



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

**ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO E INFLUENCIA DE VARIABLES CLIMÁTICAS
EN BOSQUES TEMPLADOS DE LA RESERVA DE LA BIÓSFERA MARIPOSA
MONARCA, MÉXICO**

TESIS:
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
TEODORO CARLÓN ALLENDE

TUTORES:
MANUEL E. MENDOZA CANTÚ
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM
JOSÉ VILLANUEVA DÍAZ
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN RELACIÓN AGUA,
SUELO, PLANTA, ATMÓSFERA, INIFAP

MIEMBRO DEL COMITÉ TUTOR:
DIEGO RAFAEL PÉREZ SALICRUP
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD,
UNAM

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE DE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mis padres:

Quienes me han enseñado el respeto, el amor y la constancia

A mis mujeres:

*Ayari Surgey, llegaste a mi vida en el momento perfecto,
no hay un solo día que no piense en ti*

*Yesenia, excelente compañera de vida,
lo que hoy termina es un logro tuyo también*

AGRADECIMIENTOS

A todas aquellas personas que ayudaron a que la presente investigación fuera creciendo día a día y que sus aportes contribuyeron a concluir de manera exitosa la presente tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme una beca doctoral. Así como también por la beca mixta de movilidad para mi estancia en el extranjero.

A los proyectos SEP-CONACYT (2010-154434) y CONACYT-Ciencia Básica (179386) por el apoyo que me brindaron durante la realización de mi doctorado.

Al Posgrado (UNAM), muy especialmente al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), por brindarme la oportunidad de formar parte del programa de Doctorado en Geografía.

A los ejidatarios de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca por permitirme llevar a cabo mi trabajo de campo. A Anastacio Sarmiento por el apoyo brindado en la etapa de muestreo, principalmente por contactarme con los ejidatarios de la Reserva.

Mi formación académica en los últimos 12 años ha estado ligada a varias personas a las cuales les estoy muy agradecido, una de las personal a quien le extiendo un gran reconocimiento es al Dr. Manuel E. Mendoza Cantú, a quien le agradezco su tiempo, comprensión, interés, aportes y esfuerzo aportado a mi trabajo. Así como por aceptar el reto de ser mi tutor.

A mi tutor el Dr. José Villanueva Díaz por permitirme incursionar en el mundo de la Dendrocronología y especialmente por abrirme las puertas del Laboratorio Nacional de Dendrocronología del CENID-RASPA, INIFAP. Así como por todos su apoyo en el procesamiento de muestras y por todos los aportes a mi trabajo que siempre fueron muy atinados.

Quiero agradecer ampliamente al Dr. Diego Pérez Salicrup del IIES-UNAM, quien siempre mostró gran interés en mi trabajo, además del apoyo económico y técnico que me brindo a lo largo de mi estancia doctoral. Así como por permitirme hacer uso del equipo de laboratorio de Ecología del Manejo de Recursos Forestales.

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem del Instituto de Geografía-UNAM, por enriquecer mi trabajo con sus valiosos comentarios y por aceptar formar parte de mis sínodos. Al Dr. Antonio Lara Aguilar de la Universidad Austral de Chile, por su gran interés y apoyo en los análisis estadísticos y escritura del segundo capítulo de mi tesis. Así como por el buen trato y amabilidad durante mi estancia de investigación en el Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global.

Al Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile y a sus Emilio Cuq, Carmen Gloria por el apoyo en los análisis estadísticos. Así como a Claudio, Moisés, Gonzalo, Jorge y Carolina por hacerme sentir como en casa durante mi estancia de investigación en Valdivia, Chile.

A los Dr. Gerardo Bocco y Antonio Veyra por siempre estar al pendiente de los avances de mi tesis. Al Dr. Adrian Ghilardi y Pablo Jaramillo por todos esos

momentos de charlas que hemos tenidos tratando de encontrar solución a las cosas, así como por todo el aprecio que me tienen.

A Raquel González y Hugo Zavala por el apoyo en soporte técnico, a Antonio Navarrete y Ernesto Vega quienes siempre están dispuestos para todas mis dudas, uno de SIG y el otro de análisis estadísticos en R.

Son muchas las personas que formaron parte de esta aventura que seguramente no podré enlistar el nombre de cada una de ellas, por lo cual ofrezco una disculpa, agradezco de todo corazón a Javier (Chiquito), Pedro, Leo, Mariano, Giovanni, Ignacio, Raymundo y por supuesto a José Luis, Rita, Alexander, Alejandro y Miguel por todos los momentos que hemos compartido y que siempre me han mostrado cariño y apoyo.

A mis padres y hermanos por su gran apoyo y cariño en todo momento, gracias por creer en mí.

Por último mi más profundo agradecimiento por todo el esfuerzo, apoyo, aliento e interés en mi trabajo a mi amada esposa Yesenia, y a la más pequeña de la familia Ayari Surgey quien es el motor de mi vida, y por aguantar días completos en la Guardería, a pesar de eso siempre está dispuesta a recibirme con una gran sonrisa, beso y abrazo.

Índice

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	6
REFERENCIAS.....	11
CAPÍTULO I	14
Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México	14
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVO	17
MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
Área de estudio	17
Clasificación y ponderación de datos biofísicos.....	17
Modelado de datos biofísicos.....	18
Validación de propuesta de muestreo.....	19
RESULTADOS.....	20
Datos biofísicos del paisaje.....	20
Ponderación y modelación de datos biofísicos	21
Validación de propuesta de muestreo para estudios dendrocronológicos	21
DISCUSIÓN	22
CONCLUSIONES	23
AGRADECIMIENTOS.....	24
REFERENCIAS.....	24
CAPÍTULO II	27
Respuesta climática de <i>Pinus pseudostrobus</i> y <i>Abies religiosa</i> en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca	27
RESUMEN	28
INTRODUCCIÓN	30

MATERIALES Y MÉTODOS	32
Área de estudio	32
Patrones temporales de la precipitación y temperatura.....	34
Datos de anillos de árboles	35
Desarrollo de cronologías de ancho de anillo	36
Relación temporal entre variables climáticas y crecimiento de los árboles	37
RESULTADOS	38
Patrones temporales de variación de la precipitación y temperatura	38
Desarrollo de cronologías de ancho total de anillo	41
Influencia espacial y temporal de variables climáticas en el crecimiento radial de los árboles	45
DISCUSIÓN	51
CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS	57
CONCLUSIONES GENERALES	63
ANEXOS	66

Índice de figuras

CAPÍTULO I

- Figura 1.** Ubicación del área de estudio, Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en los estados de Michoacán y Estado de México. El presente estudio se centró en el Corredor Chincua-Campanario-Chivatí-Huacal y Cerro Pelón dejando fuera la parte del cerro Alatamirano, que no se muestra en esta figura. 18
- Figura 2.** Mapas de clases ponderadas usadas para el protocolo de identificación de sitios de muestreo, a) Clases ponderadas de pendiente del terreno, b) Clases ponderadas de orientación de laderas y c) Clases ponderadas de CVUS. 19
- Figura 3.** Mapa de distribución de los sitios potenciales de muestreo con fines dendrocronológicos. 20
- Figura 4.** Caracterización de ancho de anillo del sitio apto y no apto: a) ancho de anillo para sitio no apto, b) ancho de anillo estandarizado para sitio no apto, c) ancho de anillo para sitio apto y d) ancho de anillo estandarizado para sitio apto. Las graficas b y d muestran variación en el ancho de la serie estandarizada como función a la desviación estándar, con lo cual está eliminando el ruido ocasionado por la tendencia biológica del crecimiento de los árboles. La línea con puntos continuos muestra el número de muestra que se incluyeron a lo largo de las series. 21

CAPÍTULO II

- Figura 1.** Ubicación de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca con sitios de muestreo dendrocronológico y estaciones meteorológicas, los códigos se describen en el cuadro 1 y 2. 33
- Figura 2.** Análisis temporal de precipitación acumulada anual (a) y temperatura máxima media anual (b), las líneas verticales continuas corresponden a años con eventos extremo mínimos de precipitación (a) y aumentos de temperatura (b), las líneas verticales discontinuas corresponden a años con eventos extremos de alta precipitación acumulada. Los códigos se describen en el cuadro 1. 39
- Figura 3.** Variación temporal del factor scores de los dos primeros componentes principales, a) PC1 y PC2 de los registros de precipitación anual de cinco estaciones meteorológicas, b) PC1 y PC2 de los registros de temperatura máxima anual de cinco estaciones meteorológicas. El periodo analizado fue de 1975 a 2002. 41

Figura 4. Cronologías estándar de anillo total de ocho sitios muestreados en la RBMM. Las líneas verticales en gris corresponden a años con bajo crecimiento, las líneas verticales negras corresponden a años con alto crecimiento. Los códigos de describen en el cuadro 2.	42
Figura 5. Correlación entre las ocho cronologías en el periodo común 1929-2011, el nivel de significancia es ($P < 0.05$; $r > 0.189$). Las claves son explicadas en el cuadro 2.	43
Figura 6. Variación temporal en los factor scores para los primeros tres componentes principales de los índices de crecimiento de anillo total en las ocho cronologías. El periodo de análisis es de 1929 a 2011. La línea flexible en negritas representa la variación de baja frecuencia.	45
Figura 7. Correlación de las cronologías con registros de precipitación anual (a) y temperatura máxima anual (b), la línea discontinua indica el nivel de significancia. Los códigos se describen en el cuadro 1 y 2 ($p < 0.05$, $r > 0.275$ valor critico de correlación).	46
Figura 8. Correlación de las cronologías con serie de precipitación mensual acumulada (a) y temperatura máxima mensual acumulada (b) ($p < 0.05$ $r > 0.240$ valor critico de correlación), los valores de r^* son los que no presentaron correlación significativa.	48
Figura 9. Correlación de las cronologías con serie de precipitación mensual (a) y temperatura máxima mensual (b), la línea discontinua horizontal indica el nivel de significancia, los * indican los meses previos al año actual.	49
Figura 10. Variación temporal del crecimiento de los anillos de árboles para los PCs seleccionados de acuerdo a las ocho cronologías regionales para el periodo de 1929-2011, en comparación con los PCs correlacionados de precipitación y temperatura para el periodo de 1975-2002. a) PC4-crecimiento y PC1-precipitación; b) PC1-crecimiento y PC1-precipitación; c) PC5 crecimiento y PC3-temperatura; d) PC6-crecimiento y PC1-temperatura.	50

Índice de cuadros

CAPÍTULO I

Cuadro 1. Resultados estadísticos generados por el programa COFECHA para el sitio apto y no apto	22
---	----

CAPÍTULO II

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el presente estudio.	34
Cuadro 2. Características de los sitios de muestreo dendrocronológico en la RBMM.	35
Cuadro 3. Valores de PC's de precipitación anual y temperatura media máxima anual y porcentajes de varianza que explica cada PC.	40
Cuadro 4. Estadística descriptiva de las ocho cronologías de anillos de árboles.....	43
Cuadro 5. Valores de PC's de las ocho cronologías y porcentajes de varianza que explica cada PC.	44

RESUMEN

La evaluación y comprensión de los efectos del clima en el crecimiento de los árboles es importante para predecir la respuesta de los bosques al cambio climático. Una fuente “*proxi*” para conocer el efecto del clima en los árboles a diferentes escalas espaciales y temporales es mediante análisis dendrocronológicos; con ellos es posible comprender la variabilidad climática y cuantificar la frecuencia de eventos climáticos extremos. Estos estudios son especialmente útiles en regiones donde los registros meteorológicos son escasos o se carece de ellos. Por ello, en la presente investigación se planteó como objetivos: a) identificar áreas con presencia de árboles climáticamente sensibles y b) evaluar la influencia de variables climáticas en el crecimiento radial de los árboles de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM). El estudio comprendió dos fases: la primera, consistió en un análisis espacial de variables biofísicas por medio de técnicas de Percepción Remota (PR) y de herramientas de análisis espacial implementadas con Sistemas de Información Geográfica (SIG's), lo que permitió determinar áreas aptas para realizar muestreos dendrocronológicos, maximizando la eficiencia del muestreo de árboles sensibles a variables climáticas. La segunda fase consistió en el muestreo y análisis dendrocronológico en ocho sitios, dentro de las áreas aptas determinadas en la primera fase. El muestreo consistió en la colecta de secciones transversales y núcleos de crecimiento usando motosierra y barrena Pressler. El conteo, medición y fechado de anillos de crecimiento, permitió desarrollar ocho cronologías de anillo total, con las cuales se identificaron los patrones temporales y espaciales de crecimiento. Finalmente

se evaluó la influencia del clima en el crecimiento de los árboles, mediante análisis de correlación entre las series de tiempo dendrocronológicas y variables climáticas; mientras que la variabilidad temporal y espacial de las variables climáticas y su relación con el crecimiento de los árboles, se evaluó mediante un Análisis de Componentes Principales (PCA).

Los resultados del análisis espacial de variables biofísicas, indican que el 18% de la RBMM presenta características aptas para coleccionar muestras dendrocronológicas sensibles a variables climáticas. Los resultados de la segunda fase indican que, la cronología más extensa cubrió los últimos 185 años (1826 a 2011), y que años con reducida precipitación, condujeron a la formación de anillos estrechos, mientras que años con elevada precipitación favorecieron mayor incremento radial de los árboles. La precipitación acumulada del período estacional enero-mayo tuvo la mayor influencia en el crecimiento de los árboles; la temperatura máxima de mayo fue la que mostró una mayor influencia negativa en el crecimiento, aunque no en todas las cronologías. Los análisis de PCA no indicaron diferencias significativas entre los sitios de las secciones norte, centro y sur; sin embargo, sí se detectaron patrones temporales comunes de crecimiento entre las ocho cronologías a pesar que se trabajó con especies diferentes.

Las conclusiones principales de la presente investigación fueron: a) Los análisis espaciales de variables biofísicas, previas al muestreo dendrocronológico, contribuyen a la identificación de sitios con árboles sensibles, a eficientar su muestreo y procesamiento, y b) La precipitación tuvo la mayor influencia en promover incremento radial de *Pinus pseudostrobus* y *Abies religiosa*, lo que sugiere que eventos extremos

de precipitación y/o temperatura máxima, pueden afectar significativamente el crecimiento de los árboles, con efecto en la dinámica de los bosques, ya que una reducción en la precipitación del período estacional invierno-primavera, aunado a un incremento en la temperatura del mes de mayo, promoverá una reducción en crecimiento radial de los árboles y en consecuencia afectación en el hábitat de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*).

ABSTRACT

Understanding and Evaluation and of the effects of climate on the growth of trees is important for predicting the response of forests to climate change. Dendrochronological analysis is a "proxy" useful to understand the effect of weather on trees at different spatial and temporal scales. . Dendrochronological analysis allow us to understand climate variability, and quantify the frequency of extreme events. These studies are especially useful in areas where meteorological records are scarce or missing. The aims of this research are: a) to identify areas with the presence of trees climatically sensitive b) to evaluate the influence of climatic variables in the radial growth of trees of *Abies religiosa* and *Pinus pseudostrobus* in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR). The study consisted of two phases: the first was related to determine areas suitable for dendrochronological sampling based on a spatial analysis of biophysical variables using remote sensing techniques (RS) and spatial analysis tools implemented in Geographic Information Systems (GIS). The procedure allowss to maximize the efficiency the sampling of climatic sensitive trees. The second phase consisted in sampling eight sites within the suitable areas identified in the first phase, and carried out a dendrochronological analysis. The sampling consisted of the collection of cross sections and increment cores with chainsaw and Pressler increment borer. The counting, measuring and tagging of growth rings, allowed to develop eight full ring chronologies. They permitted identified the temporal and spatial patterns of growth. Finally the influence of climate on tree ring growth was evaluated by a correlation analysis between the dendrochronological time series and climate variables; while the temporal and

spatial variability of climate variables and their relationship to the ring growth of the trees was evaluated by Principal Component Analysis (PCA).

The results of the spatial analysis of biophysical variables indicated that 18% of the MBBR has suitable characteristics for collecting dendrochronological samples sensitive to climatic variables. The results of the second phase indicated that the most extensive chronology covering the last 185 years (1826-2011), and the years with low precipitation led the formation of narrow rings, while years with high precipitation favored greater radial ring increment on the trees. The cumulative seasonal precipitation from January to May period had the greatest influence on the growth ring of trees; the maximum temperature in May has the greater negative impact on growth, but not all the chronologies showed the same patterns. PCA analysis indicated that there are not significant differences between the sites on the north, central and south of the area; however, a common temporal pattern of growth was detected among the eight chronologies. The main conclusions of this research were: a) The spatial analysis of biophysical variables previous dendrochronological sampling contribute to the identification of sensitive sites trees, to streamline its sampling and processing, and b) The precipitation had the greatest influence on promoting radial growth of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa*, suggesting that extreme precipitation events and / or high temperature can significantly affect the growth of trees, with effect on forest dynamics. A reduction in precipitation during winter-spring season, coupled with an increase in temperature of May, will promote a reduction in radial growth of trees and consequently affecting the habitat of the monarch butterfly (*Danaus plexippus*).

INTRODUCCIÓN GENERAL

El clima es el principal factor que controla la distribución de las plantas a escala continental (Thompson *et al.*, 2000), y éste presenta una estrecha relación con la altitud y latitud, que en conjunto determinan la distribución de los bosques (Peñuelas y Boada, 2003; Thompson *et al.*, 2000). La evaluación y comprensión de los efectos del clima en el crecimiento de los bosques es importante para predecir la respuesta de éstos al cambio climático futuro (Hereş *et al.*, 2014); es decir, al incremento de temperaturas, a la alteración de patrones de precipitación, y al incremento en la frecuencia y severidad de las sequías (Easterling *et al.*, 2000; Seager *et al.*, 2009; Teskey *et al.*, 2014). Se ha documentado, que las especies de árboles pueden mostrar diferentes respuestas de crecimiento a estos componentes del cambio climático, lo que puede desencadenar cambios en la composición y crecimiento de los bosques. Por ejemplo, algunos estudios han mostrado que el crecimiento de los árboles se verá limitado como consecuencia del calentamiento global (Castagneri *et al.*, 2014; Therrell *et al.*, 2002; Scott, 2014; Ziaco *et al.*, 2014).

Una forma de evaluar el efecto del clima en los árboles es mediante análisis de series de tiempo dendrocronológicos, las cuales son una fuente indirecta para conocer los cambios ambientales ocurridos en el pasado (Bradley, 1999; Hughes, 2011; Trenberth y Otto-Bliesner, 2003). Estos análisis, resultan especialmente apropiados para estudiar las variaciones naturales y antropogénicas en los ecosistemas forestales (Bradley, 1999; Fritts, 2001; Speer, 2010), para de esta forma, entender la influencia de variables climáticas en el crecimiento de los bosques.

Existen varios factores que influyen en el crecimiento de los bosques, algunos de estos son: a) las variables físicas del terreno a nivel de sitio (Fekedulegn y Colbert, 2003; Barij *et al.*, 2007) y b) el grado de conservación en que se encuentran los bosques (Fritts, 2001). Dependiendo de las variables mencionadas anteriormente y de las variables climáticas, los árboles pueden ser complacientes o sensibles (Fritts, 2001). Los árboles complacientes son aquellos que no responde a las variaciones del clima, mientras que los árboles sensibles son aquellos que presentan variación interanual en el ancho de sus anillos en respuesta a factores climáticos (Fritts, 2001; Speer, 2010). Las variables físicas como la pendiente del terreno y orientación de laderas, también influyen en el crecimiento de los árboles (Barij *et al.*, 2007; Liang *et al.*, 2006; Xiao *et al.*, 2015), prueba de ello, es que los árboles que se encuentran en pendientes escarpadas y con laderas orientadas al sur, en el caso del hemisferio norte, presentan un crecimiento más lento, desencadenando la formación de anillos sensibles a periodos con condiciones hidrológicas limitantes (Hairston y Grigal, 1991; Thomas, 2000; Carlón-Allende *et al.*, 2015). Debido a la influencia en el crecimiento de los árboles de las variables mencionadas, es importante determinar y evaluar espacialmente áreas con presencia de árboles sensible a variables climáticas, con lo cual garanticemos maximizar la eficiencia en los muestreos de árboles sensibles, y de esta forma eliminar la menor cantidad de muestras durante el proceso de fechado, situación que representa un ahorro en los costos de colecta y procesado para la generación de series dendrocronológicas.

La RBMM, se caracteriza por tener una topografía accidentada, con presencia de bosques templados, donde se ha documentado que los árboles de *A. religiosa* tienen potencial dendroclimático, debido que existe una relación entre las variables climáticas y su crecimiento radial (Huante *et al.*, 1991; Salazar y Salgado, 2000). Sin embargo, Huante *et al.*, (1991) solo reportaron edades de 70 años (1920-1990); mientras que Salazar y Salgado (2000) únicamente encontraron arbolado de 50 años de edad (1950-2000), mientras que para el caso de *P. pseudostrobus* no existen registros de la influencia de las variables climáticas en el crecimiento radial de dicha especie. En este sentido, es importante contar con cronologías más extensas que proporcionen información para la comprensión de patrones temporales de su crecimiento y su relación con variables climáticas, lo cual permita conocer la variabilidad climática en el tiempo a una resolución anual o incluso estacional (Bradley, 1999; Speer, 2010); es decir, profundizar en el conocimiento de las variables climáticas y su influencia en el crecimiento de los árboles, contribuyendo en estos términos al entendimiento de la variación del clima a lo largo del tiempo y a la dinámica en el incremento radial de los bosques de la RBMM, los cuales son clave para la preservación de la mariposa monarca (*Danaus plexippus* L.).

En la presente investigación se abordaron las siguiente preguntas: ¿Cuál es la influencia de variables biofísicas en la presencia/ausencia de árboles climáticamente sensibles?, ¿Existe alguna relación entre la variabilidad climática y el crecimiento de árboles en la RBMM? y ¿Cómo influyen las variables climáticas específicamente en el crecimiento radial de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa*?. Para responder estas preguntas,

nos planteamos como objetivo general: Identificar áreas con presencia de árboles climáticamente sensibles y evaluar la influencia de variables climáticas en el crecimiento radial de los árboles de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* en la RBMM. Para cumplir con el objetivo, se planteó la siguiente estructura de tesis.

Estructura de la tesis

El **primer capítulo**, consistió en un "**Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México**". Este análisis consistió en: identificar áreas con presencia de árboles climáticamente sensibles en función a un análisis espacial de variables biofísicas del paisaje, por medio del uso de técnicas de Percepción Remota (PR) y herramientas de análisis espacial, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para ello, en primera instancia se interpretó la Cobertura Vegetal y Uso de Suelo (CVUS) a escala 1:15,000. Posteriormente, a partir de un modelo digital de elevación se generaron datos de pendiente de terreno y orientación de laderas. Finalmente, con los datos biofísicos (CVUS, pendiente de terreno y orientación de laderas), se realizó un análisis espacial multicriterio para identificar las áreas aptas para muestreos dendrocronológicos. Las áreas identificadas mediante el análisis multicriterio, se verificaron a través de un muestreo y análisis dendrocronológico, usando métodos estándares de fechado, medición y generación de series de crecimiento estandarizadas mediante el uso de los programas dendrocronológicos COFECHA y ARSTAN.

El **segundo capítulo**, consistió en "**Determinar la influencia de variables climáticas en el crecimiento de bosques de coníferas**" para lo cual se planteó: a) identificar patrones temporales de crecimiento radial de los bosques de la RBMM, b) analizar los patrones de variación temporal de la temperatura y la precipitación a partir de registros instrumentales, c) evaluar la influencia de variables climáticas en el crecimiento radial de los árboles de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa*. Mediante el análisis de las variables climáticas, se detectaron años extremos con baja y alta precipitación, y temperatura, y de esta forma, se determinó la presencia de patrones comunes de crecimiento radial para las ocho cronologías. Mientras que la influencia de las variables climáticas en el crecimiento de los árboles, se determinó mediante análisis de correlación entre las series de tiempo dendrocronológicas y registros de precipitación y temperatura máxima anual, estacional y mensual.

Finalmente, se presentan las conclusiones generales de la tesis. De esta manera, se cubrieron los objetivos planteados en esta investigación, que consideró la influencia de variables climáticas en el crecimiento de los bosques *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* de la RBMM, fundamentado en el análisis con métodos dendrocronológicos.

REFERENCIAS

- Barij, N., Stokes, A., Bogaard, T., Van Beek, R., 2007. Does growing on a slope affect tree xylem structure and water relations? *Tree Physiol.* 27, 757–764.
- Bradley, R.S., 1999. *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary.* Academic Press.
- Castagneri, D., Nola, P., Motta, R., Carrer, M., 2014. Summer climate variability over the last 250 years differently affected tree species radial growth in a mesic *Fagus–Abies–Picea* old-growth forest. *For. Ecol. Manag.* 320, 21–29.
- Easterling, D.R., Evans, J.L., Groisman, P.Y., Karl, T.R., Kunkel, K.E., Ambenje, P., 2000. Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review*. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 417–425.
- Fekedulegn, D., Hicks Jr., R.R., Colbert, J.J., 2003. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed. *For. Ecol. Manag.* 177, 409–425.
- Fritts, H.C., 2001. *Tree Rings and Climate.* Blackburn Press.
- Hairston, A.B., Grigal, D.F., 1991. Topographic influences on soils and trees within single mapping units on a sandy outwash landscape. *For. Ecol. Manag.* 43, 35–45.
- Hereş, A.-M., Camarero, J.J., López, B.C., Martínez-Vilalta, J., 2014. Declining hydraulic performances and low carbon investments in tree rings predate Scots pine drought-induced mortality. *Trees* 28, 1737–1750.

- Huante, P., Rincón, E., Swetnam, T.W., 1991. Dendrochronology of *Abies Religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bull.* 51, 15–28.
- Hughes, M.K., 2011. Dendroclimatology in High-Resolution Paleoclimatology, in: Hughes, M.K., Swetnam, T.W., Diaz, H.F. (Eds.), *Dendroclimatology, Developments in Paleoenvironmental Research*. Springer Netherlands, pp. 17–34.
- Liang, E., Shao, X., Eckstein, D., Huang, L., Liu, X., 2006. Topography- and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau. *For. Ecol. Manag.* 236, 268–277.
- Martín-Benito, D., Del Río, M., Heinrich, I., Helle, G., Cañellas, I., 2010. Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. *For. Ecol. Manag.* 259, 967–975.
- Matthew D Therrell, D.W.S., 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *J. Geophys. Res.* 107, 4205.
- Peñuelas, J., Boada, M., 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Glob. Change Biol.* 9, 131–140.
- Salazar S.B. & Salgado, T.T. (2000) Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques*, 6, 73-86.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., Li, C., Cook, E., Stahle, D.W., 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *ATMOSFERA* 22.

- Speer, J.H., 2010. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. University of Arizona Press.
- Scott, S., 2014. An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere. *Quat. Sci. Rev.* 95, 132–150.
- Teskey, R., Wertin, T., Bauweraerts, I., Ameye, M., Mcguire, M.A., Steppe, K., 2014. Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. *Plant Cell Environ.* n/a–n/a. doi:10.1111/pce.12417
- Thomas, P.A., 2000. *Trees: Their Natural History*. Cambridge University Press.
- Thompson, R.S., Anderson, K.H., Bartlein, P.J., Smith, S.A., 2000. Atlas of relations between climatic parameters and distributions of important trees and shrubs in North America; additional conifers, hardwoods, and monocots (USGS Numbered Series No. 1650-C), Professional Paper.
- Trenberth, K.E., Otto-Bliesner, B.L., 2003. Toward Integrated Reconstruction of Past Climates. *Science* 300, 589–590.
- Xiao, S., Xiao, H., Peng, X., Wang, W., Chen, X., Tian, Q., 2015. Dendroecological assessment of Korshinsk peashrub (*Caragana korshinskii* Kom.) from the perspective of interactions among growth, climate, and topography in the western Loess Plateau, China. *Dendrochronologia* 33, 61–68.
- Ziaco, E., Biondi, F., Rossi, S., Deslauriers, A., 2014. Climatic Influences on Wood Anatomy and Tree-Ring Features of Great Basin Conifers at a New Mountain Observatory. *Appl. Plant Sci.* 2, 1400054.

CAPÍTULO I

Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México.



Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México

Landscape spatial analysis as a base for dendrochronological sampling: The case of the Biosphere Reserve of Monarch Butterfly, Mexico

Teodoro Carlón-Allende¹, Manuel E. Mendoza¹, José Villanueva-Díaz² y Diego R. Pérez-Salicrup³

¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Michoacán, México. mmendoza@ciga.unam.mx
*Autor de correspondencia. tcarlon@pmip.unam.mx

²INIFAP, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Durango, México. villanueva.jose@inifap.gob.mx

³Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Michoacán, México. diego@cieceo.unam.mx

RESUMEN

El análisis espacial del paisaje, con técnicas de Percepción Remota (PR) y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), es un procedimiento poco usado en la identificación de sitios potencialmente idóneos para el muestreo dendrocronológico. En el presente trabajo se diseñó un protocolo para identificar áreas con árboles climáticamente sensibles, empleando un análisis espacial de variables biofísicas. El diseño consistió en el análisis de la pendiente del terreno, la orientación de laderas y la distribución de Cobertura Vegetal y Uso de Suelo (CVUS), mediante el uso de técnicas de PR y herramientas de SIG. El protocolo se validó mediante un muestreo dendrocronológico en dos sitios adyacentes. Los análisis estadísticos del ancho de anillos de crecimiento se realizaron mediante los programas COFECHA y dplR. Los resultados indicaron que 18% de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca presenta características aptas para coleccionar muestras dendrocronológicas sensibles a variación climática. Los análisis estadísticos indican que existen diferencias entre los dos sitios en edad de árboles, diámetro y ancho de los anillos. La propuesta del diseño de muestreo permitió ubicar sitios con árboles longevos y sensibles, lo que se traduce en alta variación interanual en el ancho de anillos. El análisis espacial de variables biofísicas previas al muestreo dendrocronológico, contribuye a la identificación de sitios con árboles sensibles y a eliminar menos muestras. El protocolo propuesto es eficiente y puede ser replicable en otras áreas.

PALABRAS CLAVE: Cobertura vegetal y uso de suelo, datos biofísicos, dendroclimatología, Análisis espacial.

ABSTRACT

Landscape spatial analyses using Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) has been scarcely used to identify sites with dendrochronological potential. For this study, we designed a protocol to identify areas with climatically sensitive trees, based on the spatial analysis of landscape biophysical features. The protocol included the analyses of slope angles, slope aspect, and the distribution of Land Cover and Land Use (LCLU) using RS and GIS tools. The protocol was validated through dendrochronological sampling in two adjacent sites. Analyses of tree ring widths were done using COFECHA and dplR. Results suggest that sensitive trees grow in 18% of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve. Trees from the two sites differed in age, diameter, and mean ring width. Our protocol allowed us to identify sites with long-lived and sensitive trees as represented by the high inter-annual variation found in tree ring widths. The spatial analysis of biophysical variables prior to sampling enables the identification of sites with sensitive trees implying the elimination of less samples. Our proposed protocol is efficient and can be used in other areas.

KEY WORDS: Forest cover and land use, biophysical data, dendroclimatology, spatial analysis.

INTRODUCCIÓN

El análisis espacial de variables físicas, derivadas de un Modelo Digital de Elevación (MDE), como son la pendiente del terreno y la orientación de laderas, así como de la Cobertura Vegetal y Uso de Suelo (CVUS), son utilizados con frecuencia en estudios de cuantificación y explicación del cambio de CVUS, de determinación de biomasa, de degradación de bosques, en estudios hidrológicos y en los programas de manejo de recursos naturales (Guimet, 1992; Sample, 2004; Mendoza *et al.*, 2011; Bravo *et al.*, 2012). Sin embargo, este tipo de análisis ha sido poco utilizado en estudios dendrocronológicos, en los que es fundamental identificar sitios con árboles sensibles a variables climáticas. Esto puede deberse a la poca relevancia otorgada a los análisis espaciales con herramientas de Percepción Remota (PR) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), con los cuales es posible determinar la ubicación de áreas boscosas con mayor probabilidad de contener árboles climáticamente sensibles y longevos.

Se les llama climáticamente sensibles a los árboles que presentan variación interanual en el ancho de sus anillos en respuesta a factores climáticos (Fritts, 1976; Speer, 2010). La variación en el ancho del anillo se conoce como sensibilidad y se puede estimar mediante una inspección visual o a partir de mediciones de ancho de los anillos. Estas variaciones se pueden expresar estadísticamente como sensibilidad media y son una medida de las diferencias relativas de la anchura entre anillos (Fritts, 1976). La variación anual en el ancho de los anillos puede deberse a una serie de variables que influyen en el crecimiento de los árboles. Estas pueden incluir la topografía, la especie muestreada, la edad del árbol, y la disponibilidad de nutrientes almacenados en el árbol y el suelo. Pero también pueden reflejar la variación en factores climáticos como la precipitación, la temperatura, el viento, la humedad y la insolación (Bradley, 1999; Fekedulegn *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2006; Speer, 2010). Las diferencias espaciales en las variables físicas como la pendiente del terreno y la orientación de laderas también influyen en el crecimiento de los árboles (Makinen *et al.*, 2002; Liang *et al.*, 2006; Barij *et al.*, 2007; Speer, 2010). Por ejemplo, la

pendiente del terreno está estrechamente relacionada con la profundidad del suelo, el contenido de humedad y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Hairston y Grigal, 1991 y Fekedulegn *et al.*, 2003). Por lo tanto, en áreas con pendientes escarpadas se tienen contenidos de humedad más bajos que en áreas con poca pendiente o sin pendiente, debido a que en las áreas con pendientes escarpadas, los escurrimientos son mayores y se limita la infiltración. En consecuencia, los árboles que se encuentren en pendientes más escarpadas presentan un crecimiento más lento y los anillos de los árboles son más sensibles a periodos con condiciones hidrológicas limitantes (Hairston y Grigal, 1991). También la orientación de las laderas influye sobre la radiación solar incidente y por lo tanto, sobre la evapotranspiración. Para el caso del hemisferio norte las laderas que se encuentran orientadas al sur, sureste y suroeste reciben mayor radiación solar y presentan menor contenido de humedad en comparación con las laderas orientadas al norte, noreste y noroeste, traducándose en mayor sensibilidad de los árboles a años o periodos secos en las laderas con algún tipo de orientación sur (Thomas, 2004). Por último, la distribución de la cubierta forestal, su conservación, longevidad y la variación interanual en los anillos de crecimiento están estrechamente relacionadas con las características topográficas, tales como, la pendiente y orientación de laderas que determinan en gran medida la disponibilidad de agua (Fritts, 1976; Vaganov *et al.*, 2006; Bunn *et al.*, 2011).

Para el caso de los muestreos dendrocronológicos no hay estudios que hayan considerado un análisis espacial de variables biofísicas con base en productos y técnicas de PR y herramientas de análisis espacial dentro de un SIG como insumo previo al muestreo dendrocronológico. El supuesto del presente trabajo, es que este tipo de análisis permite ahorrar tiempo y recursos económicos en la determinación de sitios óptimos para el muestreo dendrocronológico. En el norte y centro de México se han realizado muestreos dendrocronológicos dirigidos, con base en la experiencia de los investigadores y pláticas previas con ejidatarios y prestadores de servicios técnicos forestales, donde se eligen los rodales a muestrear, pero sin un cono-



cimiento previo espacial de las variables biofísicas del sitio a estudiar, con lo cual les permita maximizar el muestreo de árboles sensibles, y así eliminar menor cantidad de muestras (Huante *et al.*, 1991; Bernal y Salazar, 2000; Villanueva *et al.*, 2009).

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) es un área natural protegida de alta prioridad para América del Norte y para el mundo, ya que alberga a las colonias de millones de mariposas Monarca (*Danaus plexippus L.*) que migran desde Canadá y Estados Unidos de América cada invierno (NAMCP, 2008). En las últimas décadas, la RBMM ha sufrido un deterioro acelerado en la calidad y cantidad de sus recursos naturales, situación que se atribuye principalmente a cambios en el uso de suelo (Brower *et al.*, 2002). Estos impactos son originados principalmente por actividades antropogénicas entre las que se encuentran el pastoreo, la extracción de madera y productos forestales no maderables y la expansión de la superficie aguacatera (observación en campo, 2014). Estos cambios pueden derivar en la pérdida de la biodiversidad, y se ha planteado que también pueden modificar el patrón climático a nivel regional (IPCC, 2013). Uno de los problemas más latentes es la variación climática, de la cual se carece de información a escalas espacio-temporales principalmente en lugares donde la densidad de registros instrumentales es deficiente y donde las series temporales son muy cortas. Por lo tanto, resulta trascendente entender los cambios espacio-temporales de la variación climática y conocer si esta variación se encuentra en un periodo histórico de variación natural (Mann *et al.*, 1998). Debido a la ausencia de datos climáticos históricos previos a la segunda mitad del siglo XX (Jáuregui, 2004), es necesario el uso de fuentes indirectas, como series de tiempo dendrocronológicas, con el fin de conocer las variaciones climáticas del pasado (Bradley, 1999; Trenberth y Otto-Bliesner, 2003; Hughes, 2011). Sin embargo, la eficiencia de los muestreos dendroclimáticos, requiere de la identificación de los árboles longevos y sensibles a variables climáticas mediante otras técnicas y herramientas. Estas técnicas bien puede ser la PR y las herramientas de análisis espacial dentro de los SIG, con las cuales se puede analizar y modelar variables

biofísicas de las que se conoce que influyen en el crecimiento de los árboles, y de esta forma hacer más eficientes los muestreos dendroclimáticos.

OBJETIVO

El objetivo del presente estudio fue desarrollar un protocolo para identificar áreas con presencia de árboles climáticamente sensibles en función de variables biofísicas del paisaje por medio del uso de técnicas de PR y herramientas de análisis espacial como los SIG.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La RBMM se localiza en los estados de Michoacán de Ocampo y Estado de México, abarca parte de diez municipios, cubre una superficie de 562 km² y forma parte del Sistema Volcánico Transversal. Sus coordenadas mínimas son 19° 18' 32"N y, 100° 09' 07"W y máximas 19° 44' 27"N y, 100° 22' 26"W (DOF, 2000) (Fig. 1).

El área se caracteriza por la presencia de cuerpos volcánicos que se originaron entre el Cenozoico medio y tardío, donde afloran, principalmente, rocas ígneas extrusivas (basaltos, riolitas y tobas), sobre las cuales se desarrollan diversos tipos de suelo, clasificados como: Andosol, Luvisol, Acrisol y Litosol (INEGI, 1982).

La altitud varía de 2030 m a 3640 m snm lo que le confiere un marcado gradiente altitudinal. La temperatura media oscila entre 8 °C y 22 °C y la precipitación anual varía entre 700 mm y 1250 mm, desarrollándose un clima semifrío subhúmedo con verano fresco Cb(w2) y uno templado subhúmedo C(w1) (García, 1981).

La vegetación corresponde a bosque de pino-encino y bosques de oyamel en las partes más altas, mientras que en las partes bajas corresponde a agricultura, pastizales, arbustos, asentamientos humanos y cuerpos de agua (Brower *et al.*, 2002; Giménez *et al.*, 2003).

Clasificación y ponderación de datos biofísicos

La identificación de la distribución de la CVUS se basó en el uso de imágenes SPOT 5 pancromáticas de 2.5 m de

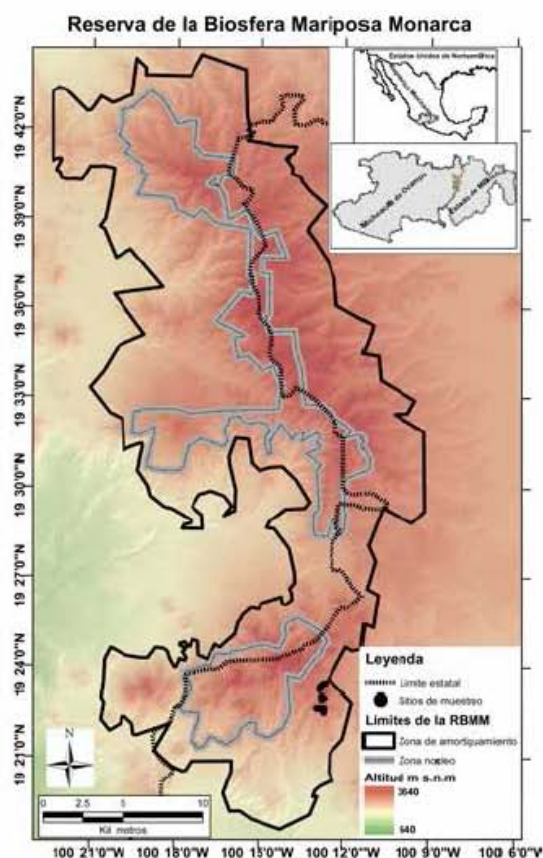


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio, Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca en los estados de Michoacán y Estado de México. El presente estudio se centró en el Corredor Chincua-Campanario-Chivatí-Huacal y Cerro Pelón dejando fuera la parte del cerro Altamirano, que no se muestra en esta figura.

resolución y multiespectrales de 10 m de resolución de diciembre 2010 y enero 2011. Estas imágenes se fusionaron con el objetivo de generar una imagen sintética, lo que permitió obtener una imagen de 2.5 m de resolución con un contraste cromático de la multiespectral, que mejoró la interpretabilidad de los datos de CVUS (Chuvieco, 2008).

La interpretación de la CVUS se llevó a cabo mediante una digitalización en pantalla a escala 1:15 000 utilizando como referencia, la base de datos de CVUS del año 2009,

generada por personal de la RBMM, en conjunto con el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA).

La pendiente del terreno y la orientación de laderas, se realizó aplicando filtros direccionales al MDE, el cual se derivó del continuo de datos topográficos a escala 1:50 000 (INEGI, 1995).

Las categorías de los datos espaciales de CVUS, la pendiente de terreno y la orientación de laderas, se obtuvieron a partir de la reclasificación de los datos de cada variable. Los mapas reclasificados se les dieron valores de ponderación por método de asignación directa (0 a 10), donde 0 son las áreas no aptas y 10 son las áreas muy aptas. En el presente estudio, solo se consideraron valores de ponderación superiores a ocho (Fig. 2). La ponderación se realizó considerando las tres variables (Pendiente de terreno mayor a 20°, laderas orientadas al sur, sureste y suroeste, y coberturas boscosas de pino-encino y oyamel), ya que estas variables han sido documentadas como variables que influyen en el crecimiento de los árboles y por lo tanto, en la variación en el ancho de los anillos de los árboles (Fritts, 1976; Speer, 2010).

Modelado de datos biofísicos

Se modelaron las áreas donde deberían crecer los árboles más longevos y con mayor sensibilidad climática expresada como variaciones interanuales en el ancho de sus anillos (Fig. 2). El modelado consistió en un análisis espacial multicriterio mediante la asignación directa de pesos de ponderación y la sobreposición de las tres variables (Pendiente de terreno mayor a 20°, laderas orientadas al sur, sureste y suroeste, y coberturas boscosas de pino-encino y oyamel). El modelaje se realizó por medio de una suma lineal de las tres variables de acuerdo a la siguiente ecuación (Bonham-Carter, 1994).

$$Map = (Ol + Pt + Cob) / n$$

Donde:

Map: mapa con áreas de muestreo de mayor sensibilidad climática

Ol: orientación de laderas

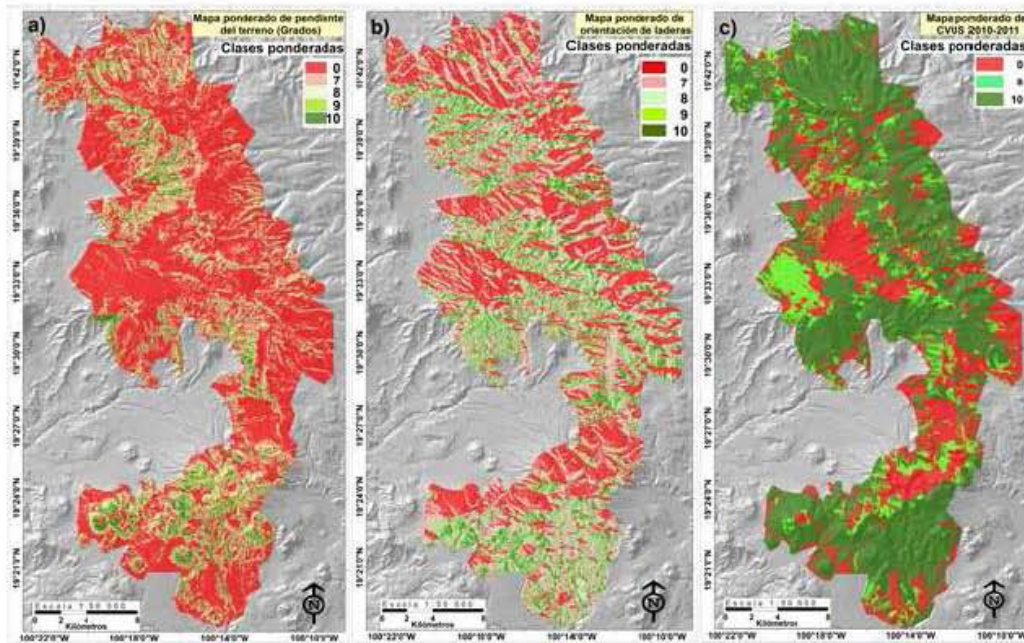


FIGURA 2. Mapas de clases ponderadas usadas para el protocolo de identificación de sitios de muestreo, a) Clases ponderadas de pendiente del terreno, b) Clases ponderadas de orientación de laderas y c) Clases ponderadas de CVUS.

Pt: pendiente del terreno
Cob: cobertura vegetal y uso de suelo
n: número de variables consideradas.

Validación de propuesta de muestreo

La validación del modelado se realizó a partir de un muestreo dendrocronológico en la porción sur de la RBMM dentro de los Ejidos Vare y San Pablo Malacatepec, ubicados en el municipio de Villa de Allende. El muestreo se realizó de manera aleatoria en dos sitios adyacentes dentro de las áreas aptas y no aptas que resultaron del análisis espacial de las variables biofísicas. El primer sitio de muestreo se realizó donde las áreas modeladas corresponden a clases aptas y muy aptas donde se cree que los árboles son sensibles a variables climáticas (Pendiente mayor a 20°, orientación de laderas al sur, sureste y suroeste, y cubiertas boscosas de oyamel y pino-encino). El segundo sitio se estableció en áreas no aptas, donde se cree los árboles son

complacientes (Pendiente menor a 20°, orientación de laderas norte, noreste y noroeste, y cubiertas boscosas de oyamel y pino-encino) (Fig. 3).

Dentro de los sitios muestreados (apto y no apto) se seleccionaron los árboles aleatoriamente considerando el diámetro de estos, para el sitio apto $DAP > 45\text{cm}$ y $DAP > 50\text{cm}$ para el sitio no apto. En el sitio apto se muestrearon 30 árboles de los cuales 16 de ellos fueron de *Pinus pseudostrobus* y 14 correspondieron a *Abies religiosa*, teniendo 78 núcleos de crecimiento (2 a 3 núcleos por árbol), mientras que para el sitio no apto, se muestrearon 63 árboles de los cuales 40 fueron de *Abies religiosa* y 23 de *Pinus pseudostrobus*, teniendo un total de de 135 núcleos de crecimiento.

Los núcleos de crecimiento se tomaron con una barrena de Pressler Haglof, las cuales se montaron en molduras de madera para facilitar su manejo. Posteriormente se pulieron con lijas de diferente número de granulometría (80 a 1200) para tener una mejor visibilidad de los anillos

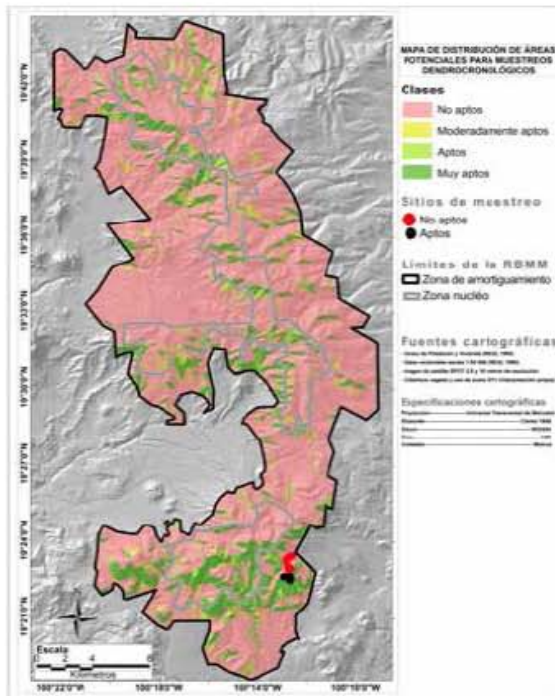


FIGURA 3. Mapa de distribución de los sitios potenciales de muestreo con fines dendrocronológicos.

de crecimiento. El fechado de las series de crecimiento se llevó a cabo a través de técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968). Una vez fechadas las muestras, cada crecimiento individual se midió con un equipo Velmex con una resolución de 0.001 mm. La calidad y medición del fechado se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001) y se construyeron cronologías de índices de ancho de anillo con la librería dplR (Dendrochronology Program Library in R) del programa estadístico R (Bunn, 2007).

Para determinar que el número de árboles de *Pinus pseudostrobus* o de *Abies religiosa* era independiente del sitio apto y no apto, y ver si existía influencia de la proporción de las especies se realizó una prueba de independencia de X^2 . Se construyó una cronología por sitio (índice de ancho de anillo), las cronologías fueron estandarizadas en índices con lo cual se eliminaron las tendencias de creci-

miento no relacionadas con la edad de los árboles. Posteriormente se compararon las cronologías para determinar las diferencias de crecimiento. Solo se tomaron en cuenta los árboles que presentaron una intercorrelación entre series >0.328 , $p < 0.01$ con el análisis del programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001), que sugiere un fechado exacto de los anillo de crecimiento. Además, se analizaron otros parámetros estadísticos como intercorrelación entre series, sensibilidad media, promedio de ancho de anillos y desviación estándar (estadísticos obtenidos con el programa COFECHA y la aplicación dplR) (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001; Bunn, 2007), así como la edad y diámetro de los árboles en cada sitio. Para el caso de los diámetros y edad de los árboles se evaluó si existían diferencias significativas entre el sitio apto y el no apto por medio de una prueba de t de Student.

RESULTADOS

Datos biofísicos del paisaje

Se determinó que las cubiertas y usos más importantes en la RBMM son: bosque de pino-encino cerrado (31%), bosque de oyamel cerrado (27%), agricultura de temporal (15%) y bosque abierto, principalmente, de pino-encino (13%). El porcentaje restante de la superficie (14%) alberga cubiertas no forestales y carentes de importancia para estudios dendrocronológicos tales como: pastizales, agricultura, arbustos, asentamientos humanos y cuerpos de agua. Los bosques cubren 71% de la RBMM, y se distribuyen en la mayor parte de esta. Las coberturas más importantes para llevar a cabo estudios dendrocronológicos son los bosques de oyamel, ubicados entre 2320 m y 3640 m snm, y los bosques de pino-encino de 2020 m a 3400 m snm.

El mapa de pendientes del terreno indicó que éstas varían de 0° a 66° . La superficie con pendientes más pronunciadas ($>20^\circ$) cubre 40% de la Reserva y se encuentra distribuida en toda el área (Fig. 2). Además, se encontró que existe una relación directa entre pendientes escarpadas y áreas boscosas mejor conservadas.

El mapa de orientación de laderas permitió estimar que 40% de la superficie de la Reserva se encuentra orien-



tada al sureste, suroeste o sur. Estas laderas se encuentran distribuidas a lo largo y ancho de la Reserva y reciben alta insolación. El resto de la superficie (60%), se encuentra orientada al norte, noreste o noroeste las cuales reciben menos insolación.

Ponderación y modelación de datos biofísicos

Las ponderaciones más altas (8-10) de cada una de las variables analizadas, permitieron ubicar las áreas consideradas que contienen árboles con variación interanual en el grosor de sus anillos, a consecuencia de variables limitantes como condiciones edáficas, topográficas y climáticas. La modelación e identificación de estas áreas mediante herramientas de SIG, señalan que 18% (108.53 ha) del área de estudio presenta pendientes pronunciadas ($>20^\circ$); orientación de laderas sureste, suroeste y sur; y CVUS con bosque de oyamel y pino-encino (Fig. 2 y 3). Del 18% donde

se cree que existen árboles sensibles a variaciones climáticas, 11% se encuentra dentro de la zona núcleo de la Reserva, en un intervalo altitudinal de 2380 m a 3640 m snm (Fig. 2 y 3).

Validación de propuesta de muestreo para estudios dendrocronológicos

La validación de la eficiencia del protocolo de evaluación de las variables biofísicas, permitió identificar las diferencias existentes en edad y ancho de anillo entre los árboles del sitio apto comparados con el sitio no apto (Fig. 4).

La cantidad de árboles de *Pinus pseudostrobus* y *Abies religiosa* fue independiente del sitio de muestreo, es decir, ninguna de estas especies mostraron mayor o menor preferencia por alguna de las condiciones analizadas. Es por ello que, las diferencias en el ancho de anillos, se deben a diferencias entre sitios, y no a diferencias entre la

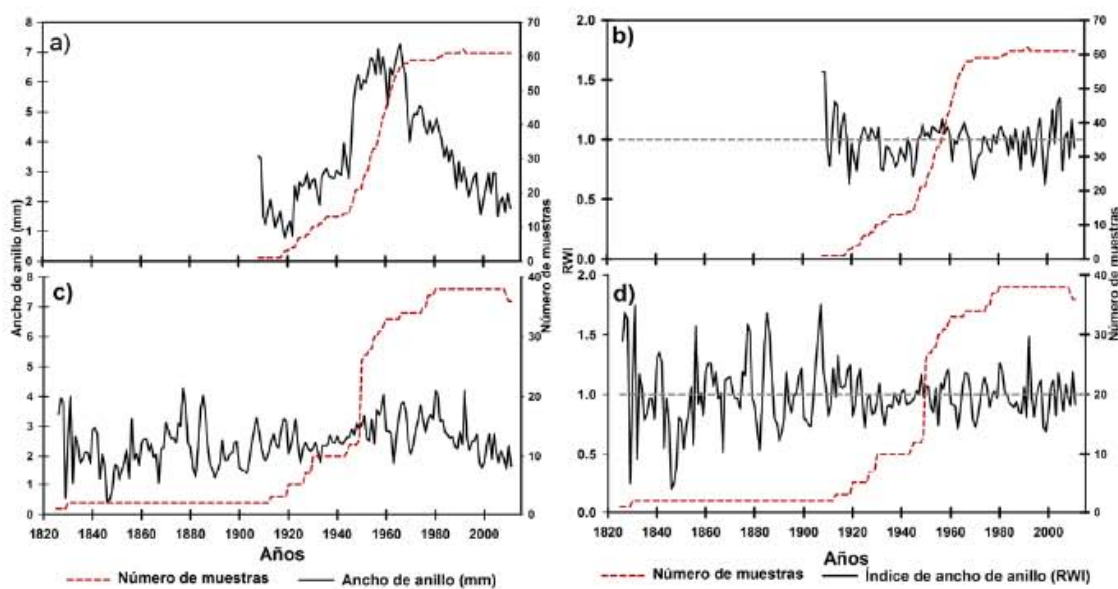


FIGURA 4. Caracterización de ancho de anillo del sitio apto y no apto: A) ancho de anillo para sitio no apto, B) ancho de anillo estandarizado para sitio no apto, C) ancho de anillo para sitio apto y D) ancho de anillo estandarizado para sitio apto. Las gráficas B y D muestran variaciones en el ancho de la serie estandarizada como función a la desviación estándar, con lo cual está eliminando el ruido ocasionado por la tendencia biológica del crecimiento de los árboles. La línea con puntos continuos muestra el número de muestra que se incluyeron a lo largo de las series.

mayor o menor dominancia de estas especies. En el sitio apto, el árbol más longevo tiene un anillo interno que corresponde al año 1826, por lo cual, se generó una cronología de 185 años (1826-2011). Para el sitio no apto, el anillo interno del individuo más longevo fue de 1908, por lo tanto, se reconstruyó una cronología de 103 años (1908-2011).

En el sitio considerado apto, 26 de los 30 árboles muestreados presentaron una intercorrelación entre series >0.367 , mientras que para el sitio no apto, solo 40 de los 63 árboles muestreados presentaron una intercorrelación entre series >0.428 . Para los dos sitios, se presentaron valores de intercorrelación mayores al valor de referencia de 0.328 ($p < 0.01$) (Fig. 4 y Tabla 1).

Los resultados estadísticos de sensibilidad media, promedio del ancho de anillo, desviación estándar, y autocorrelación entre serie también muestran diferencias entre los árboles de los sitios (Tabla 1). Con relación al promedio del ancho de los anillos, se presentaron diferencias de casi el doble en el sitio no apto (4.08 mm) con respecto al apto (2.86 mm). El sitio apto presentó una mayor sensibilidad media (0.297), lo cual refleja una mayor sensibilidad del árbol a factores que limitan el crecimiento a nivel local. La desviación estándar promedio del ancho de anillo para el sitio no apto fue de 2.39 mm, mientras que el sitio apto, presentó una desviación estándar de 1.35 mm (Tabla 1). Los valores más altos de intercorrelación y sensibilidad media, a menudo, se asocian con un valor más bajo de autocorrelación. El valor de autocorrelación de la cronología estándar para el sitio apto fue de 0.609 la cual es menor al sitio no apto (0.832) (Tabla 1). Los análisis de la prueba de t-Student muestran que los árboles en el sitio apto tuvieron mayor edad ($t=2.87, p=0.006$) y menor diámetro ($t=2.57, p=0.006$).

DISCUSIÓN

Las técnicas de PR y herramientas de SIG con frecuencia son usadas en varios tipos de análisis, pero a pesar de su intenso uso, no encontramos antecedentes de análisis espaciales de variables derivadas de la topografía (pendiente del terreno, elevación e insolación de laderas) y de la distribución de la CVUS con el objetivo de ubicar árbo-

TABLA 1. Resultados estadísticos generados por el programa COFECHA para el sitio apto y no apto.

	Sitio apto	Sitio no apto
Intercorrelación entre series ¹	0.376	0.485
Sensibilidad media ²	0.297	0.257
Promedio de ancho de anillos ³	2.86	4.08
Desviación estándar de ancho de anillo ⁴	1.352	2.392
Autocorrelación entre series de crecimiento ⁵	0.609	0.832
Árbol más longevo encontrado (años)	185	103

Es una medida de señal climática¹, variación relativa en el ancho de anillo de un año al siguiente², promedio de ancho de anillos de las series³, representa la desviación estándar de la serie de datos antes de estandarizar la cronología⁴, medida de correlación de anchura de anillos en un año n con el ancho de anillo $n-1$ ⁵.

les con variación en ancho de anillos y con diferencia en edades. En algunas partes del mundo, se han realizado trabajos donde se menciona que la topografía tiene efectos sobre el crecimiento radial y en la estructura de edades de los árboles (Oberhuber y Kofler, 2000; Bunn, 2005). En otros estudios, se indica, que también existe influencia de la topografía, humedad de suelo, orientación de laderas, temperatura y precipitación sobre el crecimiento de los árboles (Hairston y Grigal, 1991; Liang *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2006). En los estudios dendrocronológicos realizados en varias partes del mundo, y en particular en México, no se tienen registros del uso de análisis espaciales de variables biofísicas para elegir sitios de muestreo con potencial dendroclimático.

En el presente estudio, se analizaron tres variables (CVUS, pendiente del terreno y orientación de laderas) que se han identificado con mayor claridad, como indicadores que maximizan la señal climática que registran los árboles en su crecimiento (Fritts, 1976; Stokes y Smiley, 1968; Thomas, 2004; Speer, 2010). El análisis con estas tres variables para la RBMM, permitió encontrar árboles que presentan variación interanual en el ancho de los anillos debido a variaciones climáticas. Esto se demostró,



mediante las diferencias en longevidad (más de 50 años en el sitio apto) y crecimiento promedio de los árboles del sitio apto (2.86 mm), con respecto al sitio no apto (crecimiento promedio 4.08 mm). La incorporación de otras variables al modelo como profundidad y fertilidad de suelo, y capacidad de retención de humedad puede dar mejores resultados, ya que estas variables también influyen en el crecimiento de los árboles (Barij *et al.*, 2007). Sin embargo, resultaría difícil incorporar datos de dichas variables, ya que estos no existen de forma espacialmente explícita.

En el presente estudio los árboles con mayor edad, se encontraron en el sitio con pendiente escarpada y con alto grado de insolación dentro de bosques conservados, lo que concuerda con lo descrito por Bunn *et al.*, (2011) quienes encontraron que las condiciones topográficas de relieve y de la orientación de laderas influyen en el crecimiento de los árboles. Para los bosques de oyamel, se ha documentado que la elevación, la orientación de laderas y la pendiente del terreno afectan directamente su crecimiento (Socha, 2008). En este estudio, también se encontró una clara influencia de la pendiente del terreno y orientación de laderas sobre el diámetro y anchura de los anillos para las especies *Abies religiosa* y *Pinus pseudostrobus*.

En la ladera orientada al norte, noreste y noroeste encontramos mayor crecimiento (4.02 mm en promedio) y menor edad de los árboles (103 años), lo cual concuerda con otros estudios en latitudes mayores, donde tienen mayor crecimiento y menor edad en estas laderas, debido que las variaciones espaciales de la topografía, radiación solar y evapotranspiración influyen directamente sobre el crecimiento de los árboles. Esto se debe a que existe un mayor crecimiento de árboles en laderas que reciben menos insolación (Tajchman y Lacey, 1985; McNab, 1989; Speer *et al.*, 2004; Thomas, 2004; Somaru *et al.*, 2013).

Si bien en este estudio solo se comparó un sitio apto con uno adyacente no apto, el tamaño de muestra es superior a otros estudios donde han realizado reconstrucciones dendroclimáticas o documentando influencia de

variables climáticas en el crecimiento de los anillos de los árboles (Huante *et al.*, 1991; Bernal y Salazar, 2000; Díaz *et al.*, 2001; Cerano *et al.*, 2013).

La generación de un protocolo de muestreo dendrocronológico para el caso de México es relevante por la dificultad de ubicar áreas con árboles sensibles a variaciones climáticas. Esto debido a que se tiene grandes contrastes en tipos de CVUS, condiciones fisiográficas y topográficas. El uso de técnicas de PR y herramientas de análisis espacial como los SIG en la identificación de sitios para muestreo dendrocronológico en la RBMM, permitió ubicar áreas donde más de 80% de los árboles muestreados presentan buena intercorrelación entre series (26 de 30 árboles en el sitio apto), situación que indica que los árboles están respondiendo a factores climáticos comunes, lo que permite asignar fechas calendáricas a cada crecimiento. En otros estudios realizados en México, donde los muestreos se realizaron con base a la experiencia de los investigadores, se han tenido que eliminar hasta 40% de las muestras debido a que no presentan una intercorrelación >0.328 , debido a problemas de crecimiento (Cerano *et al.*, 2013). Por otro lado, cuando no se tiene experiencia y conocimiento del área a estudiar es difícil ubicar los sitios más idóneos con presencia de árboles sensibles y con alto potencial dendrocronológico.

CONCLUSIONES

Este estudio, refuerza el planteamiento de que las características topográficas (pendiente de terreno y orientación de laderas) son factores determinantes en el crecimiento de los árboles y que se manifiestan en un limitado incremento radial y presencia de árboles más longevos.

El análisis espacial de variables biofísicas del paisaje utilizando técnicas de PR y herramientas de SIG, permitió definir sitios con adecuado potencial para estudios dendrocronológicos. Esta metodología ha sido poco utilizada con estos fines; sin embargo, son herramientas que presentan un alto potencial para este tipo de estudios.

El análisis espacial de las variables biofísicas para la RBMM realizado en el presente estudio, permitió ubicar sitios de muestreo con árboles longevos, que mostraron

alta variación interanual en el ancho de los anillos, lo cual puede ser de utilidad para el desarrollo de reconstrucciones dendroclimáticas.

En consecuencia, para este tipo de estudios se recomienda la integración de una plataforma de SIG, cuyos resultados apoyen a la selección *a priori* de sitios de muestreo. De esta forma se puede minimizar el tiempo, esfuerzo de muestreo y recursos económicos a emplear en la generación de series dendrocronológicas, que a la vez tengan mayor sensibilidad climática. Por lo que un protocolo de identificación de sitios de muestreo similar al planteado en el presente estudio, puede ser utilizado y replicable en otras áreas, ya que los insumos y las herramientas utilizadas son de fácil acceso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los proyectos SEP-CONACYT (clave 2010-154434) y CONACYT-Ciencia Básica (clave 179386) por el apoyo otorgado. El primer autor agradece al CONACYT por la beca otorgada para la realización de sus estudios de Doctorado en Geografía de la UNAM.

REFERENCIAS

- Barij, N., A. Stokes, T. Bogaard y B. van Beek. 2007. Does growing on a slope affect tree xylem structure and water relations?. *Tree Physiology* 27(5):757-764.
- Bernal-Salazar, S. y T. Terrazas S. 2000. Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques* 6(1):73-86.
- Bonham-Carter, G.F. 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS. 1ª ed. Pergamon Press. Nueva York. 398 p.
- Bradley, R.S. 1999. Paleoclimatology: Reconstructing climates of the quaternary. 1ª ed. Academic Press. San Diego, CA. 631 p.
- Bravo, E.M., M. Mendoza, T. Carlón, L. Medina, T. Sáenz y R. Páez. 2012. Effects of converting forest to avocado orchards on topsoil properties in the Trans-mexican Volcanic System, Mexico. *Land Degradation & Development* 25(5):452-467.
- Brower, L.P., G. Castilleja, A. Peralta, J. López, L. Bojórquez, S. Díaz, D. Melgarejo y M. Missrie. 2002. Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the monarch butterfly in Mexico, 1971-1999. *Conservation Biology* 16(2):346-359.
- Bunn, A.G., L. Waggoner y L.J. Graumlich. 2005. Topographic mediation of growth in high elevation foxtail pine (*Pinus balfouriana* Grev. et Balf.) forests in Sierra Nevada, USA. *Global Ecology Biogeography* 14(2):103-114.
- Bunn, A.G. 2007. Dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2):115-124.
- Bunn, A.G., M.K. Hughes y M. Salzer. 2011. Topographically modified tree-ring chronologies as a potential means to improve paleoclimate inference. *Climatic Change* 105(3-4):627-634.
- Cerano P.J., J. Villanueva, M. Cervantes, L. Vázquez, C. Trucios y D. Guerra. 2013. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 83:41-54
- Chuvieco, S.E. 2008. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. 3ª Ed. Ariel. Barcelona, España. 597 p.
- (DOF) Diario Oficial de la Federación. 2000. Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región denominada Mariposa Monarca, ubicada en los municipios de Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende en el Estado de México, así como en los municipios de Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro y Aporo en el Estado de Michoacán, con una superficie total de 56,259-05-07.275 hectáreas, Primera sección. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. p:5-28.
- Díaz, S.C., R. Touchan y T.W. Swetnam. 2001. A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Climatology* 21(8):1007-1019.
- Fekedulegn, D., R. Hicks y J.J. Colbert. 2003. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian



- watershed. *Forest Ecology and Management* 177(1-3):409-425.
- Fritts, H.C. 1976. Tree rings and climate. 2ª ed. Academic Press. Londres-Nueva York. 567 p.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, UNAM. México. 246 p.
- Guimet, P.J. 1992. Introducción conceptual a los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estudio Gráfico Madrid, España. 139 p.
- Giménez, A.J., I. Ramírez y M. Pinto. 2003. Las comunidades vegetales de la Sierra de Angangueo (Estados de Michoacán y México, México): clasificación, composición y distribución. *Lazaroo* 24:87-111.
- Grissino-Mayer, H.D. 2001. Evaluating crossdating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFCHA. *Tree-Ring Research* 57(2):205-221.
- Hairston, A.B. y D. Grigal. 1991. Topographic influences on soils and trees within single mapping units on a sandy outwash landscape. *Forest Ecology and Management* 43(1-2):35-45.
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43:69-78.
- Huante, P., E. Rincón y T.W. Swetnam. 1991. Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, México. *Tree-Ring Bulletin* 51:15-27.
- Hughes, M.K. 2011. Dendroclimatology in High-Resolution Paleoclimatology. In: M.K. Hughes, T.W. Swetnam y H.F. Diaz, eds. Dendroclimatology, developments in paleoenvironmental research. Springer. Países Bajos. p:17-34.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).1982. Carta Edafológica, 1:50000, Ciudad Hidalgo E14-A-25, SPP, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).1995. Conjunto de datos vectoriales escala 1:50,000.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley, eds. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA, 1535 p.
- Jáuregui, E. 2004. La variabilidad climática en los registros instrumentales de México, In: J. Martínez y A. F. Fernández, eds. Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F. p:277-287.
- Liang, E., X.M. Shao, D. Eckstein, L. Huang y X.H. Liu. 2006. Topography and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau. *Forest Ecology and Management* 236(2-3):268-277.
- Makinen, H., P. Nöjd, K.P. Kahle, U. Neumann, B. Tveite, K. Mielikainen, H. Rohle y H. Spiecker. 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management* 171(3):243-259.
- Mann, M.E., R.S. Bradley y M.K. Hughes. 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392:778-787.
- McNab, W.H. 1989. Terrain shape index: quantifying effect of minor landforms on tree height. *Forest Science* 35(1):91-104.
- Mendoza, M.E., E. López, D. Genelett, D. Pérez-Salicrup y V. Salinas. 2011. Analyzing land cover and land use change processes at watershed level: A multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975-2003). *Applied Geography* 31(1):237-250.
- NAMCP (North American Monarch Conservation Plan). 2008. Commission for Environmental Cooperation, Canada. 393, rue St-Jacques Ouest, bureau 200 Montreal Canada. 56 p.
- Oberhuber, W. y W. Kofler. 2000. Topographic influences on radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) at small spatial scales. *Plant Ecology* 146(2):231-240.
- Sample, V.A. 2004. Remote sensing and GIS in ecosystem management. American Forests and Forest Policy Center. Estados Unidos de América. 382 p.

- Somaru, R y H.P. Borgaonkar. 2014. Tree-ring analysis over western Himalaya and its long-term association with vapor pressure and potential evapotranspiration. *Dendrochronologia* 32(1):32-38.
- Socha, J. 2008. Effect of topography and geology on the site index of *Picea abies* in the West Carpathian, Poland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23(3):203-213.
- Speer, J.H., K.H. Orvis, H.D. Grissino-Mayer, L.M Kennedy y S.P. Horn. 2004. Assessing the dendrochronological potential of *Pinus occidentalis* Swartz in the Cordillera Central of the Dominican Republic. *The Holocene* 14(4):563-569.
- Speer, J. 2010. Fundamentals of tree-ring research. The University of Arizona Press, Tucson. 333 p.
- Stokes, M y T. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. The University of Arizona Press, Tucson. 73 p.
- Tajchman, S.J y C.J Lacey. 1985. Bioclimatic factors in forest site potential. *Forest Ecology and Management* 14(3):211-218.
- Thomas, P.A. 2004. Trees: Their Natural History. Cambridge University Press. 298 p.
- Trenberth, K.E y B.L. Otto-Bliesner. 2003. Toward integrated reconstruction of past climates. *Science* 300(5619):589-591.
- Vaganov, E.A., M.K. Hughes y A.V. Shashkin. 2006. Growth dynamics of conifer tree rings: Images of past and future environments. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Alemania. 354 p.
- Villanueva-Díaz, J., J. Cerano, V. Constante, P.Z. Fulé, y E. Cornejo. 2009. Variabilidad hidrolimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques* 15(3):45-64.
- Yang, Y., M. Watanabe, F. Li, J. Zhang, W. Zhang y J. Zhai. 2006. Factors affecting forest growth and possible effects of climate change in the Taihang Mountains, northern China. *Forestry* 79(1):135-147.

Manuscrito recibido el 25 de abril de 2014.
Aceptado el 23 de febrero de 2015.

Este documento se debe citar como:
Carlón Allende, T., M. E. Mendoza, J. Villanueva Díaz, D. R. Perez Salicrup. 2015. Análisis espacial del paisaje como base para muestreros dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Madera y Bosques* 21(2):11-22.

CAPÍTULO II

Respuesta climática de *Pinus pseudostrobus* y *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

RESUMEN

Aim Analizar los patrones temporales de crecimiento radial de los bosques de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, analizar los patrones de variación temporal de la temperatura y la precipitación a partir de registros instrumentales, y evaluar la influencia de la precipitación y temperatura en el crecimiento radial de los árboles de *Pinus pseudostrobus* y *Abies religiosa*.

Location Este estudio comprendió ocho sitios de muestreo ubicados en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), México.

Methods Se realizó un muestreo dendrocronológico mediante la colecta de secciones transversales y núcleos de crecimiento usando motosierra y barrena de Pressler, para cada sitio se desarrolló una cronología de ancho total de anillos. Se realizaron Análisis de Componentes Principales (PCA) para identificar los patrones comunes de variación de la temperatura, precipitación y crecimiento de los árboles. La influencia del clima en el crecimiento de los árboles se evaluó mediante análisis de correlación entre las cronologías y los registros de precipitación y temperatura.

Results Los años con bajas precipitaciones se relacionaron con bajo crecimiento y los años con alta precipitación favorecieron mayor crecimiento de anillos. Los análisis entre la precipitación y el incremento radial mostraron que los meses de enero, febrero, abril y mayo son los de mayor influencia en el crecimiento de los árboles, mientras que la temperatura máxima de mayo se relacionó de manera negativa con crecimiento para algunas cronologías. El PCA y la comparación entre los valores de PCA de variables climáticas y cronologías no indicaron diferencias significativas entre los sitios del norte, centro y sur; sin embargo, sí se detectaron patrones comunes de crecimiento que

corresponde principalmente a los años de 1958 y 2010 con altas precipitaciones, y 1997-1998 con baja precipitación.

Main conclusions Este estudio presenta evidencia de la influencia de variables climáticas en el crecimiento de *A. religiosa* a nivel de la RBMM y la primer evidencia de la influencia de variables climáticas en el crecimiento de *P. pseudostrabus*. La precipitación de invierno-primavera fue la que más influyó en el crecimiento de las especies estudiadas, lo que sugiere que eventos extremos de precipitación y/o temperatura, pueden afectar el crecimiento de los árboles, afectando la dinámica de los bosques de la RBMM, ya que una reducción en la precipitación del período estacional invierno-primavera, aunada a un incremento de temperatura del mes de mayo, promueve una reducción en crecimiento radial de los árboles y en consecuencia en el hábitat de la mariposa monarca.

Palabras clave (6 a 10)

Anillos de crecimiento, crecimiento radial, dendrocronología, México, precipitación, temperatura, variabilidad climática.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de los árboles está influenciado por la interacción de factores bióticos y abióticos (Schweingruber, 1996; Schweingruber, 2007; Speer, 2010). Dentro de los factores abióticos; la precipitación, temperatura, viento y humedad atmosférica y del suelo afectan fuertemente el crecimiento radial de los árboles (Fritts, 1976; Bradley, 1999; Fekedulegn *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2006; Vaganov *et al.*, 2006; Friedrichs *et al.*, 2009; Speer, 2010). En latitudes extratropicales, dónde la variación entre temperaturas de invierno y de verano es marcada, la variable que más limita el crecimiento de los bosques es la temperatura (Pederson *et al.*, 2004; Bhuta, 2009), mientras que en bosques de coníferas dentro de latitudes tropicales y subtropicales, la variable que más influye en el crecimiento de los bosques es la precipitación (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007). La evaluación de las variables climáticas, como la precipitación, puede hacerse mediante anillos de crecimiento de los árboles (Bradley, 1999), para lo cual es necesario conocer qué relación hay entre variables climáticas y crecimiento de los árboles a escalas temporales de cientos o incluso de miles de años y escalas espaciales, y de esta forma conocer la duración y frecuencia de episodios climáticos extremos (Hanson y Weltzin, 2000; Speer, 2010; Stahle *et al.*, 2011).

En el caso de México, se han realizado estudios dendrocronológicos principalmente en el norte del país, con los cuales se ha investigado el historial de los incendios y se ha reconstruido la precipitación de invierno y su relación con fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) (Díaz *et al.*, 2001; Villanueva-Díaz *et al.*, 2005; Yocom *et al.*, 2010). Para el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa

Monarca (RBMM) ubicada entre los estados de Michoacán de Ocampo y Estado de México, es una de las áreas naturales protegidas más importantes en México, por albergar el gran fenómeno biológico de hibernación de la mariposa monarca (*Danaus plexippus* L.).

En la RBMM se han realizado diversos estudios en las dimensiones de biodiversidad y conservación gracias a la relevancia del fenómeno de hibernación de la mariposa monarca. Algunos de estos trabajos han mostrado que los cambios en las condiciones climáticas y microclimáticas causan eventos de mortalidad de mariposas monarcas, ya que éstas son sensibles, particularmente a los cambios de temperatura (Oberhauser y Peterson, 2003; Barve *et al.*, 2012). Otros trabajos, realizados en el norte de la RBMM a escala puntual, han tratado de entender el comportamiento climático por medio de anillos de árboles, los cuales muestran que la variación en el crecimiento radial de árboles de *A. religiosa* está relacionada con variaciones del clima (Huante *et al.*, 1991; Salazar y Salgado, 2000), sin embargo, estos trabajos han logrado construir cronologías de anillos de árboles muy cortas. En este sentido, los anillos de los árboles proporcionan información importante para la comprensión de patrones temporales de su crecimiento y su relación con variables climáticas (Bradley, 1999; Speer, 2010); lo que implica profundizar en el conocimiento de las variables climáticas y su influencia en el crecimiento de los árboles, permitiendo contribuir al entendimiento de la variación del clima a lo largo del tiempo y el espacio, y de esta forma entender la historia, el estado actual y proyecciones futuras del cambio climático y sus efectos en los bosques de la RBMM. Dichos bosques son clave para la conservación, debido que son el hábitat de

la mariposa monarca (*Danaus plexippus L.*) que cada año llega a hibernar a los bosques de oyamel por un periodo de cinco meses (Alonso-Mejia *et al.*, 1997).

Los objetivos de este trabajo son: a) identificar patrones temporales de crecimiento radial de los bosques de la RBMM, b) analizar los patrones de variación temporal de la temperatura y la precipitación a partir de registros instrumentales, y c) evaluar la influencia de variables climáticas en el crecimiento radial de los árboles de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La RBMM se encuentra en el Sistema Volcánico Transversal, entre los estados de Michoacán de Ocampo y Estado de México; incluye parte de diez municipios y cubre una superficie de 562 km². Sus coordenadas extremas son 19° 18' 32"N y, 100° 09' 07"W y 19° 44' 27"N y, 100° 22' 26"W (DOF, 2000) (Fig. 1).

En la RBMM existe un marcado gradiente altitudinal (2030 a 3640 m s. n. m.), lo que le confiere una topografía irregular. La temperatura media anual oscila entre 8° y 22°C y la precipitación total anual varía de 700 a 1,250 mm, las precipitaciones más altas y temperaturas más bajas se presentan en la parte centro-norte de la RBMM, mientras que la parte centro-sur las precipitaciones son más bajas y las temperaturas más altas. Los tipos de clima son semifríos subhúmedos con verano fresco Cb'(w2) y templados subhúmedos C(w1) (a r a, 1973).

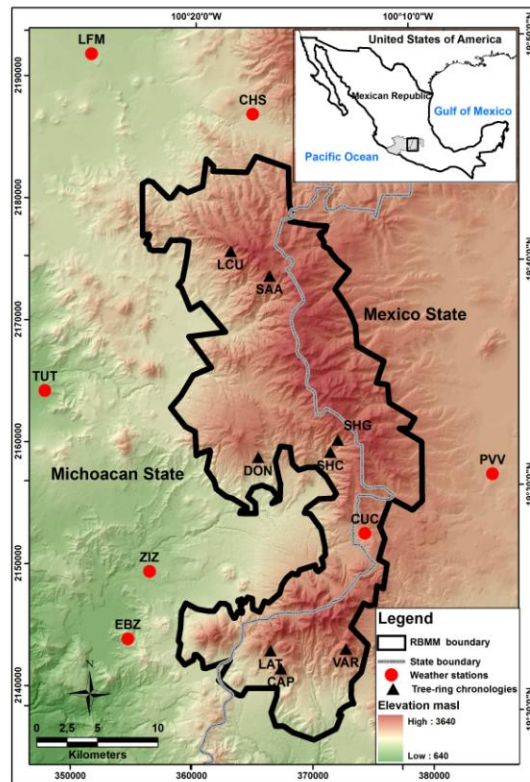


Figura 1. Ubicación de la RBMM con sitios de muestreo dendrocronológico y estaciones meteorológicas, los códigos se describen en el cuadro 1 y 2.

La cobertura vegetal presente es de bosque de pino-encino (44%) con una dominancia de las especies *Pinus leiophylla*, *Pinus pseudostrobus*, *Quercus castanea*, *Quercus laurina* y *Quercus rugosa*; bosque de oyamel con 27% (*Abies religiosa*) (Cornejo-Tenorio y Ibarra-Manriquez 2008), agricultura (15%) y el 14% restante corresponde a pastizales, arbustos, asentamientos humanos y cuerpos de agua (Carlón-Allende *et al.*, 2015). El bosque de oyamel se localiza en altitudes de 2,320 a 3,640 m s. n. m., mientras que el de pino, entre 2,020 a 3,400 m s. n. m. encontrando se las especies de *Pinus leiophylla* y *Pinus pseudostrobus* dominando este último. Existe una zona de transición con codominancia entre *Pinos* y *Abies* entre los 2,320 y los 3400 m s. n. m. (Carlón-Allende *et al.*, 2015).

Patrones temporales de la precipitación y temperatura

Los registros de precipitación y temperatura se recopilaron de siete estaciones meteorológicas, las cuales presentan registros más largos y completos (Fig. 1, cuadro 1) pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Los valores mensuales faltantes se estimaron a partir de los registros de las estaciones cercanas mediante un método multivariado de razón normal (Paulhus y Kohler, 1952; Chow *et al.*, 1988). Con los datos de las siete estaciones se obtuvo una serie regional anual y mensual de precipitación y temperatura máxima para el período 1926-2011; estas series posteriormente fueron estandarizadas a valor Z.

La identificación de la variación en los patrones temporales de la precipitación y temperatura en el periodo de 1926 a 2011, se basó en un análisis de series de tiempo de precipitación anual y temperatura máxima anual con los datos de las siete estaciones (Cuadro 1); así como un Análisis de Componentes Principales (PCA); este último con datos de cinco estaciones, las cuales presentaron los registros comunes del período 1975-2002 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el presente estudio.

Código	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m)	Periodo de registro
CHS	Chincua, Senguio	19°46.35'	100°17.30'	2451	1966-2011 (15)
EBZ	El Bosque (CFE), Zitácuaro	19°23.00'	100°23.00'	1750	1950-2011 (22)
LFM	Laguna del Fresno, Maravatio	19°48.98'	100°24.93'	2116	1952-2011 (14)
TUT	Tuxpan, Tuxpan	19°34.00'	100°27.00'	1863	1942-1976 (14)
ZIZ	Zitácuaro, Zitácuaro	19°26.00'	100°22.00'	1981	1922-1970 (1)
CUC	Cuesta del Carmen	19°27.76'	100°11.86'	2750	1975-2010 (23)
PVV	Palizada, Villa Victoria	19°30.45'	100°05.86'	2669	1960-2002 (6)

Entre paréntesis en la columna de periodo de registros se indica el porcentaje de datos faltantes que fueron estimados

Datos de anillos de árboles

Las especies muestreadas consistieron en *P. pseudostrobus* y *A. religiosa*, las cuales se trabajaron en conjunto para tener representada toda la RBMM. El muestreo se realizó en ocho sitios dentro de la RBMM; tres en el sur, tres en el centro y dos en el norte; con los cuales se buscó cubrir espacialmente el área de estudio (Fig. 1). El muestreo consistió en la toma de rodajas y núcleos de crecimiento (dos a tres núcleos por árbol), con un tamaño de muestra por sitio de 40 a 50 árboles (Cuadro 2). Los sitios muestreados se localizaron en pendientes pronunciadas (>20°), con alta insolación (orientados al sur, sureste y suroeste) y con presencia de bosques en buen estado de conservación. Esto de acuerdo a la metodología propuesta por Carlón-Allende *et al.*, (2015), maximizando las probabilidades de encontrar árboles longevos y sensibles a variables climáticas.

Cuadro 2. Características de los sitios de muestreo dendrocronológico en la RBMM.

Código	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m)	Especie dominante	Muestras analizadas
LCU	La Cueva	19°40.11'	100°18.37'	3000	<i>A. religiosa</i>	58
SAA	Santa Ana	19°39.01'	100°16.62'	3100	<i>A. religiosa</i>	87
SHG	Shoreje Grande	19°31.88'	100°13.15'	3000	<i>P. pseudostrobus</i>	48
SHC	Shoreje Chico	19°31.41'	100°13.57'	2900	<i>P. pseudostrobus</i>	86
DON	Donaciano Ojeda	19°31.11'	100°16.91'	2700	<i>P. pseudostrobus</i>	52
VAR	Vare	19°22.62'	100°12.74'	3200	<i>P. pseudostrobus</i>	39
CAP	Capulín	19°21.22'	100°16.12'	2600	<i>P. pseudostrobus</i>	38
LAT	Latas	19°22.52'	100°16.26'	3000	<i>P. pseudostrobus</i>	57

Las secciones transversales y núcleos de crecimiento fueron procesados con lijas de granulometría de 80 a 1200 granos/cm² de acuerdo a técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968). El ancho de los anillos se midió con un equipo Velmex a una resolución de 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980). Los

errores de medición y la calidad fechado se verificaron con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Solo se seleccionaron las muestras que presentaron un coeficiente de intercorrelación >0.328 calculado por el programa COFECHA.

Desarrollo de cronologías de ancho de anillo

Las series de ancho de *A. religiosa* y *P. pseudostrobus* se trabajaron en conjunto dado que se comprobó en el capítulo uno que no presentaban diferencias significativas en su crecimiento y que los patrones comunes de crecimiento eran similares. Cada serie de ancho de anillos se estandarizó y promedió con otras series para desarrollar ocho cronologías. Se generaron cronologías estándar con la librería dplR y el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1986; Bunn, 2008), se utilizó una curva exponencial negativa como curva teórica de estandarización. Las cronologías se estandarizaron con la intención de reducir la varianza entre los núcleos y transformar los anchos de anillos en los valores de índice sin dimensiones. Con lo cual se eliminó la influencia de la perturbación y los cambios en el crecimiento del árbol provocados por la edad, pero se conserva una gran parte de las variaciones de baja frecuencia en la serie de anillos de árboles (Fritts, 1976). Para identificar posibles asociaciones o diferencias entre cronologías, se realizó una prueba de correlación para el intervalo común (1929-2011) de las ocho cronologías.

Con el fin de evaluar la variabilidad temporal para identificar la variación común en las cronologías, que se infiere reflejan respuestas comunes a las influencias climáticas, se utilizaron los estadísticos de medias de coeficientes de correlación (R_{bar})

y la Señal de la Población Expresada (EPS). El R_{bar} es el coeficiente medio de la correlación para todas las asociaciones posibles entre la serie de anillos de árboles de muestras individuales y calculadas para un intervalo de tiempo común (Briffa, 1999). El EPS es una medida de la similitud entre una cronología de anillos de árboles dada y una cronología hipotética que ha sido infinitamente replicada de los radios individuales incluidos en la cronología dada para un intervalo de tiempo común (Briffa, 1999). El EPS se calculó sobre una ventana de 50 años con un traslape de 25 años. El valor aceptable de EPS para que refleje una señal común de crecimiento de los árboles es de 0.85 (Wigley *et al.*, 1984).

Con el fin de identificar patrones comunes de variación temporal en el crecimiento de *A. religiosa* y *P. pseudostrobus* y determinar si los crecimientos de los árboles respondían a patrones espaciales se realizó un PCA, con las ocho cronologías que cubren un intervalo común de 1929-2011.

Relación temporal entre variables climáticas y crecimiento de los árboles

La influencia de la precipitación y temperatura en el crecimiento de los anillos de los árboles de *A. religiosa* y *P. pseudostrobus* se determinó mediante un análisis de correlación de Pearson. Los análisis de correlación se realizaron con datos anuales y mensuales de precipitación y de temperatura máxima para cada una de las estaciones meteorológicas, y con una serie regional mensual de precipitación y temperatura máxima para el periodo 1926-2011; ésta última está conformada con datos de las siete estaciones. Finalmente, mediante la amplitud de los Componentes Principales (PCs) de

los anillos de los árboles y de la precipitación y temperatura máxima, se examinaron las posibles relaciones espaciales y temporales. Mediante un análisis de correlación se examinaron las relaciones entre los PCs de crecimiento de árboles y los PCs de precipitación y temperatura. Únicamente se seleccionaron los PCs de crecimiento de árboles y variables climáticas que presentaron correlación más alta, con los cuales se evaluaron visualmente los patrones comunes de variación temporal, y se determinó si éstos presentaban una agrupación acorde a su distribución espacial.

RESULTADOS

Patrones temporales de variación de la precipitación y temperatura

El análisis de los datos de precipitación anual indica la presencia de patrones definidos de variación temporal. Los eventos de alta precipitación se presentaron en los años de 1925, 1958, 1967, 1990-1993 y 2010. Mientras que los eventos de baja precipitación se presentaron en los años de 1979, 1982, 1997-2000 y 2007-2008 (Fig. 2a).

Los registros de temperatura máxima presentaron de 1990 a 1993 una reducción, después de este periodo se observa que existe una tendencia de incremento de la temperatura máxima (Fig. 2b).

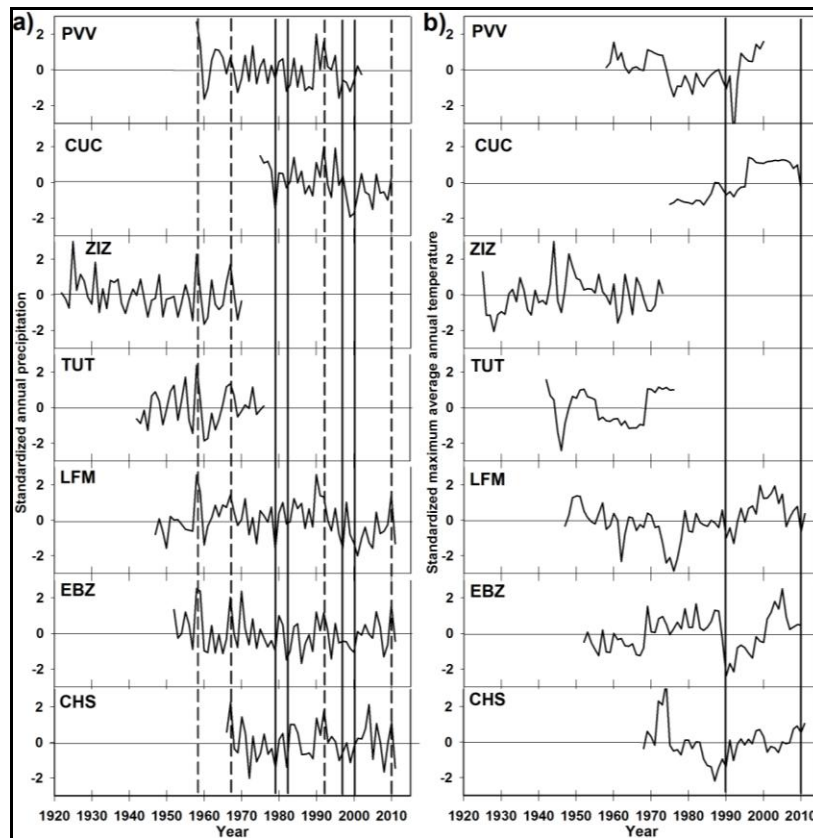


Figura 2. Análisis temporal de precipitación acumulada anual (a) y temperatura máxima media anual (b). Las líneas verticales continuas corresponden a años con eventos extremos mínimos de precipitación (a) y aumentos de temperatura (b). Las líneas verticales discontinuas corresponden a años con eventos extremos de alta precipitación acumulada. Los códigos se describen en el cuadro 1.

Los dos primeros PCs de la precipitación (PC1 y PC2) explican el 67.8% y el 11.5% de la varianza, respectivamente (78.3% varianza acumulada) (Cuadro 3). En el PC1 de precipitación todas las estaciones presentan pesos >-0.8 , excepto la estación LFM (-0.78). En el PC2 de precipitación los pesos más altos se presentan en las estaciones LFM, CUC (-0.45, -0.37, respectivamente) (Cuadro 3); ambas están localizadas en la parte sur del área de estudio (Fig. 1). Los patrones temporales de precipitación que reflejan el PC1 y PC2 indican tendencias similares a lo largo del tiempo (Fig. 3a). El PC1 de la precipitación muestra una disminución en precipitación

para el periodo 1989-1990, posteriormente se observa un incremento en el período 1991-2002 (Fig. 3a). El PC2 muestra una tendencia de incremento de 1992 a 2001 (Fig. 3a).

Los dos primeros PCs de la temperatura máxima (PC1 y PC2) explican el 53.5% y el 22.7% de la varianza, respectivamente (76.2% varianza acumulada) (Cuadro 3). Las tres estaciones con mayores pesos negativos en el PC1 de temperatura, corresponden a PVV, CUC y LFM (-0.91, -0.87 y -0.87, respectivamente), (Fig. 3b) (cuadro 3). El PC2 de temperatura muestra una tendencia similar al PC1, solo que las estaciones con mayor peso son EBZ y CHS (-0.95 y 0.38, respectivamente) (Fig. 3b).

Los patrones temporales comunes de variación de temperatura máxima en el PC1 y PC2 presentan un aumento en el periodo de 1991 a 1993, y posteriormente un descenso (Fig. 3b, cuadro 3). El PC2 de la temperatura oscila por abajo de la media de 1977 a 1990, posteriormente se incrementa de 1991 a 1993 y luego muestra un descenso similar al PC1 (Fig. 3b, cuadro 3).

Cuadro 3. Valores de PC's de precipitación anual y temperatura media máxima anual y porcentajes de varianza que explica cada PC.

Código	Precipitación		Temperatura	
	PC 1	PC 2	PC 1	PC 2
CHS	-0.83	0.38	-0.56	0.39
EBZ	-0.82	0.25	-0.02	-0.95
LFM	-0.78	-0.45	-0.88	-0.12
CUC	-0.81	-0.37	-0.87	0.12
PVV	-0.87	0.14	-0.91	-0.21
% varianza	67.87	11.52	53.50	22.71

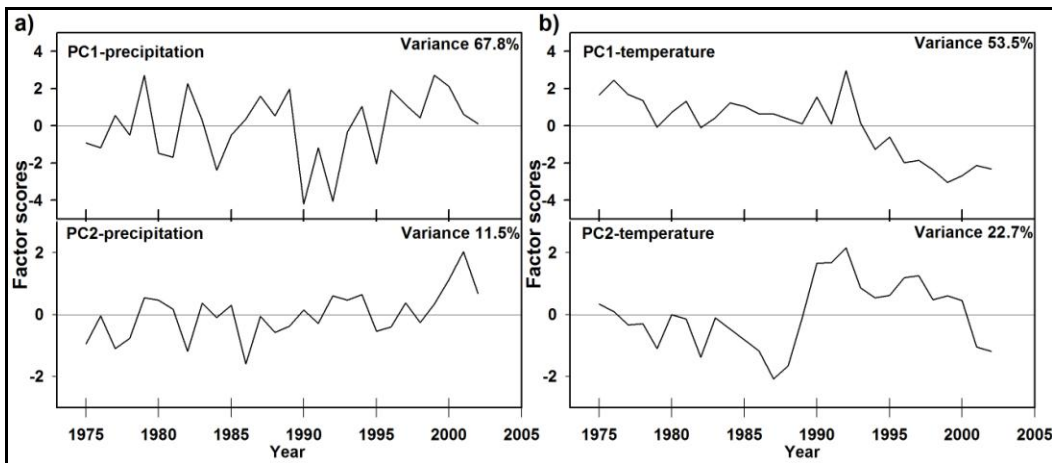


Figura 3. Variación temporal del factor scores de los dos primeros componentes principales, a) PC1 y PC2 de los registros de precipitación anual de cinco estaciones meteorológicas, b) PC1 y PC2 de los registros de temperatura máxima anual de cinco estaciones meteorológicas. El periodo analizado fue de 1975 a 2002.

Desarrollo de cronologías de ancho total de anillo

La cronología más extensa cubrió los últimos 185 años (1826 a 2011); sin embargo, el periodo común para cinco de las cronologías fue de 114 años (1897 a 2011). Las cronologías más cortas fueron DON y CAP con fecha de inicio de 1918 y 1929, respectivamente (Fig. 4, cuadro 2). Los patrones de crecimiento de las ocho cronologías presentan una variación interanual similar. Esta variación interanual se confirmó con el valor de intercorrelación entre las series de las ocho cronologías, donde los valores más altos se presentaron para los sitios SHC, SAA y LCU (Cuadro 4), así como la sensibilidad media y desviación estándar que reflejan los cambios relativos en la variación del ancho de anillo en el tiempo de las series de crecimiento (Cuadro 4). Los patrones comunes muestran un mayor crecimiento en los años de 1958-1959, 1968, 1992-1993 y 2010, y un crecimiento reducido en los años de 1920, 1932-1942, 1949-1957, 1970-1971 y 1998-1999 (Fig.4). Para el caso de la cronología VAR y SAA

antes de 1900 se analizaron pocas series por lo cual presenta una alta variabilidad y no se identifican patrones comunes de variación.

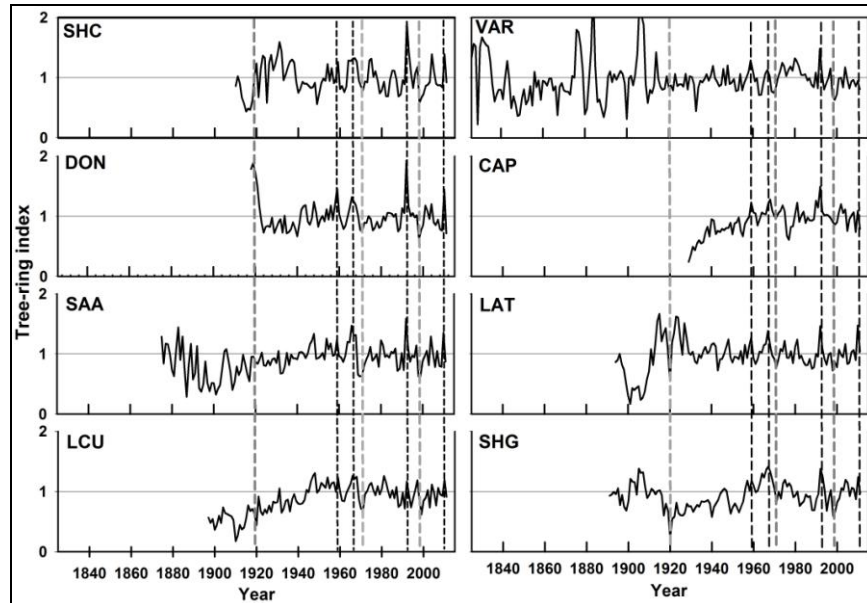


Figura 4. Cronologías estándar de anillo total de ocho sitios muestreados en la RBMM. Las líneas verticales en gris corresponden a años con bajo crecimiento, las líneas verticales negras corresponden a años con alto crecimiento. Los códigos de describen en el cuadro 2.

El análisis de correlación entre las ocho cronologías indicó una asociación significativa entre ellas, excepto para las cronologías SHC y CAP ($r=0.016$, $P<0.05$). La más alta correlación se presentó entre las cronologías LCU y SAA ($r=0.80$, $P<0.05$) (Fig. 5), las cuales se ubican en la parte norte de la RBMM y que por la cercanía entre ellas poseen un crecimiento similar y por lo tanto, una respuesta climática similar (Fig. 5). Los valores de R_{bar} para las ocho cronologías varían entre 0.20 y 0.52, lo que representa una correlación media entre las series de anillo de árboles para un periodo de superposición de 50 años (Cuadro 4). Por otro lado, los valores de EPS se encuentran por encima del umbral de 0.85 en las cronologías LCU, SAA, DON, SHC, SHG y LAT (Cuadro 4), lo que indica estabilidad temporal y una señal común fuerte

entre estas cronologías. Mientras que las cronologías CAP y VAR muestran valores por debajo de este umbral (Cuadro 4), lo cual puede ser por el bajo número de series incluido antes de 1900 (VAR) y una serie temporal corta para el caso de CAP.

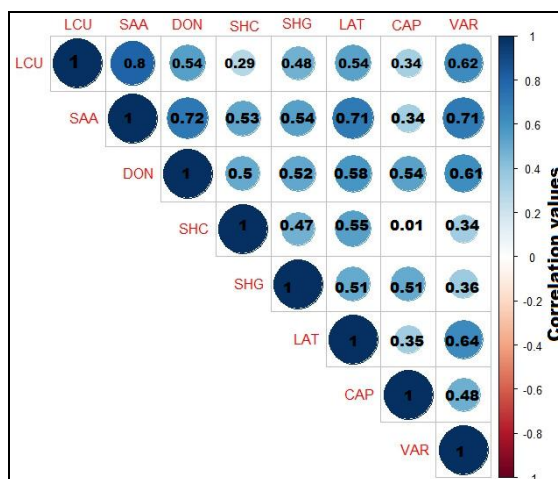


Figura 5. Correlación entre las ocho cronologías en el periodo común 1929-2011, el nivel de significancia es ($P < 0.05$; $r > 0.189$). Las claves son explicadas en el cuadro 2.

Cuadro 4. Estadística descriptiva de las ocho cronologías de anillos de árboles

Código	Periodo	No. Núcleos	Sensibilidad media	Desviación estándar	Auto correlación primer orden	Intercorrelación de series	Rbar	EPS
LCU	1897-2011	58	0.178	0.242	0.733	0.54	0.20	0.854
SAA	1875-2011	86	0.224	0.246	0.424	0.558	0.26	0.907
DON	1918-2011	47	0.16	0.25	0.511	0.506	0.32	0.905
SHC	1910-2011	86	0.193	0.263	0.489	0.613	0.52	0.963
SHG	1891-2011	47	0.144	0.212	0.709	0.47	0.23	0.852
LAT	1894-2011	47	0.186	0.278	0.693	0.523	0.24	0.863
CAP	1929-2011	51	0.139	0.217	0.664	0.467	0.26	0.829
VAR	1826-2011	38	0.240	0.277	0.321	0.468	0.20	0.719

Los tres primeros PCs del crecimiento de los árboles en el intervalo común 1929-2011, presentaron 57.6%, 13.2% y 9.9% de varianza, respectivamente, 80.7% de varianza acumulada (Fig. 6, cuadro 5). Los patrones temporales del PC1 de crecimiento de largo plazo se reflejan en la línea suavizada, la cual muestra que los valores se mantienen por encima de la media en el período 1929-1945, mientras que de 1946 a

1977 oscilan por debajo de la media y posterior a 1977 se presentan alrededor de la media (Fig. 6). La variabilidad en el crecimiento del PC1 está determinada principalmente por los pesos de las cronologías SAA, DON, LAT y VAR (-0.90, -0.83, -0.81 y -0.80, respectivamente) (Cuadro 3). La función de suavizado para el PC2 de crecimiento muestra valores decrecientes en el periodo de 1929 a 1991, mientras que valores por encima de la media ocurrieron de 1929 a 1946, pero de 1946 a 2011 fueron inferiores a la media (Fig. 6), ésta variabilidad está determinada por los pesos de las cronologías CAP y SHC (-0.73 y 0.66, respectivamente). El PC3 de crecimiento presenta valores por encima de la media de 1930 a 1956, después de este año, se presentan valores por debajo de la media hasta 2011; la variación está determinada por los pesos de las cronologías SHG y LCU (-0.53 y 0.39, respectivamente, Fig. 6, cuadro 5).

Cuadro 5. Valores de PC's de las ocho cronologías y porcentajes de varianza que explica cada PC.

Code	PC1	PC2	PC3
LCU	-0.78	-0.06	0.39
SAA	-0.90	0.14	0.23
DON	-0.83	-0.07	-0.10
SHC	-0.60	0.66	-0.32
SHG	-0.71	-0.06	-0.53
LAT	-0.81	0.19	0.03
CAP	-0.57	-0.73	-0.28
VAR	-0.80	-0.15	0.34
% varianza	57.62	13.12	9.90

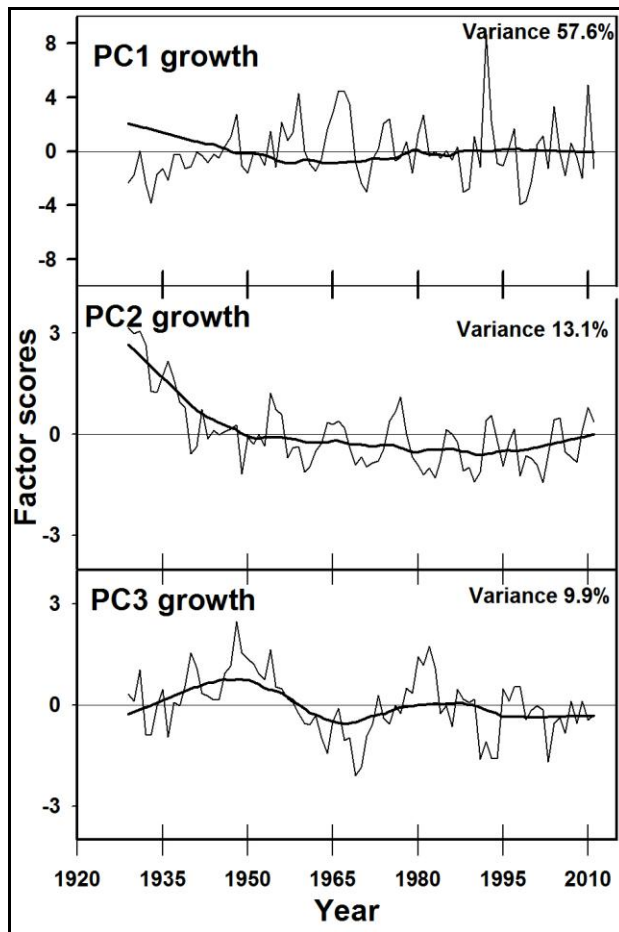


Figura 6. Variación temporal en los factor scores para los primeros tres componentes principales de los índices de crecimiento de anillo total en las ocho cronologías. El periodo de análisis es de 1929 a 2011. La línea flexible en negritas representa la variación de baja frecuencia.

Influencia espacial y temporal de variables climáticas en el crecimiento radial de los árboles

Las correlaciones entre las series dendrocronológicas y variables climáticas (precipitación anual y temperatura máxima anual) indicaron que la variable que más influye en el crecimiento radial de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* es la precipitación (correlación positiva), mientras que la temperatura máxima tuvo un efecto inverso (correlación negativa) en dicho crecimiento, además que esta influencia es de manera

similar en las dos especies tal como se mostró en el capítulo uno. Se presentaron valores de correlación significativos entre la precipitación anual de las estaciones CHS, CUC y PVV con las cronologías SAA, DON, SHC, LAT, CAP y VAR (Fig. 7a). Las cronologías que presentaron una baja correlación con la precipitación anual son LCU y SHG (Fig. 7a). La cronología LAT fue la que correlacionó significativa con los datos de precipitación anual de las siete estaciones (Fig. 7a).

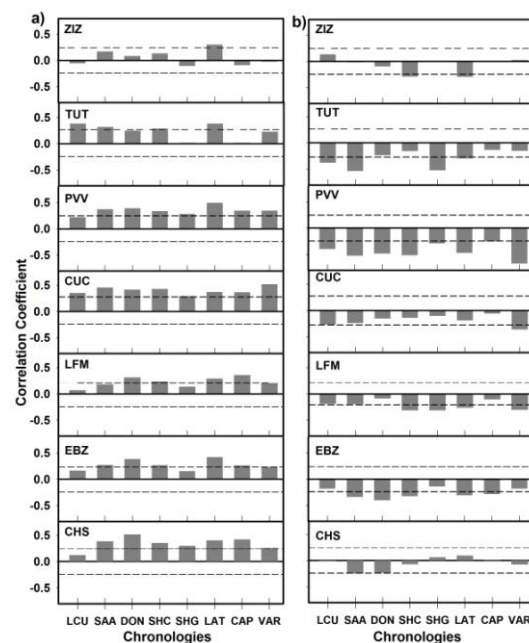


Figura 7. Correlación de las cronologías con registros de precipitación anual (a) y temperatura máxima anual (b), la línea discontinua indica el nivel de significancia. Los códigos se describen en el cuadro 1 y 2 ($p < 0.05$, $r > 0.275$ valor crítico de correlación).

La temperatura promedio y mínima anual no correlacionaron significativamente con las cronologías y fueron descartadas en los análisis. Las cronologías influenciadas por la temperatura máxima anual son SAA, DON y VAR (Fig. 7b), la estación que correlacionó con todas las cronologías fue PVV. Las correlaciones más bajas se presentaron para las cronologías LCU, SHG y SHC, con las estaciones CHS y ZIZ (Fig. 7b).

Las series regionales de la precipitación mensual acumulada muestran una influencia positiva en el crecimiento radial de árboles de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* con los meses de octubre del año previo a mayo del año actual de crecimiento (Fig. 8a), en el caso de la precipitación mensual acumulada, las correlaciones significativas se presentaron para el periodo invierno-primavera ($r=0.50$ a 0.71 , $P<0.05$), mientras que la temperatura máxima acumulada que más influye en el crecimiento de los árboles fue la de mayo y enero (Fig. 8b).

Los patrones de crecimiento radial de los árboles en la RBMM del periodo 1922-2011, correlacionaron con precipitación de los meses de enero, febrero, abril y mayo del año actual de crecimiento (Fig. 9a). Estas variaciones fueron más notorias para los años 1931, 1937, 1959, 1967, 1980, 1992-1993 y 2010, en los cuales se presentaron precipitaciones anuales superiores a la media general, producto de una precipitación abundante en los meses de diciembre, enero y febrero (Fig. 9a). En consecuencia, el crecimiento radial de los árboles estuvo influenciado por las precipitaciones de los meses de invierno principalmente; mientras que para los años de escasa precipitación (1961-1962, 1970-1971, 1988-1989 y 1997-1998) el crecimiento radial de los árboles fue menor como consecuencia de una reducción de la precipitación invernal.

La mayor influencia de la temperatura máxima mensual acumulada en el crecimiento radial de los árboles se presentó de 1992 a 1993 en el mes de mayo, excepto para cronología SHG que correlacionó con el mes de enero (Fig. 8b).

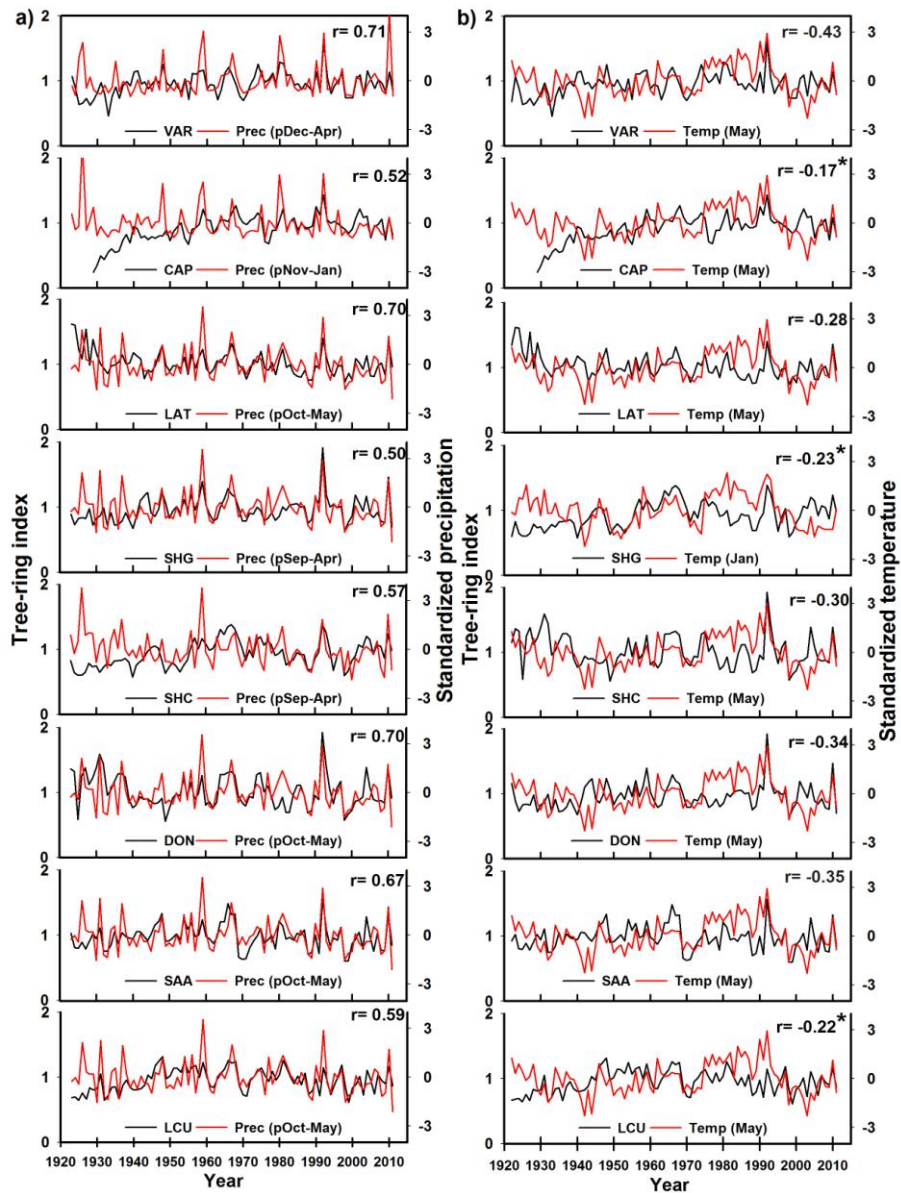


Figura 8. Correlación de las cronologías con serie de precipitación mensual acumulada (a) y temperatura máxima mensual acumulada (b) ($p < 0.05$ $r > 0.240$ valor crítico de correlación), los valores de r^* son los que no presentaron correlación significativa.

La comparación de los análisis de PC de crecimiento de árboles y variables climáticas para el intervalo común de 1975 a 2002, indica que existe una correlación significativa entre PC1 de precipitación y PC1 de crecimiento ($r=0.59$, $P<0.05$), así como entre PC1 de precipitación y PC4 de crecimiento ($r=0.42$, $P<0.05$), ambas

caracterizadas por dos periodos de variación común. El primer periodo comprende de 1989 a 1993 con valores de PCs por encima de la media y el segundo periodo de 1997 a 2002 con valores por debajo de la media (Fig. 10a y 10b). La cronología que presentó los pesos más altos en el PC1 fue SAA, la cual se encuentra influenciada principalmente por la precipitación registrada por las estaciones CHS, PVV y EBZ (Fig. 10b). Para el caso del PC4 de crecimiento versus PC1 de precipitación, la cronología con el peso más alto fue LCU y SHG, las cuales se encuentran influenciadas principalmente por las estaciones CHS, PVV y EBZ (Fig. 10a).

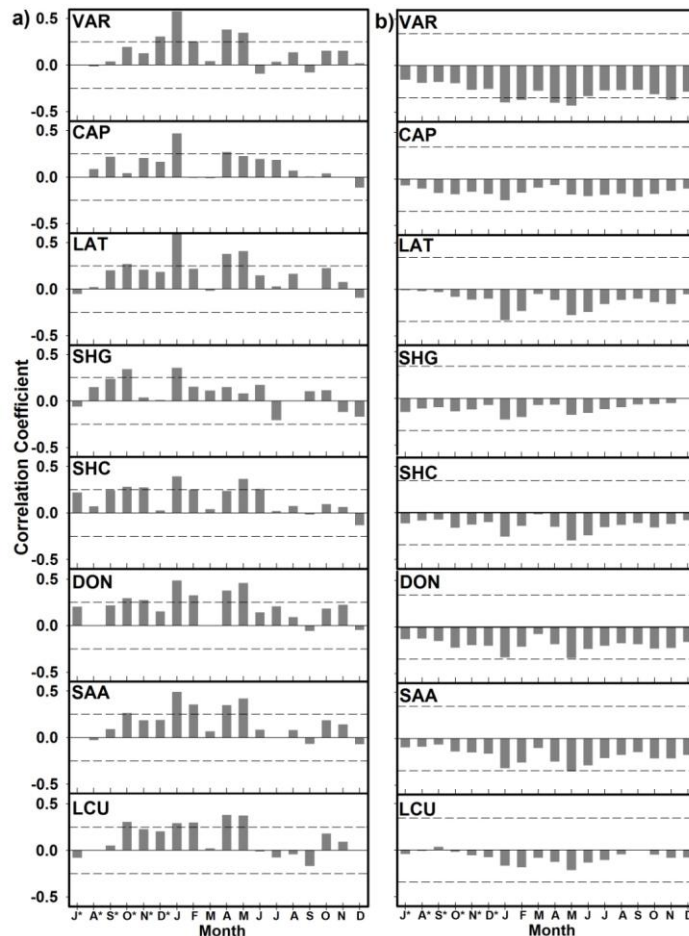


Figura 9. Correlación de las cronologías con la serie de precipitación mensual (a) y con la serie de temperatura máxima mensual (b). La línea discontinua horizontal indica el nivel de significancia, los * indican los meses previos al año actual.

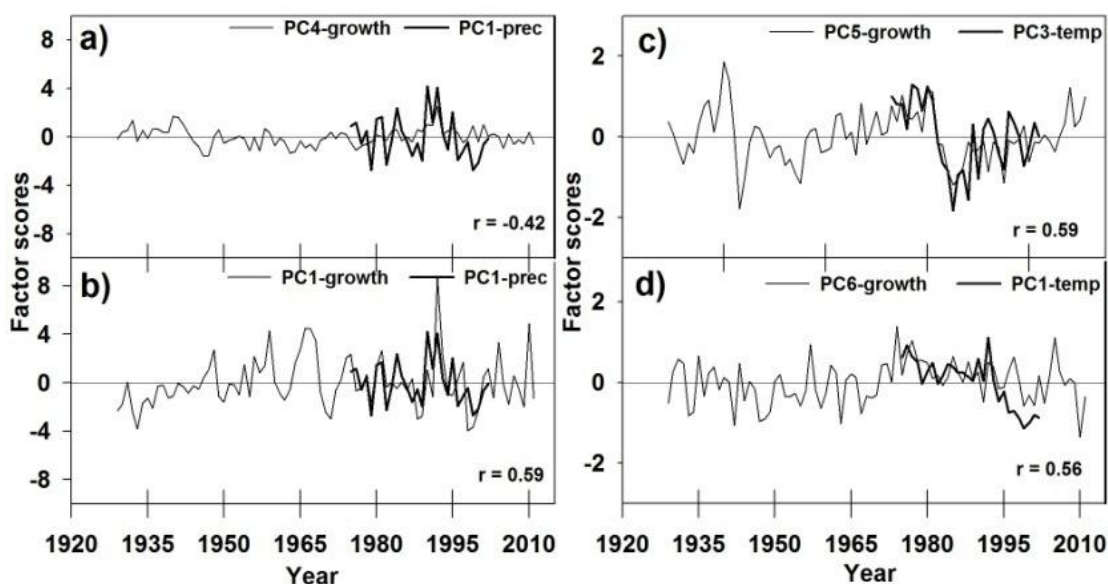


Figura 10. Variación temporal del crecimiento de los anillos de árboles para los PCs seleccionados de acuerdo a las ocho cronologías regionales para el periodo de 1929-2011, en comparación con los PCs correlacionados de precipitación y temperatura para el periodo de 1975-2002. a) PC4-crecimiento y PC1-precipitación; b) PC1-crecimiento y PC1-precipitación; c) PC5 crecimiento y PC3-temperatura; d) PC6-crecimiento y PC1-temperatura.

Los PCs de crecimiento que presentaron más alta correlación con la temperatura son el PC5 de crecimiento con PC3 de temperatura ($r=0.59$, $P<0.05$) y PC6 de crecimiento con PC1 de temperatura ($r=0.56$, $P<0.05$). El PC3 de temperatura con el PC6 de crecimiento, presentan valores por encima de la media de 1975 a 1982, posteriormente ambos valores de PCs presentan un marcado descenso de 1980 a 1985. Después de 1985 se presenta un aumento de temperatura y de los valores de crecimiento de los árboles hasta ascender a los valores medios, y finalmente de 1989 a 2002 se presenta una oscilación alrededor de la media (Fig. 10c).

El comportamiento temporal del PC1 de temperatura y el PC6 de crecimiento muestra valores que oscilan alrededor de la media; para el año de 1992 se presentaron valores altos en el PC6 crecimiento y PC1 temperatura, después de 1992, se presentó

un descenso en la temperatura hasta llegar a los valores más bajos en el periodo de 1999 a 2002 (Fig. 10d). Los patrones de variación temporal de los valores de PC1 de temperatura versus PC6 de crecimiento, se encuentran influenciado por las temperaturas registradas en las estaciones PVV, CUC y LFM, las cuales han presentado un incremento en esta variable en las últimas décadas (Fig. 10d).

DISCUSIÓN

Cinco de las ocho cronologías incluyeron árboles con edades superiores a los 100 años; por lo anterior, los bosques de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa* de la RBMM constituyen comunidades jóvenes. En otros estudios llevados a cabo en el norte de la RBMM con *A. religiosa*, Huante *et al.*, (1991) reportaron una cronología de 70 años (1920-1990); mientras que Salazar y Salgado, (2000) únicamente reportaron 50 años de edad (1950-2000). En el presente estudio se logró extender las cronologías existentes tanto espacial como temporalmente (1826-2011), con lo cual se tiene mayor certeza de la influencia del clima en el crecimiento de los bosques de la RBMM y más claridad en la variación temporal de crecimiento de los bosques. Por otra parte, estudios realizados en El Pico de Tancítaro, Michoacán, señalan cronologías de *A. religiosa* con sólo 127 años de edad (Cerano *et al.*, 2013). Los resultados de estudios previos y del presente estudio, sugieren que en el Sistema Volcánico Transversal del estado de Michoacán y parte de Estado de México, la edad de los árboles es en promedio de 100 años. Sin embargo, en el presente trabajo se dataron árboles hasta de 185 años de edad. Este hallazgo puede estar asociado, por una lado, a los criterios espacialmente explícitos aplicados en el diseño de muestreo (áreas con pendientes pronunciadas,

orientadas al sur y bosques conservados) (Carlón-Allende *et al.*, 2015), y por el otro al tamaño de muestra involucrado (40 a 50 árboles por sitio entre), superior al utilizado en estudios realizados en el norte de la RBMM por (Huante *et al.*, 1991; Salazar y Salgado, 2000).

Por otra parte, el aprovechamiento y degradación al que han estado sujetos los bosques en la RBMM (Brower *et al.*, 2002), pudiera haber ocasionado la remoción de los árboles longevos y que los árboles actuales de escasa edad sean producto de regeneración y de procesos sucesionales (Navarrete *et al.*, 2011).

A pesar de que se encontraron algunas diferencias entre las ocho series de crecimiento, la variación interanual y multianual en los índices anuales de incremento radial fueron similares aun mezclando las dos especies, de tal manera que fue factible codatarlos, como lo indica la intercorrelación entre series y las correlaciones significativas derivadas del proceso de comparación entre todas ellas (Fig. 2). Las pequeñas diferencias del crecimiento encontradas entre sitios, pudieran ser producto de variaciones ecológicas locales, como profundidad y fertilidad del suelo, pendiente del terreno, exposición, entre otros factores asociados (Fritts, 1976; Speer, 2010) (Carlón-Allende *et al.*, 2015; Fekedulegn *et al.*, 2003; Liang *et al.*, 2006). Las variaciones en el crecimiento fueron más notorias en los años 1932-1942, 1949-1957, 1959, 1969, 1970-1971, 1992-1993, 1998 y 2010; comportamientos similares se han reportado para el norte de México (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva-Diaz *et al.*, 2007; Stahle *et al.*, 2011), así como también coinciden con otros estudios realizados en Michoacán, principalmente el periodo de 1998-1999 que se presentó un bajo crecimiento producto

de una escasa precipitación (Cerano *et al.*, 2013), por lo que parece que la respuesta del crecimiento de los árboles en esta región tiene una influencia significativa de variaciones climáticas de amplia distribución espacial, caso concreto El Niño Oscilación del Sur (Stahle *et al.*, 2011).

En este estudio, los años señalados con variaciones notorias, como el periodo de 1997-1999, el crecimiento estuvo afectado por condiciones neutrales y fases débiles del Niño y la Niña. El efecto de la fase cálida del Niño tiene una influencia mayor durante las estaciones invierno y primavera, donde incrementa substancialmente la precipitación en el norte y noreste de México (Villanueva *et al.*, 2015), pero en el centro de México disminuye. En la RBMM, la influencia de este fenómeno influyó en el crecimiento de los bosques debido a una baja precipitación.

El crecimiento de *A. religiosa* y *P. pseudostrobus* y su relación con las variables climáticas contribuye a la comprensión de la influencia del clima en el crecimiento de los árboles de la RBMM. Los valores de intercorrelación entre series y sensibilidad media son similares a otros estudios reportados para el centro y noreste de México (Huante *et al.*, 1991; Salazar y Salgado, 2000; Therrell, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva-Diaz *et al.*, 2007; Cerano *et al.*, 2013; Pompa-García *et al.*, 2013), además en el presente estudio encontramos que los valores de EPS son superiores a 0.85 en la mayoría de las cronologías (Cuadro 4), lo que indica una fuerte señal en el crecimiento temporal de las cronologías del norte, centro y sur de la RBMM.

En este estudio, se encontró que el crecimiento de los árboles estuvo influenciado significativamente ($P < 0.05$) por la precipitación estacional inverno-

primavera, en particular, por los meses de enero, febrero, abril y mayo (Fig. 8a y 9a); estos resultados concuerdan con otros estudios en ambientes templados, donde se ha corroborado que una disminución de la precipitación puede influir de manera significativa en el crecimiento radial de los árboles (Huante *et al.*, 1991; Zhang y Hebdá, 2004; Birdsey y Pan, 2011, Cerano *et al.*, 2013). Por lo tanto, un mayor incremento radial de los árboles tiene influencia positiva en la acumulación de biomasa de las especies estudiadas, situación que puede favorecer un mayor abrigo para las poblaciones de la mariposa monarca (Brower *et al.*, 2009), las cuales constituyen el principal atractivo de la RBMM.

Considerando las proyecciones de cambio climático, las cuales asumen que el territorio nacional será más árido a consecuencia del calentamiento global (Seager *et al.*, 2009; IPCC, 2013), el crecimiento de los bosques se verá limitado, tal y como se ha mostrado en estudios realizados para el norte de México y sur de Estados Unidos de Norteamérica (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007; Therrell, 2002; Castagneri *et al.*, 2014; Scott, 2014; Ziaco *et al.*, 2014). Este efecto podría ser mayor, si la reducción en la precipitación se produce durante el período invierno-primavera, la cual se asocia significativamente con el incremento o decremento radial de las especies estudiadas.

La temperatura máxima presentó una asociación significativa de manera negativa para los meses de enero y mayo (Fig. 8b y 9b), algo similar encontraron Huante *et al.*, (1991) quienes reportaron que la temperatura máxima de marzo influye de manera negativa en el crecimiento de *Abies religiosa*. Estos hallazgos constatan que un incremento en la temperatura máxima provoca una reducción en crecimiento radial

(relación negativa), debido que se incrementa la tasa de evaporación y abate con mayor rapidez la humedad almacenada en el suelo. Las proyecciones de cambio climático mencionan que existirá un incremento de la temperatura lo cual afecta el crecimiento de los bosques, debido que puede provocar un déficit de presión de vapor lo que causa el cierre de los estomas y una reducción de la fotosíntesis, provocando una disminución en el crecimiento de los árboles (Pompa-García *et al.*, 2013). Esto puede resultar en una disminución y mortalidad de mariposas monarcas, debido que éstas son sensibles a las variaciones del clima, principalmente a los aumentos de temperatura (Oberhauser y Peterson, 2003; Barve *et al.*, 2012).

Mediante los análisis de PCs de variables climáticas y crecimiento de árboles no pudimos identificar patrones espaciales de las cronologías de acuerdo a la influencia de variables climáticas, lo cual puede ser debido a que el área se encuentra en un rango altitudinal y latitudinal muy estrecho. Otro estudios con áreas más extensas han encontrado una relaciones espaciales con variables climáticas (Lara *et al.*, 2005; Villanueva-Diaz *et al.*, 2007; Ram y Borgaonkar, 2014). Sin embargo, sí se identificaron patrones temporales comunes de crecimiento entre las cronologías del norte, centro y sur de la RBMM, con lo cual queda demostrado que los bosques, de la RBMM presentan una señal común entre las diferentes cronologías y entre las dos especies estudiadas (*A. religiosa* y *P. pseudostrobus*), esto como respuesta a las variables climáticas. Se cree que estos patrones de variación climática serán más extremos (Vidal y Rendón-Salinas, 2014) y más continuos para finales del presente siglo, lo que provocará una disminución de los bosques de oyamel en más 50% para el año 2030

(Sáenz-Romero *et al.*, 2012), con lo cual se tendría una disminución en el hábitat de la mariposa monarca, provocando disminución de las colonias de hibernación.

CONCLUSIONES

Este estudio presenta la primer evidencia de la influencia de variables climáticas en el crecimiento de *P. pseudostrobus* para la RBMM y para el caso de *A. religiosa* se logrón tener datos de a nivel de RBMM y extender las cronologías a mas de 50 años de las ya existentes. No existe una relación espacial entre el crecimiento de los árboles y la influencia de las variables climáticas (precipitación y temperatura), es decir, las variaciones en el crecimiento radial de los árboles de la RBMM no se encuentran influenciadas por los gradientes latitudinal y altitudinal, probado mediante la similitud entre las cronologías desarrolladas para las zonas norte, centro y sur de la RBMM.

Una estación invierno-primavera húmeda se asocia positivamente con el crecimiento radial de los árboles, teniendo un mayor crecimiento debido a la disponibilidad de agua, mientras que los inviernos cálidos y con escasa precipitación originados durante la fase fría del fenómeno del Niño, afectan de manera negativa el crecimiento de los árboles.

La precipitación fue la variable más útil para explicar el incremento radial anual y es la variable que limita el crecimiento, lo que implica que un cambio climático futuro asociado con una disminución en la precipitación e incremento en la temperatura, puede influir de manera negativa en el crecimiento de los árboles presentes en los

bosques de la RBMM, lo que se puede traducir en un hábitat reducido para la invernación de la mariposa monarca.

La presente investigación contribuye al entendimiento de la influencia del clima en el crecimiento de los bosques de *A. religiosa* y *P. pseudostrobus* en los últimos 100 años en la RBMM; sin embargo, es necesario realizar un mayor número de estudios en el Sistema Volcánico Transversal, que permita comprender a escala regional la influencia del clima y los modos de circulación general que explican la variabilidad de alta y baja frecuencia con fines predictivos y de conservación del hábitat de la mariposa monarca.

REFERENCIAS

- Alonso-Mejia A., Rendon-Salinas E., Montesinos-Patino E. & Brower, L.P. (1997) Use of Lipid Reserves by Monarch Butterflies Overwintering in Mexico: Implications for Conservation. *Ecological Applications*, **7**, 934–947.
- Bhuta L.M.K. (2009) Climate-Radial Growth Relationships of Northern Latitudinal Range Margin Longleaf Pine (*Pinus palustris* P. Mill.) in the Atlantic Coastal Plain of Southeastern Virginia. *Tree-Ring Research*, **65**, 105–115.
- Barve N., Bonilla A.J., Brandes J., Brown J.C., Brunzell N., Cochran F.V., Crosthwait R.J., Gentry J., Gerhart L.M., Jackson T., Kern A.J., Oberhauser K.S., Owens H.L., Peterson A.T., Reed A.S., Soberón J., Sundberg A.D., & Williams, L.M. (2012) Climate-change and mass mortality events in overwintering monarch butterflies. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, **83**, 817-824.
- Birdsey R. & Pan, Y. (2011) Ecology: Drought and dead trees. *Nature Climate Change*, **1**, 444–445.
- Bradley R.S. (1999) *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary*. Academic Press, Amsterdam, The Netherlands.

- Briffa K.R. (1999) Interpreting High-Resolution Proxy Climate Data — The Example of Dendroclimatology. *Analysis of Climate Variability* (ed. by P.D.H. von Storch and D.A. Navarra), pp. 77–94. Springer Berlin Heidelberg.
- Brower L.P., Castilleja G., Peralta A., Lopez-Garcia J., Bojorquez-Tapia L., Diaz S., Melgarejo D., & Missrie, M. (2002) Quantitative Changes in Forest Quality in a Principal Overwintering Area of the Monarch Butterfly in Mexico, 1971–1999. *Conservation Biology*, **16**, 346–359.
- Brower L.P., Williams E.H., Slayback D.A., Fink L.S., Ramírez M.I., Zubieta R.R., Ivan Limon Garcia M., Gier P., Lear J.A., & Van Hook, T. (2009) Oyamel fir forest trunks provide thermal advantages for overwintering monarch butterflies in Mexico. *Insect Conservation and Diversity*, **2**, 163–175.
- Bunn A.G. (2008) A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, **26**, 115–124.
- Carlón-Allende T., Mendoza M.E., Villanueva-Diaz J., y Pérez-Salicrup, D. (2015) Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Madera y Bosques*, **21**, 11-22.
- Castagneri D., Nola P., Motta R., & Carrer, M. (2014) Summer climate variability over the last 250 years differently affected tree species radial growth in a mesic *Fagus–Abies–Picea* old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, **320**, 21–29.
- Cerano P.J., Villanueva D.J., Cervantes M.R., Vázquez S.L., Trucios C.R. & Guerra De la C.V. (2013) Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, **83**, 41–54.
- Chow V., Maidment D., & Mays L. (1988) *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, INC, United States of America.
- Cleaveland M.K., Stahle D.W., Therrell M.D., Villanueva-Diaz J., & Burns, B.T. (2003) Tree-Ring Reconstructed Winter Precipitation and Tropical Teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, **59**, 369–388.

- Díaz S.C., Touchan R., & Swetnam, T.W. (2001) A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Climatology*, **21**, 1007–1019.
- DOF (2000) Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región denominada Mariposa Monarca, ubicada en los municipios de Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende en el Estado de México, así como en los municipios de Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro y Aporo en el Estado de Michoacán, con una superficie total de 56,259-05-07.275 hectáreas, Primera sección, México.
- Fekedulegn D., Hicks Jr. R.R., & Colbert, J.J. (2003) Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed. *Forest Ecology and Management*, **177**, 409–425.
- Friedrichs D.A., Trouet V., Büntgen U., Frank D.C., Esper J., Neuwirth B., & Löffler, J. (2009) Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees*, **23**, 729–739.
- Fritts H.C. (1976) *Tree rings and climate*. Academic Press, London, UK.
- Garza, A. (1973) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México.
- Hanson P.J. & Weltzin, J.F. (2000) Drought disturbance from climate change: response of United States forests. *The Science of the Total Environment*, **262**, 205–220.
- Holmes R.L. (1983) Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement. *Tree-Ring Bulletin*, **44**, 69–75.
- Huante P., Rincón E., & Swetnam, T.W. (1991) Dendrochronology of *Abies Religiosa* in Michoacan, Mexico. *Tree-Ring Bulletin*, **51**, 15–28.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013) Working Group I contribution to the IPCC 5th Assessment Report "Climate Change 2013: The Physical Science Basis. .

- Lara A., Villalba R., Wolodarsky-Franke A., Aravena J.C., Luckman B.H., & Cuq, E. (2005) Spatial and temporal variation in *Nothofagus pumilio* growth at tree line along its latitudinal range (35°40'–55° S) in the Chilean Andes. *Journal of Biogeography*, **32**, 879–893.
- Lebourgeois F., Mérian P., Courdier F., Ladier J., & Dreyfus, P. (2012) Instability of climate signal in tree-ring width in Mediterranean mountains: a multi-species analysis. *Trees*, **26**, 715–729.
- Liang E., Shao X., Eckstein D., Huang L., & Liu, X. (2006) Topography- and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau. *Forest Ecology and Management*, **236**, 268–277.
- Therrell M.D. Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (2002) Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of geophysical research*, **107**, (D14).
- Navarrete J.L., Isabel Ramírez M., & Pérez-Salicrup, D.R. (2011) Logging within protected areas: Spatial evaluation of the monarch butterfly biosphere reserve, Mexico. *Forest Ecology and Management*, **262**, 646–654.
- Oberhauser K. & Peterson, A.T. (2003) Modeling current and future potential wintering distributions of eastern North American monarch butterflies. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **100**, 14063–14068.
- Paulhus J.L.H. & Kohler, M.A. (1952) Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review*, **80**, 129–133.
- Pederson N., Cook E.R., Jacoby G.C., Peteet D.M., & Griffin, K.L. (2004) The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern range margin tree species. *Dendrochronologia*, **22**, 7–29.
- Pompa-García M., Cerano-Paredes J., & Fulé, P.Z. (2013) Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia*, **31**, 198–204.
- Ram S. & Borgaonkar, H.P. (2014) Tree-ring analysis over western Himalaya and its long-term association with vapor pressure and potential evapotranspiration. *Dendrochronologia*, **32**, 32–38.

- Robinson W.J. & Evans, R. (1980) A Microcomputer-Based Tree-Ring Measuring System. *Tree-Ring Bulletin*, 40, 59–63.
- Sáenz-Romero C., Rehfeldt G.E., Duval P., & Lindig-Cisneros, R.A. (2012) *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, **275**, 98–106.
- Salazar S.B. & Salgado, T.T. (2000) Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques*, **6**, 73–86.
- Schweingruber F.H. (2007) *Wood Structure and Environment*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Seager R., Ting M., Davis M., Cane M., Naik N., Nakamura J., Li C., Cook E., & Stahle, D.W. (2009) Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *ATMOSFERA*, **22**, 1–31.
- Speer J.H. (2010) *Fundamentals of Tree-Ring Research*. University of Arizona Press,
- Stahle D.W., Diaz J.V., Burnette D.J., Paredes J.C., Heim R.R., Fye F.K., Acuna Soto R., Therrell M.D., Cleaveland M.K., & Stahle, D.K. (2011) Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, **38**, L05703.
- Scott S.G. (2014) An overview of tree-ring width records across the Northern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews*, **95**, 132–150.
- Stokes M.A. & Smiley T.L. (1968) *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press,
- Vaganov E.A., Hughes M.K., & Shashkin A.V. (2006) *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Vidal O. & Rendón-Salinas, E. (2014) Dynamics and trends of overwintering colonies of the monarch butterfly in Mexico. *Biological Conservation*, **180**, 165–175.
- Villanueva-Diaz J., Luckman B.H., Stahle D.W., Therrell M.D., Cleaveland M.K., Cerano-Paredes J., Gutierrez-Garcia G., Estrada-Avalos J., & Jasso-Ibarra, R. (2005) Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: Water management

implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, Mexico. *Dendrochronologia*, **22**, 215–223.

Villanueva-Diaz J., Stahle D.W., Luckman B.H., Cerano-Paredes J., Therrell M.D., Cleaveland M.K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007) Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, **83**, 117–131.

Villanueva J., Cerrano Paredes J., Vázquez Selem L., Stahle D.W., Fulé P.Z., Yocom L.L., Franco ramos O., & Ruiz Corral, J.A. (2015) Red Dendrocronológica del Pino de Altura (*Pinus hartwegii* Lindl.) para estudios dendroclimáticos en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, **86**, 5–14.

Wigley T.M.L., 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**, 201–213.

Yocom L.L., Fulé P.Z., Brown P.M., Cerano J., Villanueva-Díaz J., Falk D.A., & Cornejo-Oviedo, E. (2010) El Niño-southern oscillation effect on a fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology*, **91**, 1660–1671.

Zhang Q.-B. & Hebda, R.J. (2004) Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga menziesii* on the central coast of British Columbia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, **34**, 1946–1954.

Ziaco E., Biondi F., Rossi S., & Deslauriers, A. (2014) Climatic Influences on Wood Anatomy and Tree-Ring Features of Great Basin Conifers at a New Mountain Observatory. *Applications in Plant Sciences*, **2**, doi:10.3732/apps.1400054.

Conclusiones generales

Este estudio, refuerza el planteamiento de que las características topográficas como la pendiente de terreno, particularmente aquellas más fuertes (escarpadas) y laderas con orientación al sur, son factores determinantes en la disponibilidad hídrica para el crecimiento de los árboles, ya que tienen menor retención de humedad, mayor insolación y evapotranspiración. En esta condición, los árboles muestran un menor crecimiento radial anual y llegan a ser más longevos; situación que también es favorecida por una menor calidad de sitio, que previene aprovechamientos forestales, lo

que permite que los árboles no sean removidos para su uso comercial. De esta manera, el análisis espacial de variables biofísicas del paisaje, de manera conjunta utilizando técnicas de PR y herramientas de SIG's, permitió definir sitios con presencia de árboles sensibles a variables climáticas, así como sitios con árboles longevos, proponiendo una estrategia que hace más eficientes los procedimientos estándar de muestreo para el desarrollo de estudios dendroclimáticos. El uso de esta metodología permite minimizar el tiempo, esfuerzo de muestreo y recursos económicos a emplear en la generación de series dendrocronológicas.

Mediante las series dendrocronológicas generadas para la RBMM, se constató que la variabilidad climática a lo largo del gradiente altitudinal y latitudinal, afectó de manera similar los sitios estudiados, situación que indica que la variabilidad climática está gobernada por fenómenos climáticos que impactan por igual a los árboles de los sectores sur, centro y norte de la RBMM y que las variaciones observadas a lo largo del gradiente en términos de crecimiento de las especies de *P. pseudostrobus* y *A. religiosa*, tienen alta influencia de factores fisiográficos locales.

La estación húmeda de invierno-primavera se asocia positivamente con el crecimiento radial de los árboles, situación que se explica por la acumulación del agua en el suelo, que luego es utilizada por el arbolado al inicio de la estación de crecimiento. Por otra parte, los inviernos cálidos y con escasa precipitación a veces asociados al fenómeno del Niño, producen una reducción en crecimiento radial.

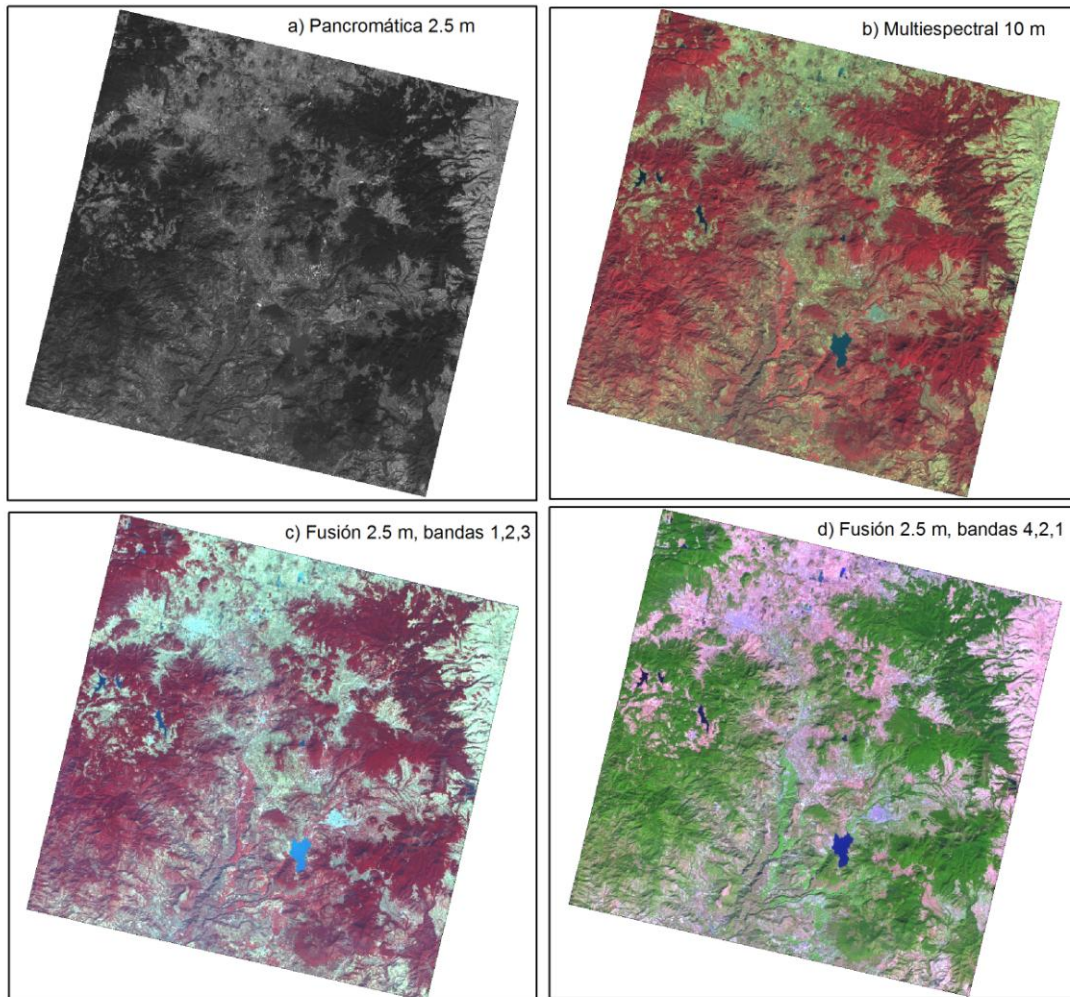
La precipitación fue la variable más útil para explicar el incremento radial anual, pero también es la variable que limita el crecimiento, lo que implica que un cambio

climático futuro asociado con una disminución en la precipitación e incremento en la temperatura, puede influir de manera negativa en el crecimiento de los árboles en la RBMM, lo que se puede traducir en un hábitat reducido para la hibernación de la mariposa monarca.

La presente investigación contribuye al entendimiento de la influencia del clima en el crecimiento de los bosques de *A. religiosa* y *P. pseudostrobus* en los últimos 185 años en la RBMM; sin embargo, es necesario incrementar la red dendrocronológica existente, con el fin de comprender a escala regional y espacial, la influencia del clima y los patrones de circulación general, que explican la variabilidad de alta y baja frecuencia y sus tendencias, con fines predictivos y de conservación del hábitat de la mariposa monarca.

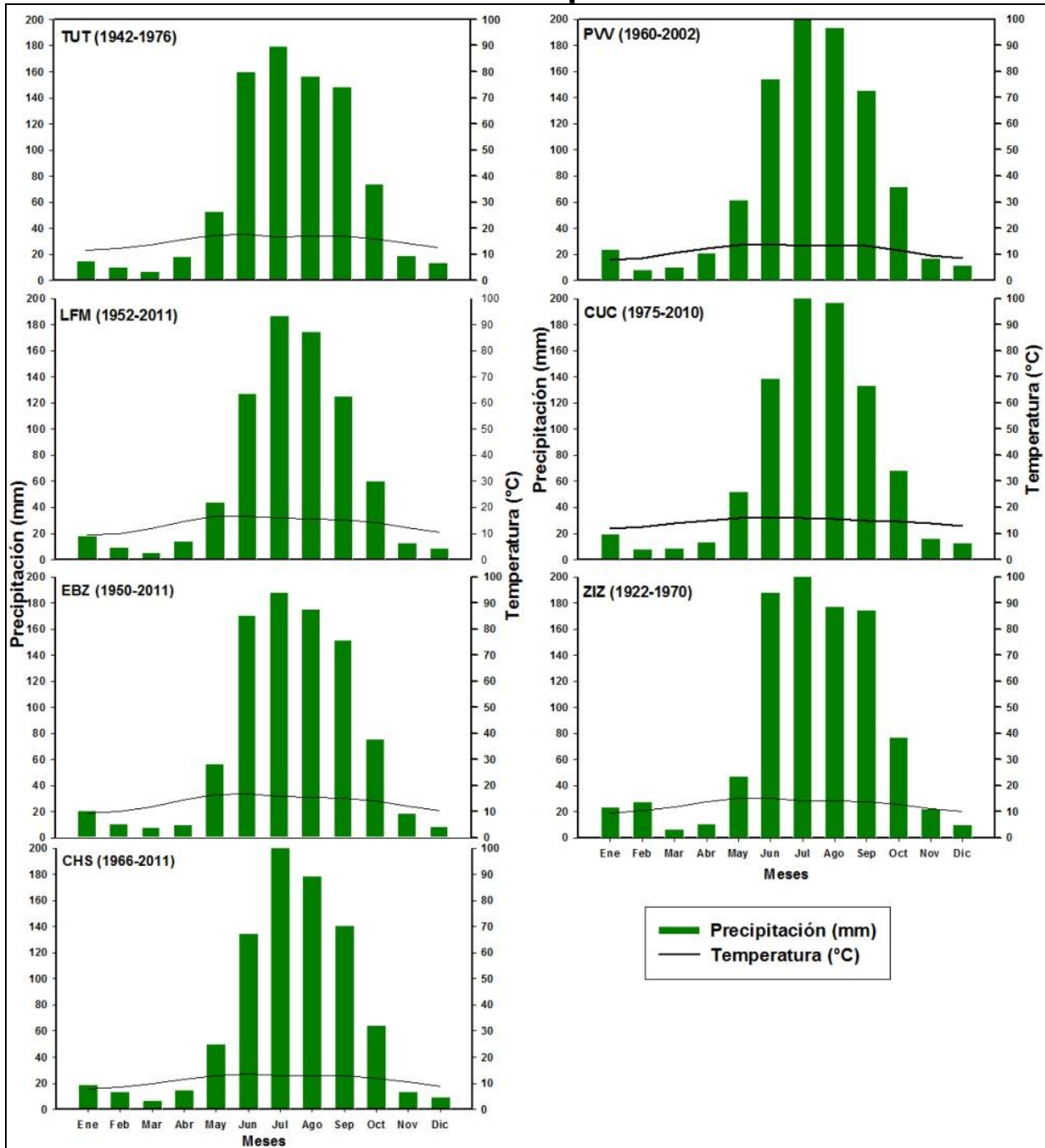
Anexos

Anexo de capítulo I.

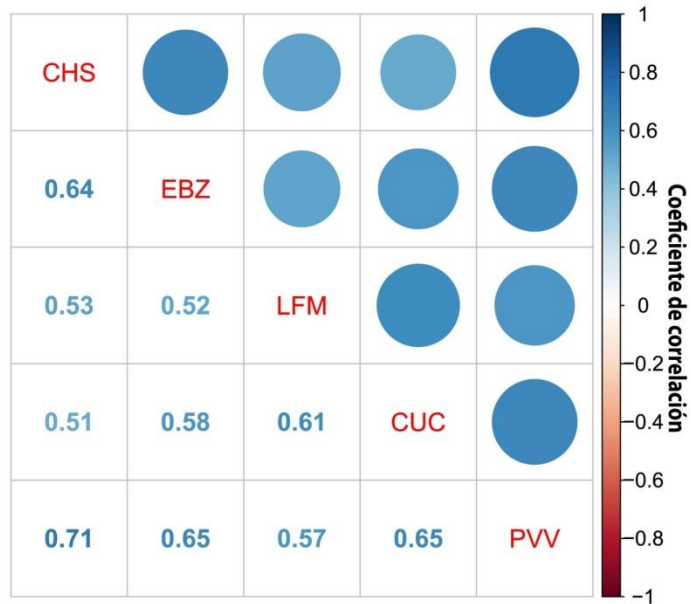


Imágenes de satélite SPOT 5 usadas para interpretar la Cobertura Vegetal y Uso de Suelo

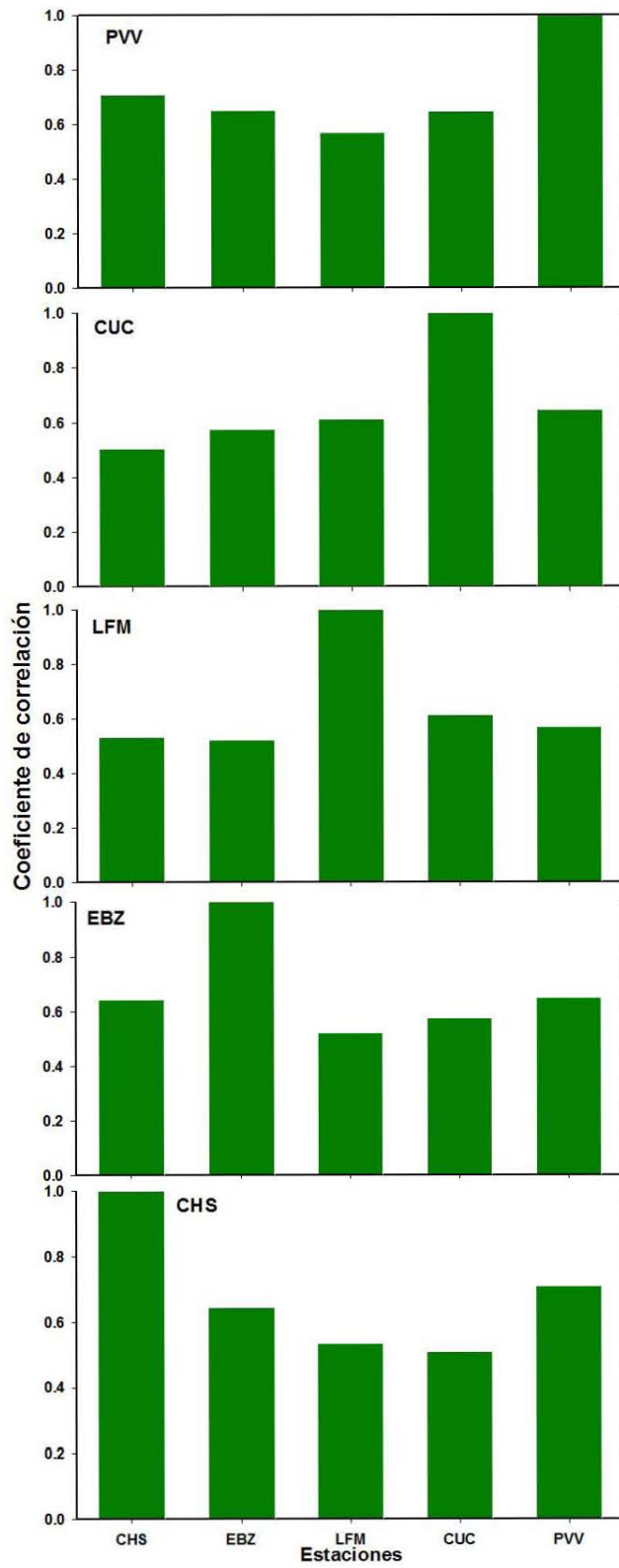
Anexo de capítulo II



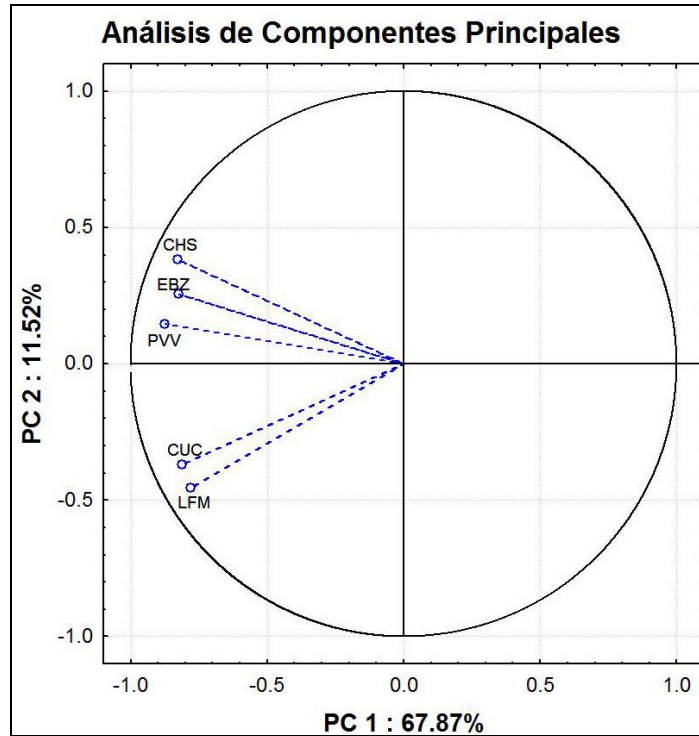
Climogramas de los datos de las siete estaciones usadas en los análisis de variables climáticas e influencia de variables climáticas en el crecimiento de los árboles



Análisis de correlación de datos de precipitación anual de cinco estaciones, el periodo de análisis comprende de 1975 a 2001.

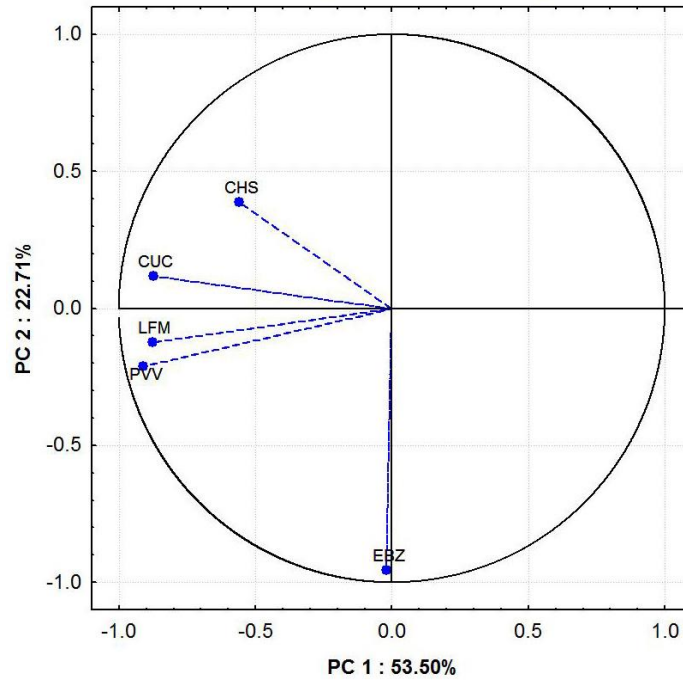


Análisis de correlación de datos de precipitación anual de cinco estaciones, el periodo de análisis comprende de 1975 a 2001.



Análisis de Componentes Principales de los datos de precipitación anual de cinco estaciones para el periodo de 1975 a 2001.

Análisis de Componentes Principales



Análisis de Componentes Principales de los datos de temperatura promedio anual de cinco estaciones para el periodo de 1975 a 2001.

Muestreo y procesamiento de muestras dendrocronológicas



Bosques de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca



Muestreo dendrocronológico



Procesamiento de muestras



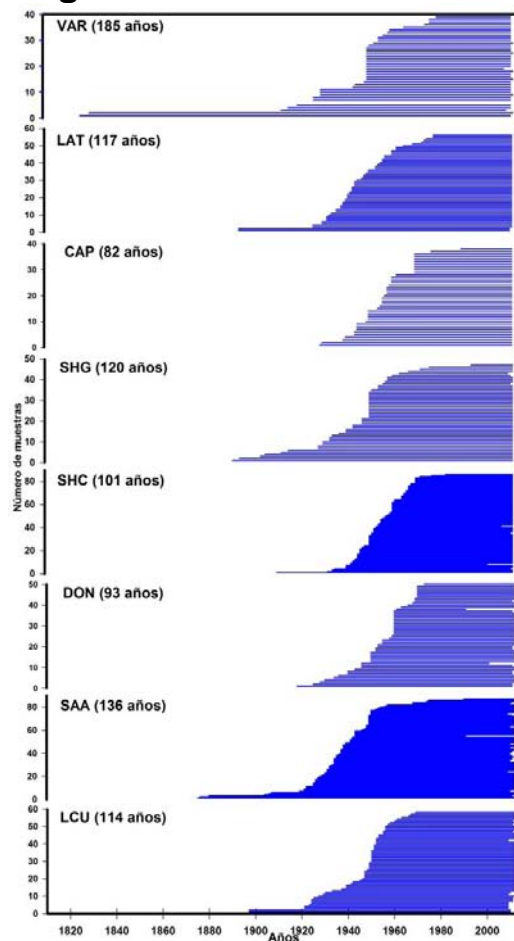
Muestras dendrocronológicas

Análisis de de muestras dendrocronológicas

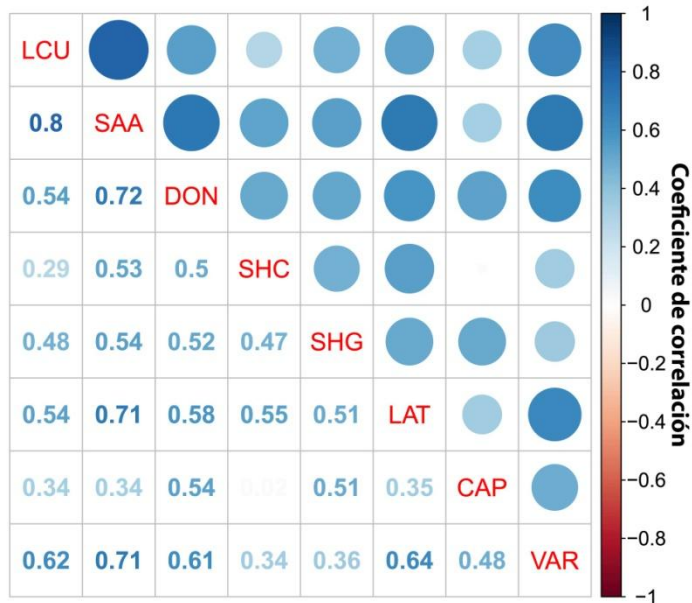


Medición de muestras mediante equipo Velmex

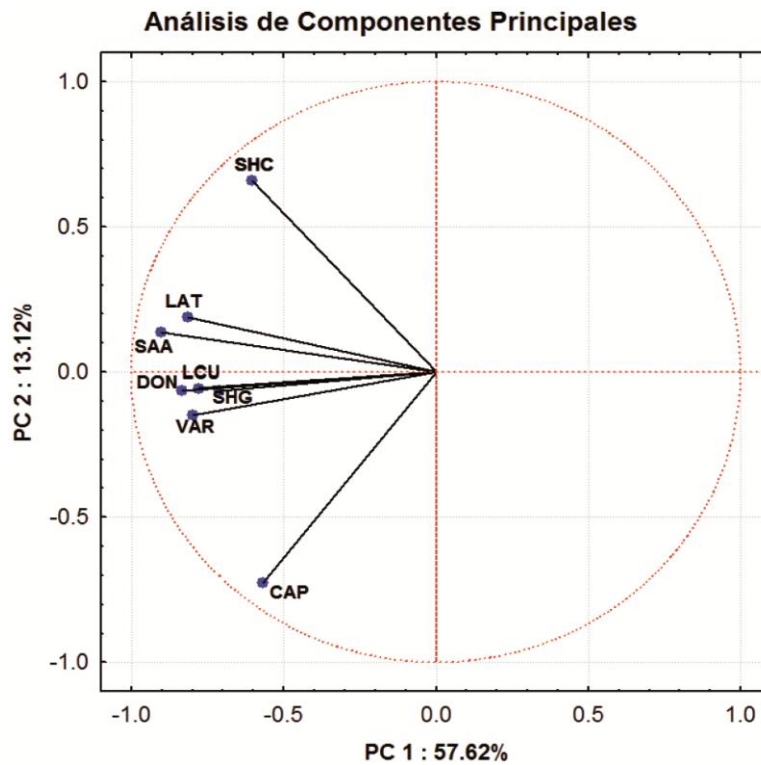
Análisis dendrocronológicos



Resolución temporal de las ocho cronologías



Análisis de correlación de las ocho cronologías, el periodo de análisis comprende de 1929 a 2011.



Análisis de Componentes Principales con datos de ocho cronologías, periodo de análisis 1929-2011.