E. H., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Esquivel-Arriaga, G. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede a variables climáticas en el noroeste de Lagunas de Montebello, Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4).
- Macias, M., Andreu, L., Bosch, O., Camarero, J. J., & Gutiérrez, E. (2006). Increasing aridity is enhancing silver fir *Abies alba* mill.) water stress in its south-western distribution limit. *Climatic Change*, 79(3-4), 289-313.
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313-330.

- Martínez, M. (1948). Los Abies mexicanos. *Anales del Instituto de Biología de México*.
- Mazza, G., Gallucci, V., Manetti, M. C., & Urbinati, C. (2014). Climate–growth relationships of silver fir (*Abies alba* Mill.) in marginal populations of Central Italy. *Dendrochronologia*, 32(3), 181-190.
- Naylor, T. H. (1971). Dendrochronology in Oaxaca, Mexico: a preliminary study. *Tree-ring Bulletin*, 31:25-29.
- Norma Oficial Mexicana (2010) NOM-059-SEMARNAT. (2010). Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categoría de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. SEMARNAT. Diario Oficial de la Federación. Distrito Federal, México
- Panthi, S., Bräuning, A., Zhou, Z. K., & Fan, Z. X. (2018). Growth response of *Abies georgei* to climate increases with elevation in the central Hengduan Mountains, southwestern China. *Dendrochronologia*, 47, 1-9.
- Pavia, E. G., Graef, F., & Reyes, J. (2006). PDO–ENSO effects in the climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19(24), 6433-6438.
- Pfeifer, K., Kofler, W., & Oberhuber, W. (2005). Climate related causes of distinct radial growth reductions in *Pinus cembra* during the last 200 yr. *Vegetation History and Archaeobotany*, 14(3), 211-220.
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C., & Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14).
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1986). North American precipitation and temperature patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*, 114(12), 2352-2362.
- Saxe, H., Cannell, M. G., Johnsen, Ø., Ryan, M. G., & Vourlitis, G. (2001). Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149(3), 369-399.
- Shi, J., Cook, E. R., Lu, H., Li, J., Wright, W. E., & Li, S. (2010). Tree-ring based winter temperature reconstruction for the lower reaches of the Yangtze River in southeast China. *Climate Research*, 41(2), 169-175.
- Shutova, E., Wielgolaski, F. E., Karlsen, S. R., Makarova, O., Berlina, N., Filimonova, T., Haraldsson, E., Aspholm, P. E., & Høgda, K. A. (2006). Growing seasons of Nordic mountain birch in northernmost Europe as indicated by long-term field studies and analyses of satellite images. *International Journal of Biometeorology*, 51(2), 155-166.

- 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*(5), 2593-2605.
- Stahle, D. W., Burnette, D. J., Díaz, J. V., Heim, R. R., Fye, F. K., Paredes, J. C., & Cleaveland, M. K. (2012). Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics*, *39*(6), 1431-1446.
- Stokes, M. A., and T. L. Smiley. (1968). *An Introduction to Tree- Ring Dating*. The University of Arizona Press, Tucson.
- Swetnam TW (1985) Using dendrochronology to measure radial growth of defoliated trees. In: *Agriculture Handbook*, no. 639. Washington, DC: USDA Forest Service, Cooperative State Research Service, pp. 1–39.
- Thapa, U. K., Shah, S. K., Gaire, N. P., & Bhujju, D. R. (2015). Spring temperatures in the far-western Nepal Himalaya since AD 1640 reconstructed from *Picea smithiana* tree-ring widths. *Climate Dynamics*, *45*(7-8), 2069-2081.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Ries, L. P., & Shugart, H. H. (2006). Tree-ring reconstructed rainfall variability in Zimbabwe. *Climate Dynamics*, *26*(7-8), 677.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *102*(23), 8245-8250.
- Trouet, V., & Van Oldenborgh, G. J. (2013). KNMI Climate Explorer: a web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research*, *69*(1), 3-13.
- Van Oldenborgh, G. J., Te Raa, L. A., Dijkstra, H. A., & Philip, S. Y. (2009). Frequency-or amplitude-dependent effects of the Atlantic meridional overturning on the tropical Pacific Ocean. *Ocean Science*, *5*(3), 293-301.
- Villanueva Díaz, J., J. Cerano P., L. Vázquez S., D.W. Stahle, P.Z. Fulé, L.L. Yocom, O. Franco R., J.A. Ruiz C. (2015). Red dendrocronológica de pino de altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 86: 5-14.
- Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Gómez-Guerrero, A., Cerano-Paredes, J., Aguirre-González, N. A., & Franco-Ramos, O. (2016). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el monte Tláloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *39*(2), 175-185.
- Wang, H., Shao, X. M., Jiang, Y., Fang, X. Q., & Wu, S. H. (2013). The impacts of climate change on the radial growth of *Pinus koraiensis* along elevations of Changbai Mountain in northeastern China. *Forest Ecology and Management*, *289*, 333-340.

- Wang, L., Fang, K., Chen, D., Dong, Z., Zhou, F., Li, Y., & Yu, M. (2018). Intensified variability of the El Niño–Southern Oscillation enhances its modulations on tree growths in southeastern China over the past 218 years. *International Journal of Climatology*, *38*(14), 5293-5304.
- Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, *23*(2), 201-213.
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (1998). Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank?. *Weather*, *53*(9), 315-324.
- Wolter, K., & Timlin, M. S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext). *International Journal of Climatology*, *31*(7), 1074-1087.
- Zang, C., & Biondi, F. (2013). Dendroclimatic calibration in R: the bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, *31*(1), 68-74.
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy- climate relationships. *Ecography*, *38*(4), 431-436.
- Zhu, H. F., Fang, X. Q., Shao, X. M., & Yin, Z. Y. (2009). Tree ring-based February–April temperature reconstruction for Changbai Mountain in Northeast China and its implication for East Asian winter monsoon. *Climate of the Past*, *5*(4), 661-666.

CONCLUSIONES GENERALES

En este estudio se confirma que los anillos anuales de las tres especies de oyamel se pueden fechar con éxito y así desarrollar series dendrocronológicas a partir de estos datos. Se presenta la primera cronología de *Abies guatemalensis* con una longitud de 206 años (1810-2015) y de *Abies religiosa* con una longitud de 296 años (1720-2015) en la Sierra Juárez de Oaxaca, asimismo una cronología de *Abies hickelii* de 205 años (1811-2015) en la Sierra Sur de Oaxaca. La información proporcionada por estos nuevos sitios para el desarrollo de registros de anillos de árboles y sus respuestas a las variaciones climáticas, indica que estos ecosistemas de alta montaña son sensibles al clima local y regional.

La variabilidad interanual en el ancho de anillo en las tres especies de oyamel está influenciada principalmente por la humedad de invierno-primavera, lo que indica una estrecha dependencia con el contenido de agua del suelo por las lluvias invernales y de primavera, que es aprovechada por los árboles al inicio de la estación de crecimiento. En cambio, si las condiciones de humedad de invierno-primavera no son las adecuadas, el aumento en la temperatura durante la estación de primavera incrementaría la evapotranspiración y disminuiría la humedad del suelo, limitando así el crecimiento y, por lo tanto, producir un anillo estrecho.

La similitud en la respuesta climática mostrada de *A. guatemalensis*, *A. religiosa* y *A. hickelii* en las dos regiones de Oaxaca es indicativa de que fenómenos circulatorios de amplio impacto pueden provocar condiciones climáticas dominantes, que caracterizan la variabilidad de las estaciones invierno-primavera. Esto fue confirmado por la relación indirecta de los índices de la variabilidad ENSO con la reducción del crecimiento radial particularmente durante eventos El Niño, asociados con una disminución en la precipitación

y un aumento de la temperatura. Otros patrones circulatorios como el PDO y AMO parecen no tener una influencia decisiva en los crecimientos de las especies estudiadas, aunque hace falta generar una red dendrocronológica más amplia con éstas y otras especies para un estudio más detallado de estos y de otros fenómenos climáticos.

Los estadísticos de la cronología y la sensibilidad climática registrada en los anillos de las tres especies de oyamel indican su adecuado potencial dendrocronológico. Los resultados obtenidos en este estudio permitirán una mejor comprensión de la respuesta de los bosques a la variabilidad climática del pasado y en relación con futuros escenarios de cambio climático, que apoyará la conservación y el manejo sostenible de las especies en los bosques de alta montaña del sur de México.