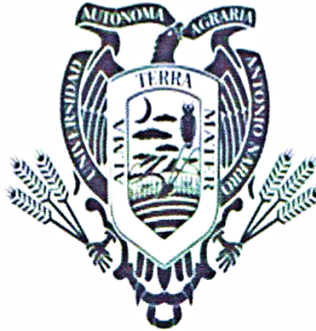


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



Respuesta dendroclimática de *Pinus oocarpa* Schiede
en tres sitios del estado de Chiapas

TESIS

Que presenta MARÍA ISABEL LÓPEZ HERNÁNDEZ
como requisito para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Firma manuscrita en tinta azul de Eladio Heriberto Cornejo Oviedo.

Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo
Director (UAAAN)

Firma manuscrita en tinta azul de Julián Cerano Paredes.

Dr. Julián Cerano Paredes
Director Externo

Saltillo, Coahuila

Junio 2021

Respuesta dendroclimática de *Pinus oocarpa* Schiede
en tres sitios del estado de Chiapas

Tesis

Elaborada por MARÍA ISABEL LÓPEZ HERNÁNDEZ como requisito parcial
para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de
Producción con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



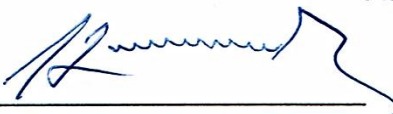
Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo
Asesor Principal



Dr. Julián Cerano Paredes
Asesor



M.C. Salvador Valencia Manzo
Asesor



Dr. Alejandro Zermeño González
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Junio 2021

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida y conocimiento, para permitirme culminar esta meta importante en mi vida.

A mi “Alma Terra Mater” la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada y hacer posible mis estudios de Maestría.

A los asesores del presente trabajo, Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo, Dr. Julián Cerano Paredes, M.C. Salvador Valencia Manzo y Dr. Alejandro Zermeño González, con respeto, admiración y por darme la oportunidad de haber trabajado junto a ustedes; les agradezco haberme brindado sus asesorías, consejos y sugerencias para la elaboración del estudio.

A ECOS de La Tierra: Al Biól. Víctor Alonso Gómez López e Ing. Gerardo Molina, por haberme facilitado establecer las relaciones con los Ejidos Rosendo Salazar y San Isidro Chichihuistan y acompañado en el levantamiento de muestras para realizar el trabajo de campo de esta esta investigación.

Al Ing. Roberto del Carmen García Cancino por facilitarme establecer las relaciones con el Ejido Ojo de Agua para realizar el trabajo.

A los ejidos Rosendo Salazar, Ojo de Agua y San Isidro Chichihuistan por haberme permitido obtener los datos del presente trabajo.

El presente estudio forma parte del proyecto “Estudios dendrocronológicos en las Sierras Madre Occidental, Oriental y del Sur de México”, con clave: 38111-4251030012346 de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

DEDICATORIA

A mi madre **Esperanza Hernández Suchiapa** por darme la vida, el apoyo incondicional, las enseñanzas y por los sabios consejos para lograr el éxito en cada uno de mis proyectos, te amo.

A mis hermanos **Martha** y **Cristian Antonio López Hernández** por el cariño incondicional y el apoyo en todo momento, los amo.

A mi sobrina **Renata Nazareth García López** por alegrar mi vida.

A mi abuelita **Nicolasa Suchiapa Tóala** (†) por ser una persona especial en mi vida, por haberme motivado a cumplir mis metas y por confiar en mí.

A mi abuelito **Alejandro Hernández Nango** por su cariño y apoyo durante los momentos difíciles y alegres de mi vida.

A toda mi familia, por sus palabras de aliento y sus buenos deseos, especialmente a mis tíos **Erminio Hernández y Yaritza Ayala**.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
Objetivos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
Registros proxy	3
Generalidades de la dendrocronología	3
Dendroclimatología	4
Anillos de crecimiento	4
Madera temprana	4
Madera tardía	5
Anillo falso	5
Generalidades de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede	5
III.CAPÍTULO 1: RESPUESTA CLIMÁTICA DE <i>Pinus oocarpa</i> Schiede AL SUROESTE Y SURESTE DE CHIAPAS.....	6
Resumen	7
Abstract.....	9
INTRODUCCIÓN	11
Objetivos:	14
Hipótesis:.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
Descripción del área de estudio	16
Localización geográfica	16
Hidrología	17
Geología	17

Edafología.....	18
Clima	18
Vegetación.....	21
Trabajo de campo	21
Diseño de muestreo.....	21
Colecta y extracción de muestras.....	21
Etapa de laboratorio	22
Análisis dendrocronológico.....	23
Pre – fechado de crecimientos anuales	23
Anillos falsos.....	23
Medición de los anillos anuales	24
Verificación del fechado y generación de cronologías	24
Obtención de datos climáticos	25
Análisis estadístico.....	26
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
Fechado	27
Respuesta del crecimiento de <i>P. oocarpa</i> a la precipitación	29
Respuesta del crecimiento de <i>P. oocarpa</i> a la temperatura mínima	41
Respuesta del crecimiento de <i>P. oocarpa</i> a la temperatura máxima	51
CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS	65
IV.CAPÍTULO 2: POTENCIAL DENDROCLIMÁTICO DE <i>Pinus oocarpa</i> Schiede EN EL EJIDO SAN ISIDRO CHICHIHUISTAN, TEOPISCA, CHIAPAS	72
Resumen	73
Abstract.....	75

INTRODUCCIÓN	77
Objetivo	79
Hipótesis.....	80
MATERIALES Y MÉTODOS.....	81
Descripción del área de estudio	81
Localización geográfica	81
Hidrología	81
Geología	82
Edafología.....	82
Clima	82
Vegetación.....	83
Trabajo de campo	83
Diseño de muestreo.....	83
Colecta y extracción de muestras.....	84
Etapa de laboratorio	84
Análisis dendrocronológico.....	85
Pre – fechado de crecimientos anuales	85
Medición de los anillos anuales	85
Verificación del fechado y generación de cronologías	85
Obtención de datos climáticos	86
Análisis estadístico.....	88
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
Fechado	89
Respuesta del crecimiento de <i>P. oocarpa</i> a la precipitación	91
Respuesta del crecimiento de <i>P. oocarpa</i> a la temperatura mínima	97

Respuesta del crecimiento de <i>P. oocarpa</i> a la temperatura máxima	104
CONCLUSIONES	109
REFERENCIAS	110
V. DISCUSIÓN GENERAL	115
VI. CONCLUSIÓN GENERAL.....	117
VII. REFERENCIAS GENERALES	119

ÍNDICE DE CUADROS DEL CAPÍTULO UNO

Cuadro 1. Descripción de los climas que ocurren en los sitios de las dos áreas de estudio con <i>Pinus oocarpa</i> Schiede en el estado de Chiapas.	19
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas empleadas para el análisis dendroclimático de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, en el estado de Chiapas.	25
Cuadro 3. Parámetros estadísticos de cronologías desarrolladas con base en crecimientos de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede.	28
Cuadro 4. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la precipitación de enero a noviembre, julio a octubre y los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede., en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.	32
Cuadro 5. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la precipitación de primavera, julio a octubre y los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede., en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.	36
Cuadro 6. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la temperatura mínima de primavera, marzo a agosto con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede., en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.	44
Cuadro 7. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la temperatura mínima de primavera y febrero a mayo con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera	

tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede., en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.....	48
Cuadro 8. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R ²) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre temperatura máxima de primavera y julio a octubre con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede., en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.	54
Cuadro 9. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R ²) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la temperatura máxima de enero a diciembre, julio a octubre, con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.....	58

ÍNDICE DE CUADROS DEL CAPÍTULO DOS

Cuadro 1. Descripción de la fórmula climática que ocurre en el Ejido de San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.....	82
Cuadro 2. Estaciones meteorológicas empleadas para el análisis dendroclimatológico de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, en el estado de Chiapas...	87
Cuadro 3. Parámetros estadísticos de cronologías estudiadas en trabajos previos y el presente realizado en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.	90
Cuadro 4. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la precipitación de enero a marzo y los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.....	93
Cuadro 5. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la temperatura mínima promedio del periodo de primavera, enero a diciembre y los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.	100
Cuadro 6. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre temperatura máxima de enero a diciembre con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede., en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO UNO

- Figura 1.** Ubicación geográfica de las dos áreas de *Pinus oocarpa* Schiede en el estado de Chiapas y las estaciones climatológicas consideradas para el análisis dendroclimático..... 16
- Figura 2.** Climogramas generados para los sitios de estudio de *Pinus oocarpa* Schiede A) Rosendo Salazar, Cintalapa y B) Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas 20
- Figura 3.** Extracción de virutas de *Pinus oocarpa* Schiede, en suroeste y sureste del estado de Chiapas, empleando el taladro de Pressler. A la izquierda, medición del diámetro normal y a la derecha, la extracción de una viruta.... 22
- Figura 4** Muestras de *Pinus oocarpa* Schiede en el proceso de lijado en el Laboratorio de Ingeniería Forestal del Departamento Forestal, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila. 23
- Figura 5.** Coeficientes de correlación entre la precipitación mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1986 a 2016), enero a noviembre (de 1962 a 1993) y julio a octubre (de 1964 a 2007) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$)..... 30
- Figura 6.** Correlación de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la precipitación mensual en los periodos de enero a noviembre y de julio a octubre en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas. 33
- Figura 7.** Coeficientes de correlación entre la precipitación mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1961 a 2004) y julio a octubre (de 1961 a 1982) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones

significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).....	35
Figura 8. Correlaciones de las maderas, temprana y tardía de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede y la precipitación mensual en los periodos de primavera y de julio a octubre en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.....	37
Figura 9. Coeficientes de correlación entre la temperatura mínima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1973 a 2005) y marzo a agosto (de 1964 a 2005) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para <i>Pinus oocarpa</i> Schiede en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).	42
Figura 10. Correlaciones de las maderas, temprana y tardía de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede y la temperatura mínima en los periodos de primavera y de marzo a agosto en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.....	45
Figura 11. Coeficientes de correlación entre la temperatura mínima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1961 a 2004) y de febrero a mayo (de 1961 a 1990) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para <i>Pinus oocarpa</i> Schiede en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).	47
Figura 12. Correlación de la madera temprana de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede y la temperatura mínima en el periodo de febrero a mayo en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.	49
Figura 13. Coeficientes de correlación entre la temperatura máxima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1978 a 2010), marzo a agosto (de 1979 a 2009) y julio a octubre (de 1978 a 2010) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para <i>Pinus oocarpa</i> Schiede en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.	

(*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$)..... 53

Figura 14. Correlación de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura máxima en el periodo de primavera en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas. 55

Figura 15. Coeficientes de correlación entre la temperatura máxima mensual, para los periodos de primavera (Prim; de 1961 a 1990), julio a octubre (de 1961 a 1996) y enero a diciembre (de 1961 a 1987) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$)..... 57

Figura 16. Correlaciones del anillo total y la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura máxima en los periodos de enero a diciembre y de julio a octubre en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas 59

ÍNDICE DE FIGURAS DEL CAPÍTULO DOS

- Figura 1.** Ubicación geográfica del área de muestreo de *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas y las estaciones climatológicas consideradas para el análisis dendroclimático. 81
- Figura 2.** Climograma generado para la región de estudio de San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas..... 83
- Figura 3.** Extracción de núcleos de crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede, en el centro del estado de Chiapas, empleando el taladro de Pressler..... 84
- Figura 4.** Muestras de *Pinus oocarpa* Schiede en el proceso de lijado en el Laboratorio de Ingeniería Forestal del Departamento Forestal, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila. 85
- Figura 5.** Coeficientes de correlación entre la precipitación mensual, para los periodos de primavera (Prim; de 1957 a 2014) y enero a marzo (de 1946 a 2014) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$). 92
- Figura 6.** Correlación del anillo total y la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la precipitación mensual en los periodos de primavera y de enero a marzo, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas..... 94
- Figura 7.** Coeficientes de correlación entre la temperatura mínima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1946 a 2001) y enero a diciembre (de 1946 a 2001) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$). 98

Figura 8. Correlación de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura mínima mensual en los periodos de primavera y de enero a diciembre, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. 101

Figura 9. Coeficientes de correlación entre la temperatura máxima mensual, para los periodos de primavera (Prim; de 1946 a 2002) y enero a diciembre (de 1946 a 2002) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$). 105

Figura 10. Correlación de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura máxima en el periodo de enero a diciembre en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas..... 107

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

México por su ubicación geográfica tiene climas que van desde los cálidos hasta los fríos con una alta variación topográfica, presencia de mares y diferentes usos del suelo. Para realizar análisis del clima, es preciso conocer de la interacción atmósfera-océano-orografía y suelo (Magaña, Pérez, Conde, Gay y Medina, 1997).

Los problemas principales que se enfrentan para realizar estudios de la variabilidad en el clima, es la escasez de registros instrumentales; México cuenta con zonas geográficas no cubiertas y son muy pocas las estaciones meteorológicas con registros previos a 1940; con la dendroclimatología es posible reconstruir la variabilidad climática mediante modelos de regresión entre los índices de crecimiento anual de ciertas especies de plantas y los factores climáticos (González, 2003).

Las cronologías de anillos de árboles dan a conocer las complejas condiciones climáticas ambientales a las que fue expuesto el árbol. Aunque estas condiciones también incluyen efectos no climáticos, tales como disturbios por cambios de uso del suelo, incendios y ataque de insectos (Cook, 1987). Una mejor respuesta climática, se puede obtener de árboles que han sido sujetos al mínimo disturbio y ubicados en sitios donde la humedad del suelo es el factor que limita su crecimiento (Fritts, 1976).

En México los estudios dendrocronológicos son cada vez más comunes, especialmente en bosques de coníferas del género *Pinus* (Stahle *et al.*, 2000). Se han encontrado diferencias entre el crecimiento de algunas especies que crecen en el norte, centro y sur de México y el periodo de respuesta climática (Therrell, Stahle, Cleveland y Villanueva-Díaz, 2002).

Por ejemplo Huante, Rincón y Swetnam (1991) encontraron que la precipitación que más influye en el índice de anillo total de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. &

Cham en Michoacán, es el periodo de primavera (de marzo a mayo) con una correlación de $r = 0.65$ ($p < 0.01$). Constante, Villanueva, Cerano, Cornejo y Valencia (2009) encontraron que el índice de anillo total de *Pinus cembroides* Zucc. al sureste de Coahuila, tiene relación con la precipitación del periodo de invierno a primavera. Cortés-Cortés *et al.* (2021) reportan que es posible reconstruir la precipitación de primavera y la temperatura máxima de mayo a julio con base en los índices de anillo total ($r = 0.66$; $p < 0.01$) y madera tardía ($r = 0.35$; $p < 0.01$) de *Pinus montezumae* Lamb., en Guerrero.

Para el caso de *Pinus oocarpa* Schiede, Gutiérrez (2014) encontró que la precipitación de invierno a primavera tiene influencia positiva en el anillo total para la región de Los Tuxtlas, Veracruz. López-Hernández *et al.* (2018) encontraron una correlación significativa ($r = 0.71$; $p < 0.05$) entre el índice de madera temprana de *P. oocarpa* y la lluvia acumulada del periodo de primavera en Chiapas.

El crecimiento radial de *P. oocarpa* tienen potencial dendrocronológico para reconstruir las variables climáticas (Gutiérrez ,2014; Villanueva-Díaz *et al.*, 2018; López-Hernández *et al.*, 2018). Su amplia distribución, puede representar una alternativa para desarrollar una red de cronologías y analizar la variabilidad climática a nivel local y regional del estado de Chiapas.

Los objetivos generales del presente trabajo fueron:

Objetivos

- Incrementar el número de series dendrocronológicas con base en los crecimientos anuales de *Pinus oocarpa* Schiede, que permitan analizar la variabilidad climática en una mayor escala geográfica en el estado de Chiapas.
- Determinar el potencial dendrocronológico *P. oocarpa* para reconstruir la precipitación y las temperaturas máxima y mínima en los ejidos Rosendo Salazar, municipio de Cintalapa, San Isidro Chichihuistan, municipio de Teopisca y Ojo de Agua, municipio de La Independencia, en el estado de Chiapas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Registros proxy

Los registros proxy son sistemas naturales que dependen del clima, que estuvieron en el pasado y aún existen, por lo que permiten derivar información paleoclimática, dichos registros contienen una señal climática, la cual puede ser débil o contener ruido por aspectos biológicos o meteorológicos. Existen diversos tipos de archivos de registros proxy, entre los más importantes se encuentran los sedimentos y suelos, hielo, corales, archivos históricos, análisis de polen y anillos de crecimiento de árboles (Bradley, 1999).

Generalidades de la dendrocronología

La dendrocronología que puede ser ciencia, técnica o herramienta ha sido utilizada para datar o fechar (determinar la edad) los árboles (Speer, 2010), el cual inició a usarse a principio del siglo XX con los trabajos pioneros del astrónomo Andrew Allicott Douglass, que se encontraba interesado en la naturaliza cíclica de la actividad solar (manchas solares) y su relación con el clima terrestre con una visión de los anillos de crecimiento de los árboles (Fritts, 1976), dicho método, lo usó para estudiar árboles de *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson con edad promedio de casi 350 años (Douglass, 1914).

La dendrocronología como una disciplina, se ha aplicado para estudiar los cambios ambientales del pasado analizando los anillos de crecimiento anual de los árboles, basándose que el crecimiento radial de las especies leñosas es rítmico y de forma anual de acuerdo a condiciones ambientales determinadas por las estaciones del año (Stokes y Smiley, 1996).

Se han desarrollado muchos subcampos de la dendrocronología, manteniendo la base de la palabra “dendro” y añadiendo un prefijo secundario para describir el campo específico que se estudia, por mencionar algunos: dendrohidrología, dendroecología, dendroarqueología, dendropirocronología, dendroentomología, dendrosismología, dendroglaciología, dendroclimatología (Speer, 2010).

Dendroclimatología

El estudio del clima pasado mediante los anillos de crecimiento de los árboles se denomina dendroclimatología (Kaennel & Schweingruber 1995, Luckman 2007). Con esta ciencia es posible reconstruir el clima mediante modelos de regresión gracias a la relación que existe entre los índices de crecimiento anual y los factores climáticos (González, 2003).

Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento de los árboles son el resultado de un crecimiento anual que inicia en primavera y culmina en verano u otoño, por lo que, un anillo de crecimiento se presenta cada año, éstos contienen información acerca del conjunto de factores ambientales que influyen sobre la dinámica y evolución de los bosques; dichos factores pueden ser externos (agua, temperatura, luz, dióxido de carbono, oxígeno y sales minerales) así como, en internos (cantidad de nutrientes disponibles, minerales, reguladores de crecimiento, enzimas y agua) (Fritts, 1976).

El anillo anual de crecimiento del xilema se forma al exterior del que se formó en el año anterior. Este se divide en dos porciones conocidas como madera temprana y madera tardía (Villanueva *et al.*, 2004).

Madera temprana

En las coníferas o gimnospermas la madera temprana es de coloración clara y ocurre al inicio del periodo vegetativo época en que los árboles reinician su actividad (primavera) después del periodo de letargo. A la vez presentan paredes celulares delgadas y son más grandes (Gutiérrez, 2009). Además, su función principal es la conducción de agua, savia y nutrientes desde las raíces hasta las hojas (Giménez, Moglia, Hernández y Gerez, 2000).

Madera tardía

Por el contrario, la madera tardía es más oscura y está formada por células más pequeñas de paredes celulares más gruesas. Su función principal es la sustentación (Giménez *et al.* 2000).

Anillo falso

Un anillo falso es aquel que no se termina de formar, principalmente estos anillos ocurren por fuertes heladas, caída de hojas, defoliación y fluctuaciones climáticas. Por lo regular se presentan en la madera temprana o de primavera (Giménez *et al.* 2000).

Generalidades de *Pinus oocarpa* Schiede

P. oocarpa es un pino con fascículos de 4-5 acículas, en su hábitat natural, alcanza una altura de 20 a 30 m (Denevan, 1961). En México, tiene distribución en las Sierras Madre Oriental y Occidental, así como al sur del Eje Neovolcánico (Challenger, 1998). Económicamente, en México es muy importante como madera aserrada y material de combustible (Zamora, 1981) y en Chiapas también se ha utilizado en plantaciones (Gutiérrez *et al.*, 2010).

**III. CAPÍTULO 1: RESPUESTA CLIMÁTICA DE *Pinus oocarpa*
Schiede AL SUROESTE Y SURESTE DE CHIAPAS**

Resumen

RESPUESTA CLIMÁTICA DE *Pinus oocarpa* Schiede AL SUROESTE Y
SURESTE DE CHIAPAS

POR:

MARÍA ISABEL LÓPEZ-HERNÁNDEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ELADIO HERIBERTO CORNEJO OVIEDO – ASESOR

Saltillo, Coahuila

Junio 2021

El objetivo de este estudio fue determinar el potencial dendrocronológico de *Pinus oocarpa* Schiede para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en los ejidos Rosendo Salazar (RS) y Ojo de Agua (OA) en el estado de Chiapas. Se extrajeron 80 y 70 muestras de virutas en RS y OA, respectivamente, para analizarse mediante técnicas dendrocronológicas; se fecharon el 54 y 43 % de esas muestras, respectivamente. Se generó un promedio mensual regional de precipitación y temperatura para RS de 1962-2016 y para OA de 1961-2004 que se correlacionaron con el anillo total y las maderas, temprana y tardía. El programa COFECHA indicó una correlación entre series de $r = 0.50$ ($p < 0.01$) para RS y $r = 0.41$ ($p < 0.01$) para OA. Se generaron dos cronologías, estándar y residual, para los tres índices de anillo. El análisis de función de respuesta indicó que en RS se puede reconstruir la precipitación de enero a noviembre ($r = 0.55$, $p < 0.01$) y la temperatura máxima de primavera ($r = 0.52$, $p < 0.05$) con base en la madera tardía mientras que la temperatura mínima de primavera ($r = 0.38$, $p < 0.05$) con base en la madera temprana. En OA se puede reconstruir la precipitación de primavera ($r = 0.71$, $p < 0.01$), la temperatura mínima de febrero a marzo ($r = 0.81$, $p < 0.01$) ambas con base a la madera temprana y la temperatura máxima de enero a diciembre ($r = -0.75$, $p < 0.01$) con base a la madera tardía.

Palabras claves: *Pinus oocarpa*, precipitación, temperatura, potencial dendrocronológico.

Abstract

CLIMATIC RESPOND OF *Pinus oocarpa* Schiede FROM SOUTHWEST AND
SOUTHEAST CHIAPAS

BY

MARÍA ISABEL LÓPEZ HERNÁNDEZ

MASTERS IN SCIENCE IN ENGINEERING OF PRODUCTION SYSTEMS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ELADIO HERIBERTO CORNEJO OVIEDO – ADVISER

Saltillo, Coahuila

June 2021

The objective of this study was to determine the dendrochronological potential of *Pinus oocarpa* Schiede to reconstruct rainfall and minimum and maximum temperatures at two ejidos in the state of Chiapas, Rosendo Salazar (RS) and Ojo de Agua (OA). A total of 80 and 70 increment bored samples were collected from RS and OA, respectively, and were used for dendrochronological study. Dated samples represented 54 and 43 % of the total samples from RS and OA, respectively. Regional averages monthly rainfall and temperatures were estimated from 1926 to 2016 for RS and from 1961 to 2004 for OA. Response function analysis between growth rates and climate data was conducted. The COFECHA program indicated a highly significant correlation $r = 0.50$ ($p < 0.01$) between series. Two chronologies, standard and residual, were generated for each of the three growth rates (total ring, early and latewood). The response function analysis showed that it is possible to reconstruct the rainfall from January to November ($r=0.55$, $p < 0.01$) and the maximum spring temperature ($r= 0.52$, $p < 0.05$) with the latewood while the minimum spring temperature correlated ($r=0.38$, $p < 0.05$) with the earlywood at RS. Similarly, the response function analysis indicated that it is possible to reconstruct the spring rainfall ($r = 0.71$, $p < 0.01$) and the minimum temperature from February to March ($r=0.81$, $p < 0.01$) with the earlywood while the maximum temperatures from January to December correlated ($r=-0.75$, $p < 0.01$) with the latewood at OA.

Key words: *Pinus oocarpa*, rainfall, temperature, radial growth, dendrochronological potential

INTRODUCCIÓN

La gran amplitud altitudinal de México, su ubicación a ambos lados del Trópico de Cáncer y la influencia oceánica debida a la estrechez de la masa continental, son los factores determinantes más significativos del clima que prevalece en el país y de su diversidad (Rzedowski, 2006).

El Trópico de Cáncer, además de ser una línea significativa desde el punto de vista térmico, marca también en forma aproximada la franja de transición entre el clima árido y semiárido de la zona anticiclónica de altas presiones, que se presenta hacia el norte y el clima húmedo y semihúmedo influenciado por los vientos alisios y por los ciclones hacia el sur (Rzedowski, 2006).

La compleja fisiografía de México, su variedad climática y su ubicación geográfica permiten el desarrollo de una gran variedad de tipos de vegetación, como las selvas, bosques templados y matorrales xerófilos, pastizales, vegetación hidrófila y praderas de alta montaña, entre otros (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2003a).

Los registros naturales en diversas escalas geológicas se constituyen como la principal fuente de información climática y brindan evidencias de las condiciones climáticas en el pasado, además, proveen información sobre cambios en la atmósfera, océano, criósfera, biósfera y en la dinámica de la interacción entre ellos (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2017).

Las reconstrucciones climáticas que usan anillos de crecimiento son una herramienta útil para conocer la variación climática pasada y posibles causas de las actuales variaciones climáticas, ya que permiten el análisis de los cambios desde una perspectiva temporal más amplia (Solomon *et al.*, 2007; Ballesteros-Barrera y Rodríguez Ramírez, 2011).

La República Mexicana, debido a su riqueza en biodiversidad, posee un sinnúmero de especies con potencial dendrocronológico conocido, pero en el que todavía no se ha explorado el potencial que tienen muchas otras especies distribuidas tanto en las zonas templadas como en las tropicales (Villanueva *et al.*, 2004).

La dendrocronología se basa en el estudio del crecimiento radial de las especies leñosas que dependen de las condiciones ambientales anuales, determinadas por las estaciones del año en las regiones templadas donde existe una estación marcada de crecimiento; los árboles, generalmente, producen un anillo anual de crecimiento que registran las condiciones climáticas de ese año, por lo que es posible lograr fechar años individuales con seguridad y obtener un registro continuo (Fritts, 1976).

En las especies que se desarrollan en ambientes tropicales e intertropicales el patrón de actividad cambial difiere considerablemente al de las especies de regiones templadas; los árboles, usualmente en condiciones tropicales e intertropicales, no presentan anillos de crecimiento distintivos y el cambium vascular permanece activo todo el año o gran parte de éste (Dave y Rao, 1982; Borchert, 1999).

El interés por estudios dendrocronológicos en México ha aumentado en los últimos años. Se han encontrado diferencias entre el crecimiento de algunas especies (al norte, centro y sur) y el periodo de respuesta climática (Therrell *et al.*, 2002). Esto ha sido corroborado por diversos estudios, por ejemplo, para el norte de México, Constante *et al.* (2009) encontraron que el índice de anillo total de *Pinus cembroides* Zucc. al sureste de Coahuila, tiene relación con la precipitación del periodo de invierno a primavera, con base en ello los citados autores lograron reconstruir la precipitación para 410 años.

Díaz-Ramírez, Villanueva-Díaz y Cerano-Paredes (2016) encontraron que la madera temprana de *Pinus durangensis* en Pueblo Nuevo, Durango, tiene excelente potencial dendrocronológico y responde a la precipitación acumulada promedio del periodo de enero a agosto. González (2019) encontró que el anillo total de *Pinus pseudostrobus* Lindl en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey y la precipitación responde significativamente ($p < 0.05$) al periodo de invierno a primavera, la temperatura mínima responde significativamente ($p < 0.05$) en los meses de noviembre a diciembre ($r = 0.27$ y 0.25 , respectivamente).

Los estudios realizados en el centro de México reportan resultados un poco diferentes, Huante *et al.* (1991) encontraron que la precipitación que más influye en el índice de anillo total de *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham., en Michoacán es la del periodo de primavera (de marzo a mayo); los autores reportan una correlación de $r = 0.65$, significativa ($p < 0.05$), mientras que para la temperatura máxima de otoño reportan una relación negativa y altamente significativa ($r = -0.719$; $p < 0.01$).

Marlés *et al.* (2015) encontraron que los tres índices de anillo de *P. pseudostrobus* en Michoacán tiene relación positiva con el aumento de precipitación en el mes de abril del año actual; y una relación negativa con el aumento de temperatura máxima media en el mes de agosto del año previo. Sin embargo, no observaron relación entre la temperatura media y con el promedio de la temperatura mínima.

Para el sur de México los estudios realizados hasta la fecha son relativamente escasos y reportan resultados similares a la respuesta a la precipitación que se tiene en algunas partes del centro y norte de México, por ejemplo, Gutiérrez (2014) encontró que la precipitación de invierno a primavera tiene influencia positiva en el anillo total de *P. oocarpa* en Los Tuxtlas, Veracruz, siendo las correlaciones máximas en los meses de diciembre, enero y junio ($r = 0.36$, 0.38 y 0.46 , respectivamente).

López-Hernández *et al.* (2018) al analizar la respuesta del crecimiento a las variables climáticas desarrollaron una cronología de 91 años encontrando correlaciones significativas ($r = 0.71$; $p < 0.05$) con el índice de madera temprana de *P. oocarpa*, en Chiapas y la lluvia acumulada durante el periodo de primavera.

Cortés-Cortés *et al.* (2021) al analizar la respuesta del crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb en Guerrero desarrollaron una cronología de 228 años y reportan que es posible reconstruir la precipitación de primavera y la temperatura máxima de mayo a julio con base en los índices de anillo total ($r = 0.66$; $p < 0.01$) y madera tardía ($r = 0.35$; $p < 0.01$), respectivamente.

Para México y Centroamérica, se reportan 47 especies de *Pinus* (Perry, Graham y Richardson, 1998), lo que indica, que existen muchas especies por explorar y determinar su potencial, para estudios dendroclimáticos. Hastenrath (1963), Johnson (1980), Szenjner (2011), Gutiérrez (2014), Villanueva-Díaz *et al.* (2018) y López-Hernández *et al.* (2018) han realizado estudios analizando los crecimientos de *P. oocarpa*; los autores reportan que la especie presenta alta frecuencia de anillos falsos y potencial para estudios dendroclimáticos.

En México, *P. oocarpa* registra una distribución desde el norte hasta el sur del país (Martínez, 1992). A pesar de su amplia distribución existe escasa información de esta especie en estudios dendroclimáticos, *P. oocarpa* puede representar una alternativa para desarrollar una red de cronologías que permitan analizar la variabilidad climática a nivel local y regional.

El objetivo e hipótesis del presente trabajo fueron:

Objetivo:

- Determinar el potencial dendrocronológico de *Pinus oocarpa* Schiede para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en dos regiones, suroeste y sureste, del estado de Chiapas.

Hipótesis:

La hipótesis nula fue:

- Ho: El crecimiento del anillo total, de la madera temprana y de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede no tiene potencial para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en dos regiones, suroeste y sureste, del estado de Chiapas.

La hipótesis alterna fue:

- Ha: El crecimiento del anillo total, de la madera temprana y de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede tiene potencial para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en dos regiones, suroeste y sureste, del estado de Chiapas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Localización geográfica

El área de estudio incluye dos áreas de muestreo, la primera, se localiza al suroeste de Chiapas, en el Ejido Rosendo Salazar (RS), Cintalapa, entre las coordenadas $16^{\circ} 28' 18.78''$ latitud Norte y $94^{\circ} 0' 10.88''$ longitud Oeste, a una elevación de 714 msnm, colinda al Oeste con el estado de Oaxaca. La segunda área se ubica al sureste del estado, en el Ejido Ojo de Agua (OA), La Independencia, entre las coordenadas $16^{\circ} 09' 24.00''$ latitud Norte y $91^{\circ} 45' 29.00''$ longitud Oeste, a una elevación de 1527 msnm, colinda al noroeste con el Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. (Figura 1).

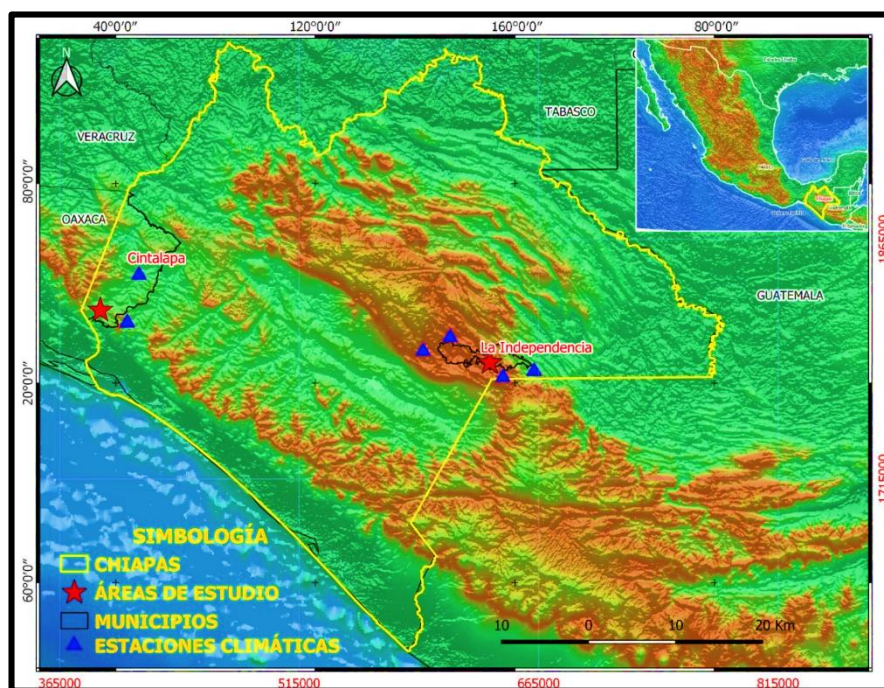


Figura 1. Ubicación geográfica de las dos áreas de *Pinus oocarpa* Schiede en el estado de Chiapas y las estaciones climatológicas consideradas para el análisis dendroclimático.

Hidrología

La región hidrológica que conforma el área de estudio de RS, es Grijalva-Usumacinta, que forma parte de la cuenca hidrológica Río Grijalva-Tuxtla Gutiérrez, la conforma la subcuenca Río Sayatenco-Cintalapa (INEGI, 2014a).

El Ejido OA se localiza en la región hidrológica Grijalva-Usumacinta, que conforma la cuenca hidrológica Río Lacantún, que a su vez la conforma la subcuenca Río Grande de Comitán. En el Ejido no se localizan corrientes permanentes, salvo aquellas que a causa del temporal de lluvias se forman de manera momentánea y desaparecen después de terminar el periodo de lluvia (INEGI, 2014a).

Geología

En RS el origen de las rocas es ígnea intrusiva (INEGI, 2003). Caracterizadas por ser rocas formadas en el interior de la corteza terrestre. Cuando un magma se enfría bajo la superficie lo hace más lentamente, permitiendo un mejor desarrollo de los cristales, que debido a eso alcanzan tamaños que pueden ser observados a simple vista, generalmente abarcan grandes extensiones de terreno y llegan a la superficie terrestre mediante procesos orogénicos (deformaciones tectónicas) o mediante procesos externos de erosión (Servicio Geológico Mexicano [SGM] 2017).

En el sitio OA se distribuyen rocas de origen sedimentario (INEGI, 2003). Se forman por la precipitación y acumulación de materia mineral de una solución o por la compactación de restos vegetales y/o animales que se consolidan en rocas duras. Los sedimentos son depositados, una capa sobre la otra, en la superficie de la litósfera a temperaturas y presiones relativamente bajas y pueden estar integrados por fragmentos de roca preexistentes de diferentes tamaños, minerales resistentes, restos de organismos y productos de reacciones químicas o de evaporación (SGM, 2017).

Edafología

Con base en la clasificación de la carta edafología para el estado de Chiapas, el tipo de suelo que presentan las áreas, RS y OA, es leptosol, que se caracteriza por suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Están asociados a sitios de compleja orografía. Estos suelos se encuentran en todos los tipos climáticos (secos, templados, húmedos) (INEGI, 2014b).

Clima

Con base en la clasificación de los tipos de climas de Köppen modificado por García (1998) para México y los climogramas generados, los tipos de climas presentes en el área de estudio RS y OA, Chiapas, son: AwZ (w) y (A) C (m), respectivamente (Cuadro 1; Figura 2).

Cuadro 1. Descripción de los climas que ocurren en los sitios de las dos áreas de estudio con *Pinus oocarpa* Schiede en el estado de Chiapas.

Sitio	Fórmula climática	Descripción
RS	AwZ(w)	Cálido subhúmedo, precipitación del mes más seco menor de 60 mm, lluvias de verano y sequía en invierno, % de lluvia invernal entre 5 y 10.2. Temperatura media anual de 22 a 26°C. Es el más húmedo cálido. El uso de la letra (w) indica la presencia de canícula, una pequeña temporada seca dentro de la propia estación lluviosa
OA	(A) C (m)	Semicálido húmedo, con lluvias intensas de verano que compensa la sequía de invierno; la precipitación del mes más seco inferior a los 60 mm, el % de lluvia invernal menor de 5. Temperatura media del mes más frío entre -3° y 19°C, temperatura media anual entre los 18 y 22° C.

RS= Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.

OA=Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.

Con base en los datos climáticos de las estaciones más cercanas a las áreas de estudio, en RS la precipitación anual en promedio es de 754 mm, mientras que en OA es de 1484 mm anuales, por lo que es mucho más húmedo OA que RS.

RS se caracteriza por ser muy caliente y seco, teniendo temperaturas máximas de 37°C, mientras que OA es menos caliente y mucho más húmedo teniendo la temperatura más alta a los 29°C (Figura 2). Las temperaturas mínimas que presentan los dos sitios son similares.

La precipitación mensual significativa inicia en el mes de mayo para los dos sitios, en RS representa el 6.77% y en OA el 8.26% de la precipitación total de cada sitio. El mayor porcentaje de lluvia en RS se encontró en el mes de junio con el 22.43% y en OA en el mes de septiembre con el 18.21% de la precipitación total. La disminución de precipitación comienza a declinar en octubre (Figura 2).

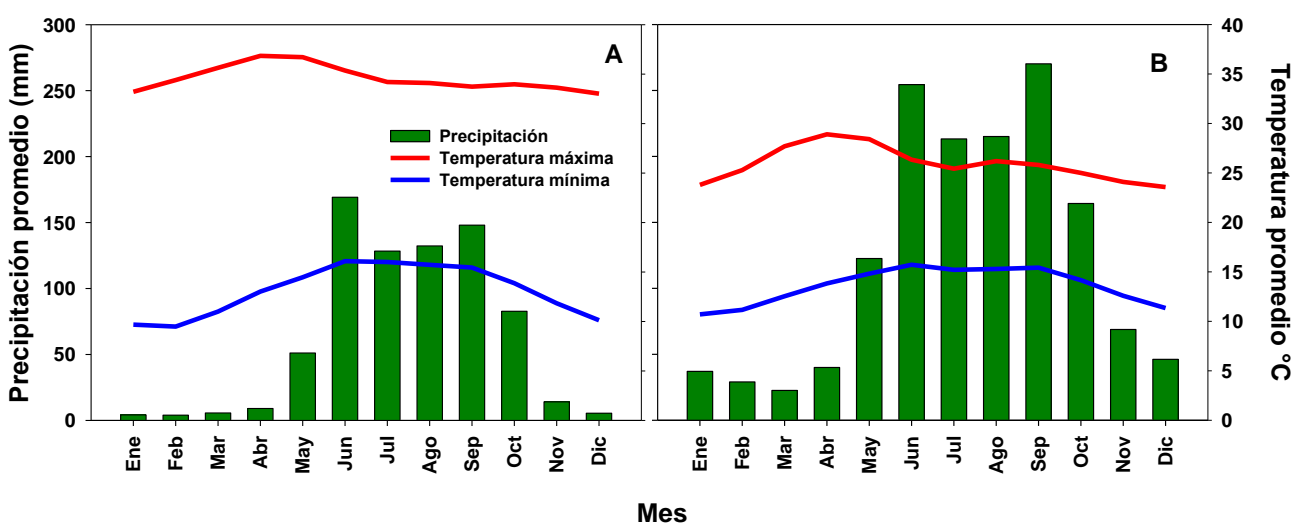


Figura 2. Climogramas generados para los sitios de estudio de *Pinus oocarpa* Schiede A) Rosendo Salazar, Cintalapa y B) Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.

Vegetación

La vegetación presente en RS es de un bosque de pino (INEGI, 2016) que se caracteriza por la morfología y la disposición de sus hojas, los pinos poseen una fisionomía particular y los bosques que forman presentan un aspecto difícilmente de confundir (Rzedowski, 2006). Las especies mexicanas de *Pinus* poseen afinidades hacia los climas templados y semihúmedos, y suelos ácidos, existen notables diferencias entre una especie y otra, algunas que no se ajustan a estas normas prosperan en lugares francamente calientes, en lugares húmedos, en los semiáridos, así como sobre suelos alcalinos (Rzedowski, 2006). En Chiapas, al igual que en la Sierra Madre del Sur, los pinares de *P. oocarpa* son los más difundidos y su amplitud altitudinal va de 300 a 3000 msnm (Rzedowski, 2006).

OA presenta una vegetación secundaria arbustiva de bosque pino-encino, bosque mesófilo de montaña y bosque de pino (INEGI, 2016). En la Sierra Madre del Sur *P. oocarpa* que es la especie más frecuente, pues la mayor parte de los pinares de esa zona se encuentran a menos de 2200 m de altitud, alternando y mezclándose con los bosques de encino y en colindancia con diferentes asociaciones del bosque mesófilo de montaña. Para el noroeste de Chiapas los extensos pinares se desarrollan sobre grandes y casi deshabitadas superficies de terrenos calizos que circundan por el sur y por el oeste la llamada Selva Lacandona (Miranda 1952; Rzedowski, 2006).

Trabajo de campo

Diseño de muestreo

El muestreo que se utilizó fue selectivo. Se seleccionaron 40 árboles en RS y 34 en OA, se seleccionaron los árboles más longevos y libres de daños mecánicos, plagas y enfermedades.

Colecta y extracción de muestras

La extracción de núcleos de crecimiento (virutas) se llevó a cabo en el periodo de junio 2019 y agosto 2020. A cada árbol seleccionado se le extrajeron dos

virutas a 1.30 m sobre el nivel del suelo (Figura 3). Las muestras se extrajeron con el apoyo del taladro de Pressler de diferentes longitudes con un diámetro de 5 mm.



Figura 3. Extracción de virutas de *Pinus oocarpa* Schiede, en suroeste y sureste del estado de Chiapas, empleando el taladro de Pressler. A la izquierda, medición del diámetro normal y a la derecha, la extracción de una viruta.

Etapa de laboratorio

Las muestras se prepararon para su análisis en el Laboratorio de Ingeniería Forestal del Departamento Forestal, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila. Las muestras se montaron en una moldura de madera, cuidando que las traqueidas estuvieran en posición vertical para tener una mejor apreciación de los anillos de crecimiento. Cada muestra se pegó con pegamento 850 y se ajustó a la moldura con cinta adhesiva. Posteriormente, las muestras se lijaron para resaltar las estructuras de crecimiento, utilizando lijas de las más gruesas (grano de 120) a las más finas (grano de 1,200) (Figura 4).



Figura 4 Muestras de *Pinus oocarpa* Schiede en el proceso de lijado en el Laboratorio de Ingeniería Forestal del Departamento Forestal, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila.

Análisis dendrocronológico

Pre – fechado de crecimientos anuales

El pre-fechado de las muestras se hizo en el Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA, INIFAP, Gómez Palacio, Durango. Primeramente, con el apoyo de un estereomicroscopio, se contaron los anillos en todas las muestras, con esto se determinó la edad aproximada de cada árbol. Finalmente, el pre-fechado se hizo mediante la técnica de Skeleton plots (gráficos de crecimiento) (Stokes y Smiley, 1996).

Anillos falsos

Para distinguir los anillos falsos, se siguieron las consideraciones de Stokes y Smiley (1996), entre los puntos más importantes fueron:

1. Frecuentemente, la madera tardía última en formarse en un anillo falso, no se delinea claramente o no presenta un cambio abrupto con la madera temprana, la madera tardía se mezcla con la madera temprana de color claro. Esta combinación gradual, es el contraste con el cambio abrupto de la madera tardía y la madera temprana en anillos normales, esta es la mejor característica para distinguir anillos falsos.

2. Si una sección transversal está disponible, un anillo que presente este problema puede seguirse alrededor de la circunferencia entera, si la madera tardía es de circunferencia discontinua, es un anillo falso.

3. En muestras con conductos de resina, comúnmente, se puede observar que la banda de madera tardía cruza el conducto, lo parte en dos, mientras la verdadera banda de la madera tardía rodea el conducto y lo incorpora en el anillo anual.

Medición de los anillos anuales

Una vez concluido el pre-fechado, se midió el crecimiento total anual, la longitud de madera temprana y la madera tardía para todas las muestras, para lo cual se empleó un sistema de medición Velmex con platina de fase deslizante y una precisión de 0.001 mm, misma que está conectada a una computadora. Para una mejor apreciación de los anillos de crecimiento se usó un estereoscopio con una retícula graduada que permite marcar el límite del anillo. Las bases de datos que se obtuvieron de esta medición se guardaron en la computadora para lo cual se usó el software Measure J2X.

Verificación del fechado y generación de cronologías

Los archivos generados de cada uno de los dos sitios de colecta se ingresaron al programa COFECHA, para verificar la calidad de fechado y su medición (Holmes, 1983). El programa analiza estadísticamente el fechado de cada serie correlacionando sucesivamente en segmentos de 50 años con traslapes de 25 años, compara cada serie individual con todas las muestras y con la serie promedio, con base en este procedimiento se identifican errores de anillos ausentes y falsos.

Una vez verificada la calidad del fechado y la medición con el programa COFECHA, se procedió a utilizar el programa ARSTAN para generar cronologías

a partir de las series de ancho de anillo (anillo total, madera temprana y madera tardía). Mediante dicho programa se estandariza cada serie individual, al remover la varianza debido a factores biológicos, como competencia y liberación, y geométricos (el área de fuste se incrementa con la edad y el crecimiento anual tiende a disminuir al distribuirse en una mayor superficie) no relacionadas con el clima (Cook, 1987).

El programa ARSTAN maximiza la varianza debida a factores ambientales que afecten a la población en conjunto (factores climáticos). Con el programa ARSTAN se generaron tres cronologías (Arstan, Estándar y Residual). Para cada serie individual se obtuvo un índice de crecimiento, al dividir el valor del ancho del anillo (madera temprana y madera tardía) entre el valor correspondiente de la curva; finalmente, se promediaron los índices anuales de las series individuales para producir la cronología del sitio. Para el caso del presente estudio se empleó la versión estándar y residual.

Obtención de datos climáticos

Para determinar la influencia de las variables climáticas en el crecimiento de *P. oocarpa*, se descargaron de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) los datos de clima (precipitación y temperaturas, mínimas y máximas) de dos de las estaciones meteorológicas más cercanas a RS y cuatro estaciones más cercanas al sitio OA (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas empleadas para el análisis dendroclimático de *Pinus oocarpa* Schiede, en el estado de Chiapas.

Sitio	ID	Estación	Longitud (Oeste)	Latitud (Norte)	Altitud (msnm)	Período de datos
Rosendo	7100	La Unión	93.80	16.66	580	1962-2016
Salazar	7233	Tiltepec	93.86	16.39	680	1977-1988
Ojo de	7025	Comitán	92.11	16.25	1596	1961-2004
Agua	7104	Margaritas	91.97	16.31	1512	1962-2004

7154	Santa Elena	91.96	16.32	560	1966-1990
7231	Tzisco	91.63	16.10	1475	1977-1996

Análisis estadístico

Se realizaron pruebas estadísticas de correlación de Pearson entre el índice de ancho de anillo y los datos climáticos para ambos sitios de estudio, esto con la finalidad de observar que variable climática (precipitación mensual, temperatura mínima y temperatura máxima) y qué periodo del año (mensual, bimensual, estacional o acumulado) influye más en el crecimiento de *P. oocarpa* en cada uno de los sitios.

En el programa Excel, se realizaron los análisis de correlación, este método consistió en correlacionar las cronologías (estándar y residual) de anillo total, madera temprana y madera tardía, con los registros climáticos (precipitación y temperaturas, mínima y máxima). Primeramente, se corrió un análisis a nivel mensual, se definieron los meses con mayor correlación, posteriormente, el período estacional que más influye en el crecimiento.

El análisis se realizó con variables climáticas del año previo (de julio a diciembre) y del año actual (de enero a diciembre) de crecimiento, debido a que el crecimiento de los árboles está influido por las condiciones climáticas del año previo y del año actual, es decir, se comprendió un período de análisis de 18 meses. Así mismo, estos análisis de correlación se verificaron y validaron estadísticamente ($p < 0.05$) utilizando el programa STATISTICA Kernel Release 5.5 (Stat Soft Inc., 2000). Finalmente, se corrieron modelos de regresión y se determinó la cronología más apropiada para ser empleada como proxy para reconstruir una variable climática en específico, esto con base a que, dicha cronología explica la mayor variabilidad de determinada variable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fechado

De un total de 80 virutas de 40 árboles de *P. oocarpa* colectados en RS, se fecharon 43 muestras de 32 árboles, mientras que para OA, de un total de 70 muestras de 34 árboles de *P. oocarpa*, se fecharon 30 muestras de 22 árboles. Lo anterior representa el 54 y 43% de las muestras, respectivamente; el resto de las muestras no se fecharon porque presentaron anillos falsos, seguramente atribuido a las condiciones climáticas y ecológicas de los sitios (precipitación, temperatura, competencia, liberaciones, entre otros). El éxito en el fechado de las muestras depende de las condiciones del sitio donde crecen los árboles y esto puede propiciar que el fechado de muestras varia de un 43 a un 90% (Villalba, 1990; Lara y Villalba, 1993; Fuentes y Patricio, 1995).

Para diferentes regiones (Guatemala, Veracruz, Jalisco y Chiapas), se ha reportado que *P. oocarpa* presenta anillos falsos, lo cual dificulta en diferente grado su fechado (Hastenrath, 1963; Johnson, 1980; Szejner, 2011; Gutiérrez, 2014; Villanueva-Díaz *et al.* 2018; López-Hernández *et al.* 2018). Giménez *et al.* (2005) mencionan que un anillo falso ocurre por fuertes heladas, caída de hojas, defoliación y fluctuaciones climáticas, y por lo regular, se presentan en la madera temprana o de primavera.

La canícula o sequía interestival intensa es el fenómeno que consiste en una disminución de precipitación durante el periodo de lluvia (Magaña, Amador y Medina, 1999). Hazlett (1986) reporta una disminución del crecimiento de *P. oocarpa* en el mes de agosto, lo cual atribuye a una disminución de precipitación inducido por la presencia de la canícula en ese mes. Szejner (2011) reporta que la canícula tiene la influencia en la formación de anillos falsos en *P. oocarpa*.

Con relación a los resultados de COFECHA de OA y RS, indicaron una correlación altamente significativa ($p < 0.01$) entre series ($r = 0.50$; $r = 0.41$, respectivamente) (Cuadro 3). Dado que el programa COFECHA establece para.

el exacto fechado y calidad de respuesta climática como mínima correlación significativa entre series de $r = 0.3281$ ($p < 0.01$) (Holmes, 1983). La sensibilidad media obtenida fue de 0.28 en OA y de 0.37 en RS. Los valores estadísticos obtenidos en estos dos sitios para fines dendrocronológicos fueron similares a los generados en esta misma especie por otros autores (Cuadro 3), por lo que la especie se considera con potencial dendrocronológico.

Cuadro 3. Parámetros estadísticos de cronologías desarrolladas con base en crecimientos de *Pinus oocarpa* Schiede.

Sitio	Longitud de la serie	Correlación (r)	Sensibilidad media	Autor
Pedernal, Guatemala	1811-2010	0.44	0.23	Szejner (2011)
Los Tuxtlas, Veracruz	1890-2008	0.60	0.24	Gutiérrez (2014)
La Primavera, Jalisco	1850-2014	0.50	0.32	Villanueva-Díaz <i>et al.</i> (2018)
Ojo de Agua, Chiapas	1925-2015	0.50	0.28	López <i>et al.</i> (2018)
Rosendo Salazar	1867-2019	0.41	0.37	Trabajo actual

Respuesta del crecimiento de *P. oocarpa* a la precipitación

La variable precipitación de los sitios RS y OA, no presenta una correlación significativa ($p > 0.05$), dado que las características ambientales y ecológicas no son las mismas en esos sitios (Figura 2). Aunado a lo anterior, los sitios se encuentran separados por 330 km de distancia. En OA la precipitación es más abundante, mientras que para RS la precipitación es menor y presenta altos valores de temperaturas máximas (Figura 2).

Con respecto a los análisis de correlación entre las cronologías, estándar y residual del sitio RS, con la precipitación promedio mensual para el periodo de 1962-2016, indicaron que la precipitación de septiembre del año anterior presenta correlaciones significativas ($p < 0.05$; Figura 5) con el anillo total, madera temprana y madera tardía, excepto en la cronología residual de madera tardía. La cronología estándar responde positivamente a la mayoría de los 18 meses (de julio a diciembre del año previo y de enero a diciembre del año actual) de precipitación, excepto por diciembre con el anillo total y la madera temprana (Figura 5). Para la cronología residual, agosto del año anterior y junio del año actual, se correlacionaron negativamente para las tres cronologías (Figura 5).

La cronología estándar presenta las correlaciones significativas ($p < 0.05$) más altas y positivas entre la precipitación mensual y la madera tardía (Figura 5). Esta misma cronología estándar, registra una correlación significativa ($p < 0.05$) entre la precipitación del periodo de primavera con el anillo total, madera temprana y tardía ($r = 0.35, 0.37$ y 0.36 , respectivamente). De manera similar, la cronología residual, presenta correlaciones significativas ($p < 0.05$) entre la precipitación de primavera con el anillo total, madera temprana y tardía ($r = 0.36, 0.38$ y 0.26 , respectivamente) (Figura 5).

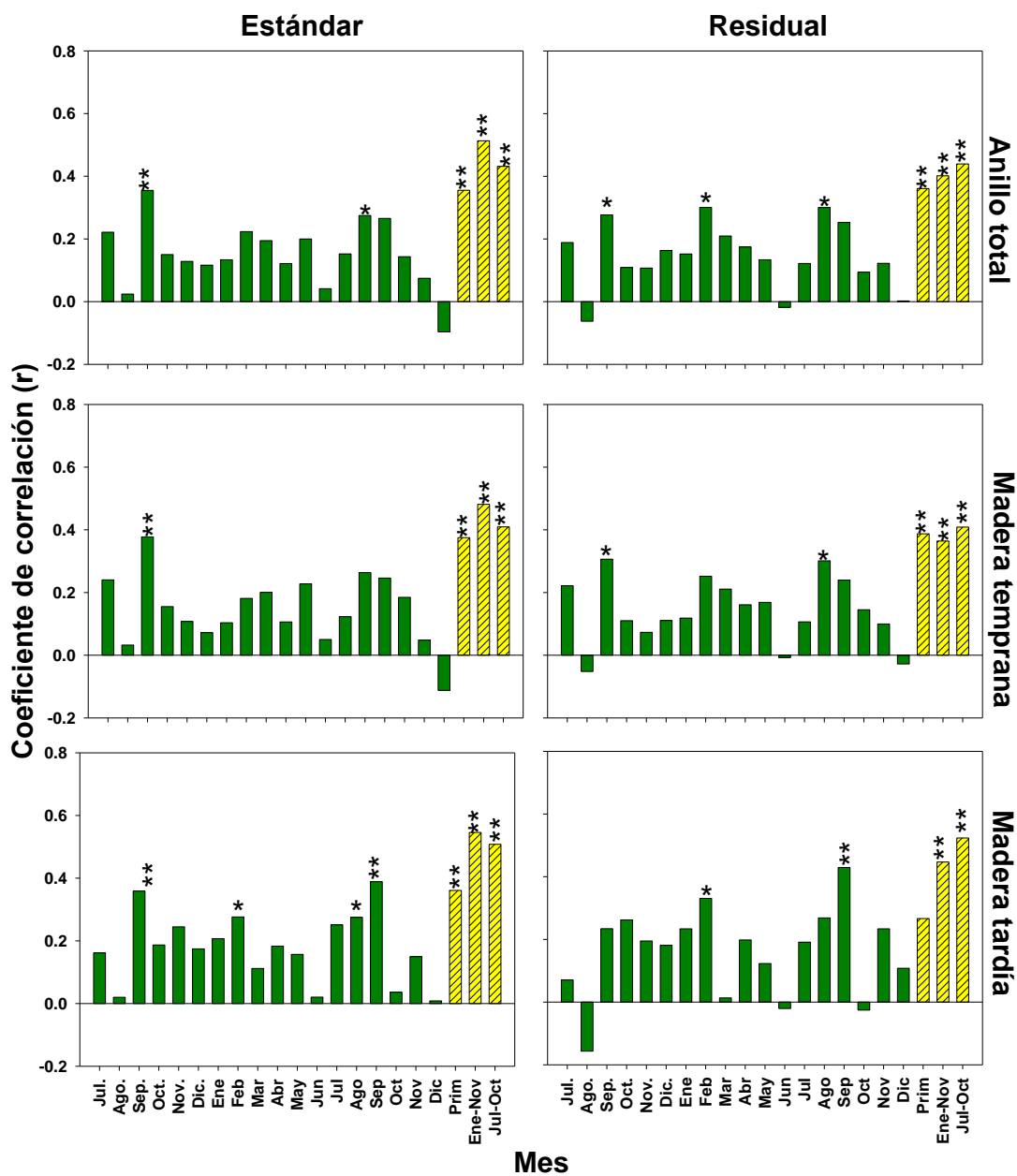


Figura 5. Coeficientes de correlación entre la precipitación mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1986 a 2016), enero a noviembre (de 1962 a 1993) y julio a octubre (de 1964 a 2007) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

En la cronología estándar se encontraron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre el periodo de precipitación de enero a noviembre en los tres índices de anillo ($r = 0.51, 0.48$ y 0.55 , respectivamente). Igualmente, en la cronología residual se encontraron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) en el citado periodo y el anillo total y las maderas, temprana y tardía ($r = 0.40, 0.36$ y 0.44 , respectivamente) (Figura 5; Cuadro 4).

En la cronología estándar se encontraron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre el periodo de lluvia de julio a octubre en anillo total, madera temprana y madera tardía ($r = 0.43, 0.40$ y 0.50 , en ese orden). En la cronología residual también se hallaron valores de correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$), en ese mismo periodo con los tres índices de anillo ($r = 0.44, 0.40$ y 0.52 , respectivamente; Figura 5; Cuadro 4).

En la cronología estándar en el sitio RS, uno de los periodos mensual de lluvia que influyó de manera altamente significativo ($p < 0.01$) en la madera tardía de *P. oocarpa* fue de enero a noviembre con una $r = 0.55$.

Cuadro 4. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la precipitación de enero a noviembre, julio a octubre y los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede., en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R^2		Pr>F	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
Precipitación enero-noviembre	Intercepto	14.75	23.43	0.51	0.40	0.26	0.16	<0.327	<0.162
	Anillo total	49.26	38.77					<0.004	<0.028
	Intercepto	19.67	28.42	0.48	0.36	0.23	0.13	<0.183	<0.084
	Madera temprana	44.86	34.11					<0.007	<0.048
	Intercepto	0.86	1.78	0.55	0.44	0.30	0.20	<0.962	<0.938
Precipitación julio-octubre	Madera tardía	64.20	61.90					<0.002	<0.013
	Intercepto	40.81	31.86	0.43	0.44	0.19	0.19	<0.104	<0.248
	Anillo total	75.55	82.30					<0.005	<0.004
	Intercepto	48.41	40.62	0.40	0.40	0.17	0.17	<0.046	<0.130
	Madera temprana	68.94	74.64					<0.008	<0.008
	Intercepto	8.14	-22.75	0.50	0.52	0.26	0.27	<0.779	<0.527
	Madera tardía	109.63	138.92					<0.001	<0.000

El periodo de julio a octubre muestra una correlación significativa ($r = 0.52$; $p < 0.05$) (Cuadro 4; Figura 6;). Lo anterior indica el potencial para generar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la precipitación anual o de verano para los últimos 153 años en el Ejido Rosendo Salazar.

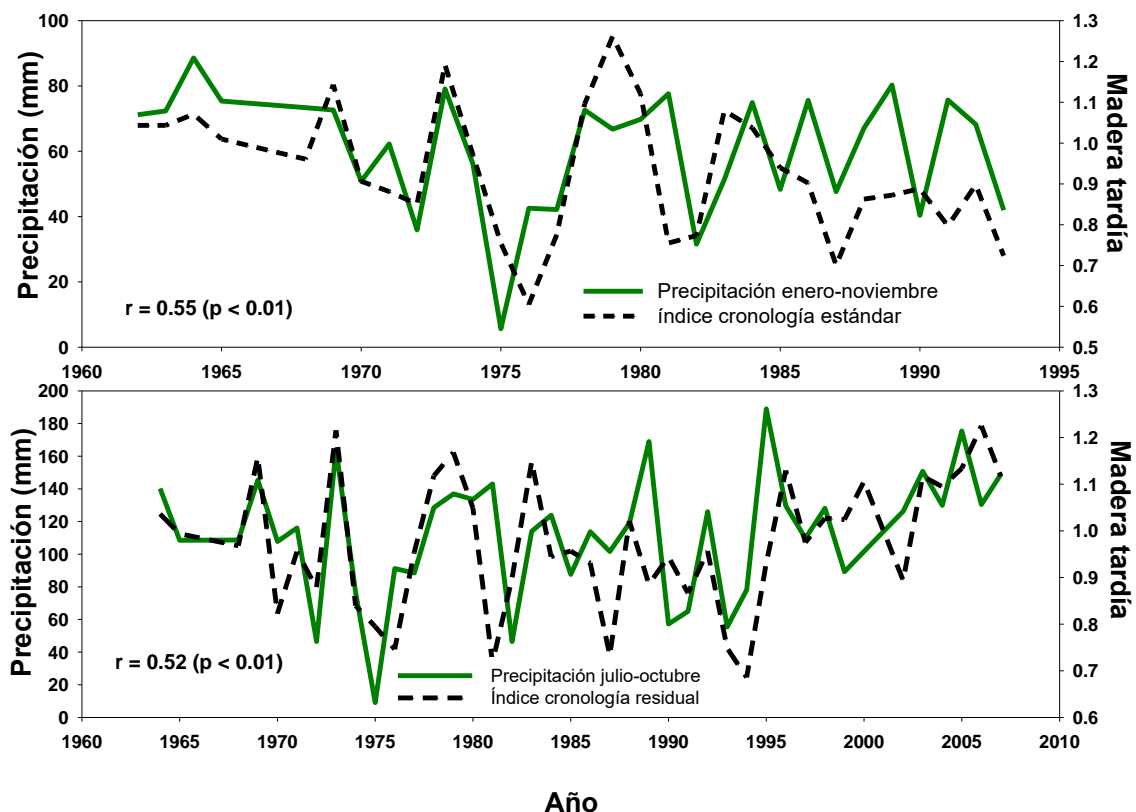


Figura 6. Correlación de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la precipitación mensual en los periodos de enero a noviembre y de julio a octubre en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.

Con relación al sitio OA, los análisis de correlación entre la cronología estándar, con los datos climáticos de la precipitación para el periodo de 1961 a 2004, indicaron que la precipitación promedio mensual muestra correlaciones positivas para las tres cronologías, excepto por el mes de julio en madera tardía que presenta una correlación negativa ($r = -0.0071$). La cronología residual arrojó una correlación negativa en julio para anillo total y madera temprana (Figura 7).

Para la cronología estándar, los meses de marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre en el índice de anillo total, presentan correlaciones significativas ($p < 0.05$); los meses de abril y mayo responden de manera altamente significativa ($p < 0.01$). En la cronología residual el mes de abril fue el que presentó la correlación más alta (Figura 7).

Para la cronología estándar, se determinaron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre la precipitación del periodo de primavera y las series de anillo total, la madera temprana y la madera tardía ($r = 0.70, 0.71$ y 0.53 , respectivamente). De manera similar, las tres series de índice de anillo total, la madera temprana y madera tardía de la cronología residual, muestran correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) ($r = 0.64, 0.64$ y 0.47 , respectivamente) (Figura 7; Cuadro 5).

Así mismo, la cronología estándar muestra correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) con el periodo de lluvia de julio a octubre para los tres índices de anillo ($r = 0.58, 0.59$ y 0.60 , correspondientemente). La cronología residual, registra correlaciones significativas ($p < 0.05$) a excepción de la madera tardía que es altamente significativa ($p < 0.01$) con valores de $r = 0.37, 0.33$ y 0.52 para el anillo total, la madera temprana y la madera tardía, respectivamente (Figura 7; Cuadro 5).

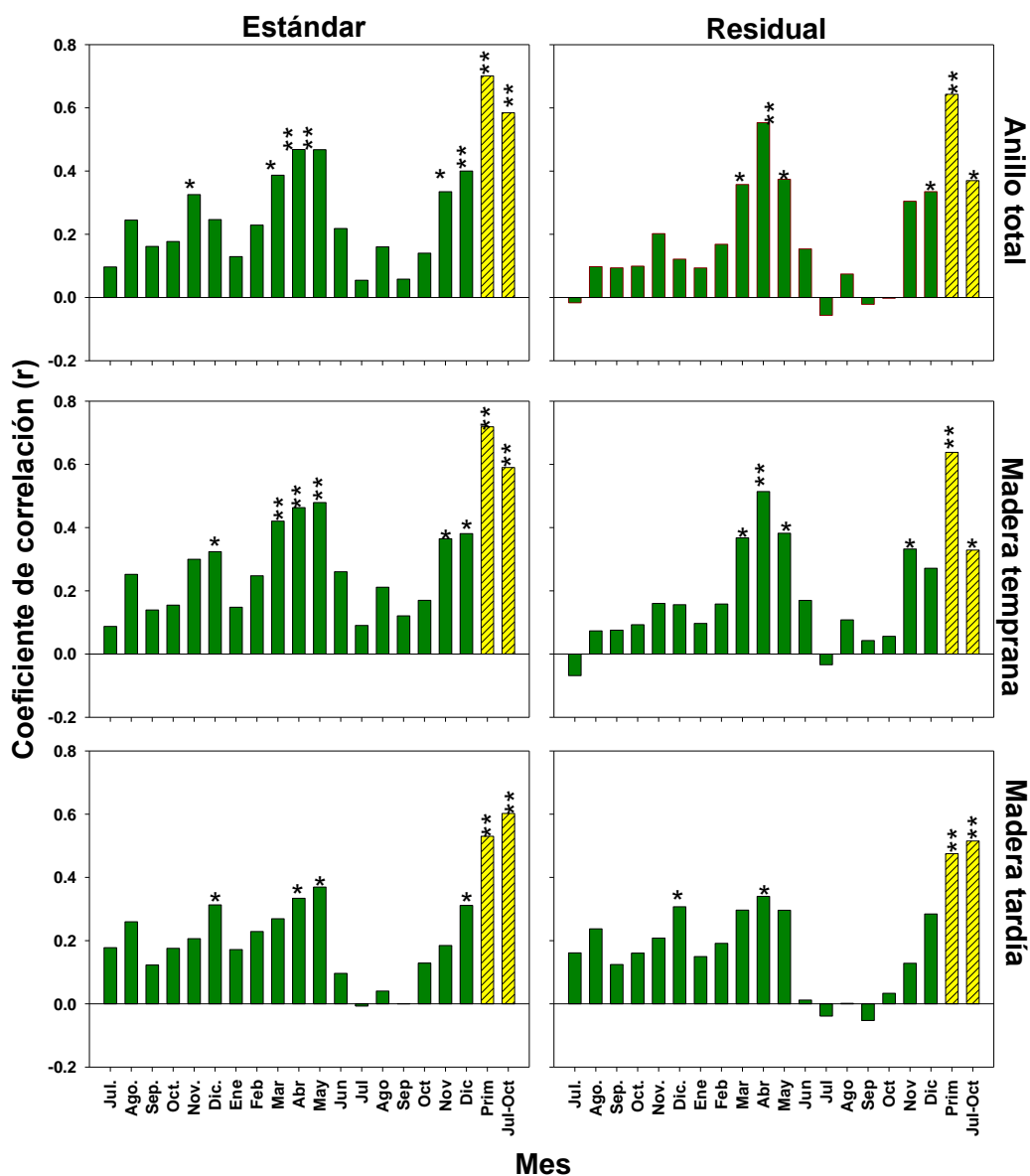


Figura 7. Coeficientes de correlación entre la precipitación mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1961 a 2004) y julio a octubre (de 1961 a 1982) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

Cuadro 5. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la precipitación de primavera, julio a octubre y los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede., en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R^2		Pr>F	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
Precipitación primavera	Intercepto	-78.21	-96.03	0.70	0.64	0.49	0.41	<0.081	<0.085
	Anillo total	278.87	292.82					<0.000	<0.000
	Intercepto	-65.97	-62.13	0.71	0.64	0.52	0.41	<0.104	<0.208
	Madera temprana	265.77	255.64					<0.000	<0.000
	Intercepto	9.18	-6.07	0.53	0.48	0.28	0.23	<0.843	<0.916
	Madera tardía	192.53	207.46					<0.000	<0.002
Precipitación julio-octubre	Intercepto	50.60	87.40	0.58	0.37	0.34	0.14	<0.437	<0.354
	Anillo total	206.25	162.32					<0.007	<0.108
	Intercepto	59.91	122.66	0.59	0.33	0.35	0.11	<0.329	<0.149
	Madera temprana	191.47	121.45					<0.006	<0.157
	Intercepto	70.98	47.54	0.60	0.52	0.36	0.27	<0.21	<0.545
	Madera tardía	201.54	225.90					<0.005	<0.020

En OA los valores de correlación observados para el período de primavera, fueron altamente significativos ($p < 0.01$), sin embargo, la más alta correlación se observó para la cronología estándar de madera temprana ($r = 0.71$, $p < 0.01$). Así mismo, para la cronología estándar el periodo de julio a octubre, indica una correlación altamente significativa ($p < 0.01$; $r = 0.60$) con la madera tardía. Lo anterior indica el potencial para generar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la precipitación de primavera o de verano para los últimos 91 años en Ojo de Agua (Figura 8; Cuadro 5).

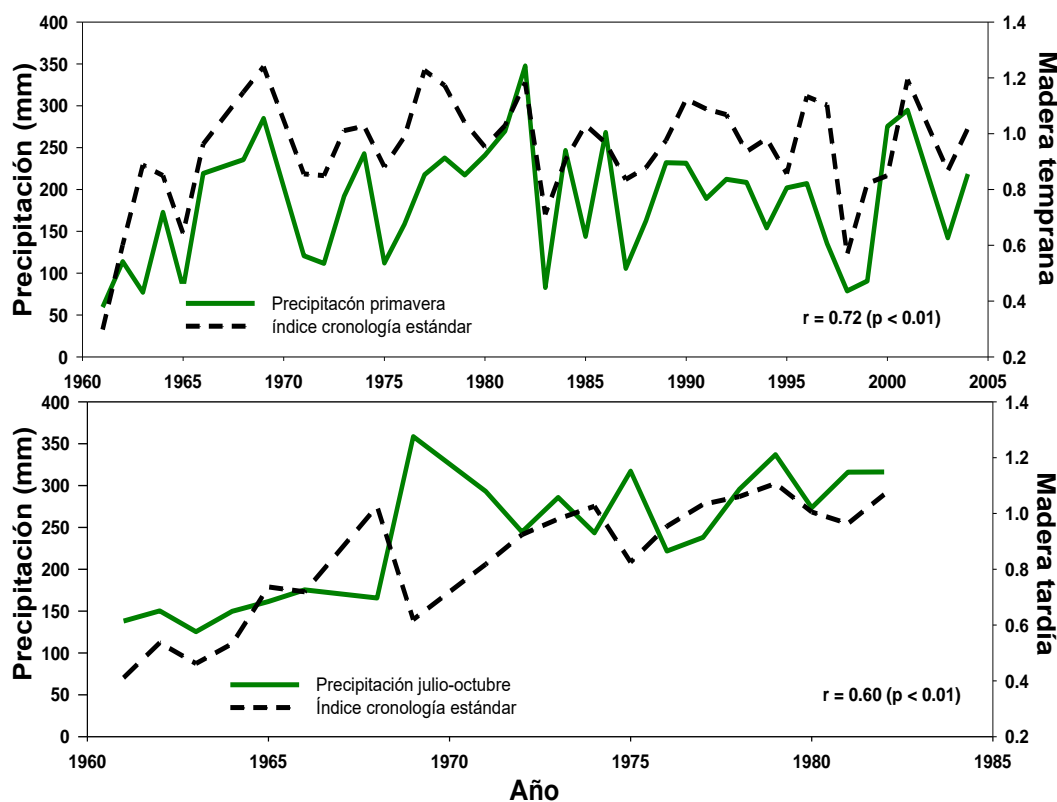


Figura 8. Correlaciones de las maderas, temprana y tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la precipitación mensual en los periodos de primavera y de julio a octubre en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.

En el Ejido Rosendo Salazar, la cronología estándar de madera tardía de *P. oocarpa* explica el 30% de la variabilidad de precipitación del periodo de enero a noviembre y el 26 % del periodo de julio a octubre (Figura 6; Cuadro 4). La cronología residual de madera temprana explica únicamente el 14% de la

variabilidad de precipitación del periodo de primavera. En contraste, en el Ejido Ojo de Agua, la cronología estándar de madera temprana, explica el 52% de la variabilidad de precipitación del periodo de primavera y la madera temprana explica el 36% para el periodo de julio a octubre (Figura 8; Cuadro 5).

Hazlett (1986) señala en su estudio realizado en Honduras con la especie de *P. oocarpa* que, el inicio de la temporada de lluvias ocurre en mayo seguido por un aumento en la actividad cambial con incrementos máximos mensuales de circunferencia de julio a octubre.

Hastenrath (1967) en su estudio acerca de la distribución y régimen de las lluvias en Centroamérica, encontró que la lluvia comienza a declinar en octubre, lo que conduce a una reducción del recurso hídrico del árbol, lo que da como resultado la producción de madera tardía o madera de alta densidad, caracterizada por pequeñas traqueidas, paredes celulares gruesas y lumen pequeño. Asimismo, es probable que se interrumpa la estación seca con lluvias extremas producidas por la actividad ciclónica principalmente hasta fines de noviembre y los frentes fríos en el invierno. Por lo tanto, es probable que se encuentren algunas variaciones en la densidad de la madera tardía y la madera temprana.

Gutiérrez (2014) menciona que las correlaciones con los índices climatológicos indican que el crecimiento de *P. oocarpa* está influenciado de manera significativa por fenómenos localizados principalmente en el océano Pacífico y en menor grado por el océano Atlántico. En el centro y sur del país, la fase cálida de El Niño trae una disminución de la precipitación principalmente en el verano (Magaña, Vázquez, Pérez y Pérez, 2003).

Szejner (2011) encontró que el crecimiento del anillo total de *P. oocarpa* al Este de Guatemala, presenta potencial para desarrollar estudios dendrocronológicos, ya que responde a la precipitación de mayo a junio (primavera-verano) de manera significativa ($p < 0.01$) y es posible reconstruir la variabilidad de la lluvia de

primavera, pese a que la especie presenta anillos falsos y período de supresión. Lo cual es similar a lo encontrado en el presente estudio, el crecimiento del anillo total de *P. oocarpa* está influenciado por ese mismo periodo en los dos sitios y responde de manera significativa ($p < 0.01$).

Gutiérrez (2014) encontró que la precipitación de invierno-primavera tiene influencia positiva en el anillo total de *P. oocarpa* en Los Tuxtlas, Veracruz, siendo las correlaciones máximas en los meses de diciembre, enero y junio ($r = 0.36$, 0.38 y 0.46 , respectivamente). En contraste, en este estudio en la cronología estándar para el sitio OA se encontró las correlaciones máximas en los meses de abril, mayo y diciembre del año actual ($r = 0.47$, 0.47 y 0.40 , respectivamente) mientras que para RS ocurrió en los meses de septiembre del año previo, y agosto y septiembre del año actual ($r = 0.35$, 0.27 y 0.26 , en ese orden).

Villanueva-Díaz *et al.* (2018) en el Bosque La Primavera, Jalisco, México, reportan relación entre la cronología residual de madera temprana de *P. oocarpa* y la precipitación acumulada de octubre a mayo ($r = 0.77$). En contraste, en este estudio las correlaciones más altas en RS se encontraron en el periodo acumulado de enero a noviembre ($r = 0.55$) y en OA en el periodo de primavera ($r = 0.71$).

Para otras especies de *Pinus* en México, el crecimiento del anillo total, madera temprana y tardía, responden a diversos periodos de la lluvia estacional, esto ha sido corroborado por diversos estudios. Constante *et al.* (2009) encontraron correlación altamente significativa ($p < 0.01$; $r = 0.90$) con la precipitación total acumulada de enero a julio y el anillo total de *P. cembroides*, al sureste de Coahuila. En contraste, en el sitio RS y OA *P. oocarpa* responde al citado periodo con correlaciones bajas ($r = 0.21$, 0.34 , respectivamente) en la cronología estándar, encontrando las correlaciones más altas en los periodos de primavera, de julio a octubre y de enero a noviembre.

Cardoza *et al.* (2013) en Altzayanca, Tlaxcala, encontraron que el anillo total de *P. cembroides* presenta mayor correlación con la cronología de enero a diciembre ($r = 0.71$, $p < 0.001$), lo cual sugiere que el desarrollo de la especie en la zona responde a la precipitación total anual. Lo cual es similar a lo encontrado en el presente estudio, ya que en RS responde de manera significativa ($p < 0.01$) al periodo de enero a noviembre para los tres índices de anillo de la cronología estándar ($r = 0.51$, 0.48 y 0.55 , respectivamente).

Díaz-Ramírez *et al.* (2016) encontraron para la madera temprana de la cronología residual de *P. durangensis*, en Pueblo Nuevo, Durango, que responde a la lluvia de enero a agosto con una correlación de $r = 0.72$ ($p < 0.01$). En contraste, en este estudio en RS y OA no se encontraron correlaciones altas ($r = 0.25$ y 0.23 , en ese orden) en el citado periodo.

Cortés-Cortés *et al.* (2021) en Coyuca de Catalán, Guerrero, encontraron que los tres índices de anillo de *P. montezumae* tienen relación con la precipitación de primavera y es altamente significativa ($p < 0.01$). Lo cual es similar a lo encontrado en el presente estudio, el crecimiento del anillo total, la madera temprana y madera tardía de *P. oocarpa* está influenciado por ese mismo periodo y responde de manera significativa ($p < 0.05$) y altamente significativo ($p < 0.01$).

Los fenómenos climatológicos a gran escala influyen de manera diferente en el norte y sur de México y con ello las condiciones climáticas de grandes extensiones del territorio son diferentes (Méndez y Magaña, 2010; Stahle *et al.*, 2012). Gutiérrez (2014) menciona que la sincronía de las condiciones climáticas se refleja en el crecimiento de los árboles, debido a que gran porcentaje de la variación del crecimiento de un árbol es atribuido a las variables climáticas. El clima y los gradientes altitudinales son un factor determinante en las características de los anillos de crecimiento (Haghshenas *et al.*, 2016; Hernández y Castellanos, 2006).

Respuesta del crecimiento de *P. oocarpa* a la temperatura mínima

Para el sitio RS, los análisis de correlación entre las cronologías estándar y residual, con los datos climáticos de temperatura mínima mensual para el periodo de 1962-2016, indicaron que la temperatura mínima mensual de julio a octubre del año previo respondió positivamente, excepto en la cronología residual, en donde para el anillo total el mes de julio responde negativamente (Figura 9).

La temperatura mínima de los meses de noviembre a febrero, respondieron negativamente con los tres índices de anillo de la cronología estándar (Figura 9). Para la cronología residual, la temperatura mínima de enero y febrero, se correlacionó negativamente con el anillo total y la madera temprana (Figura 9).

En las cronologías estándar y residual, la temperatura mínima del mes de mayo, se correlacionó de manera altamente significativa con la madera tardía ($p < 0.01$; Figura 9). En esas mismas cronologías, se encontró una correlación significativa ($p < 0.05$) entre la temperatura mínima mensual con el periodo de primavera, para los tres índices de anillo, excepto la madera tardía de la cronología estándar (Figura 9).

Para la cronología estándar, la temperatura mínima del periodo de marzo a agosto, se correlacionó significativamente ($p < 0.05$; $r = 0.30$) con la madera tardía. La temperatura mínima de ese periodo sólo respondió positivamente con el anillo total y la madera temprana ($r = 0.24$ y 0.23 , respectivamente) (Figura 9; Cuadro 6).

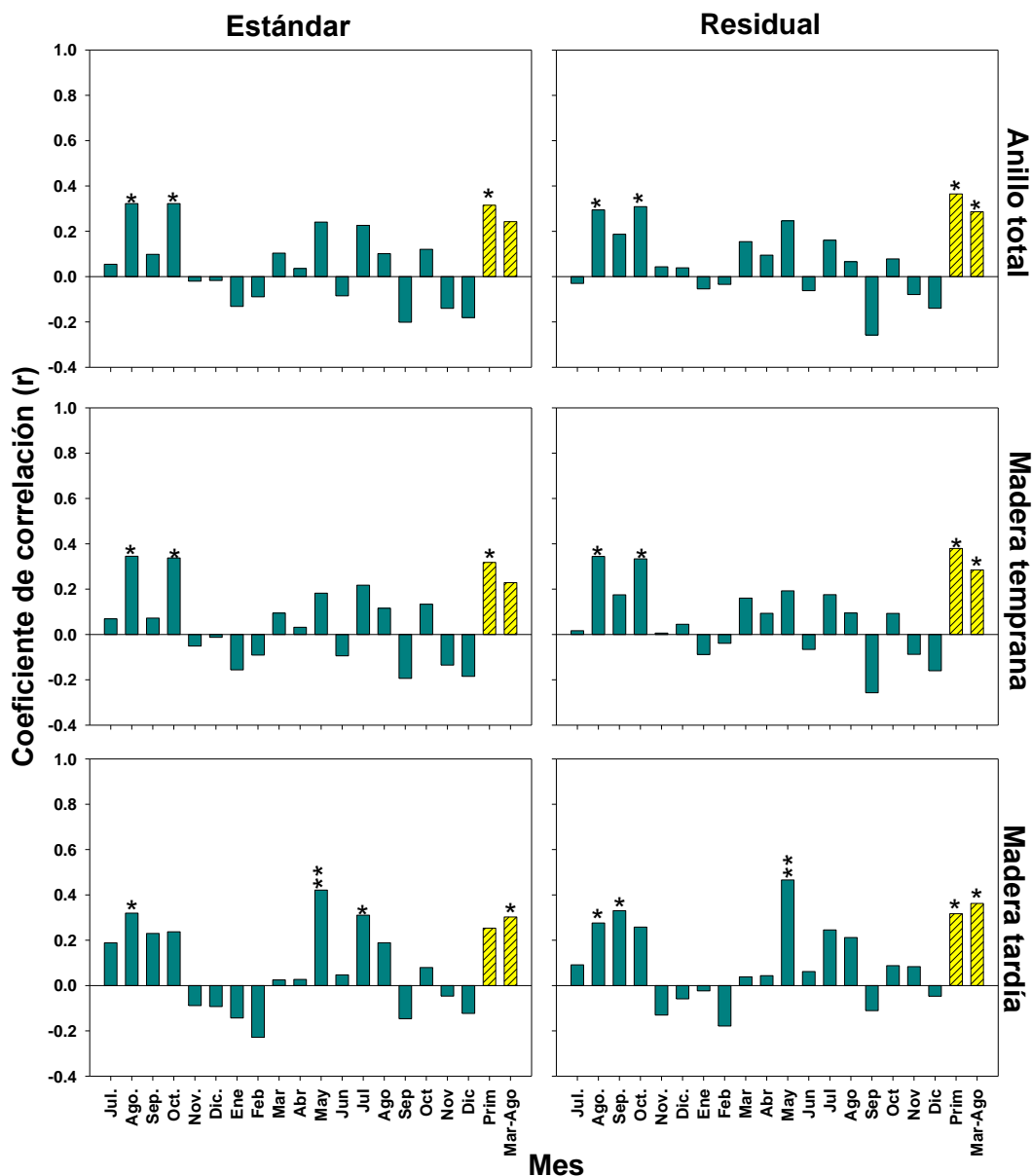


Figura 9. Coeficientes de correlación entre la temperatura mínima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1973 a 2005) y marzo a agosto (de 1964 a 2005) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

Para la cronología residual se encontraron correlaciones significativas ($p < 0.05$) entre la temperatura mínima del citado periodo y el anillo total, la madera temprana y la madera tardía ($r = 0.29, 0.28$ y 0.36 , respectivamente) (Figura 9; Cuadro 6). Cabe señalar el efecto negativo y consistente en el mes de junio tanto en las dos cronologías, estándar y residual, como en el anillo total y la madera temprana.

En la cronología residual, el periodo de temperatura mínima que influyó de manera significativa ($p < 0.05$) en la madera temprana de *P. oocarpa* fue de primavera, con una $r = 0.38$. De igual manera, el periodo de marzo a agosto mostró una correlación de $r = 0.36$ (Figura 10; Cuadro 6). Lo anterior indica el potencial para general un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la temperatura mínima de primavera y de marzo a agosto para los últimos 153 años en el Ejido Rosendo Salazar.

Cuadro 6. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la temperatura mínima de primavera, marzo a agosto con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R^2		$Pr > F$	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
Temperatura mínima primavera	Intercepto	10.58	10.03	0.32	0.37	0.10	0.13	<0.000	<0.000
	Anillo total	2.32	2.78					<0.079	<0.040
	Intercepto	10.64	10.03	0.32	0.38	0.10	0.14	<0.000	<0.000
	Madera temprana	2.30	2.83					<0.076	<0.032
	Intercepto	10.61	9.35	0.25	0.32	0.06	0.10	<0.000	<0.000
	Madera tardía	2.30	3.53					<0.162	<0.077
Temperatura mínima marzo-agosto	Intercepto	12.94	12.59	0.24	0.29	0.06	0.08	<0.000	<0.000
	Anillo total	1.41	1.72					<0.137	<0.077
	Intercepto	13.08	12.67	0.23	0.28	0.05	0.08	<0.000	<0.000
	Madera temprana	1.30	1.67					<0.161	<0.078
	Intercepto	12.25	11.27	0.30	0.36	0.09	0.13	<0.000	<0.000
	Madera tardía	2.14	3.10					<0.061	<0.023

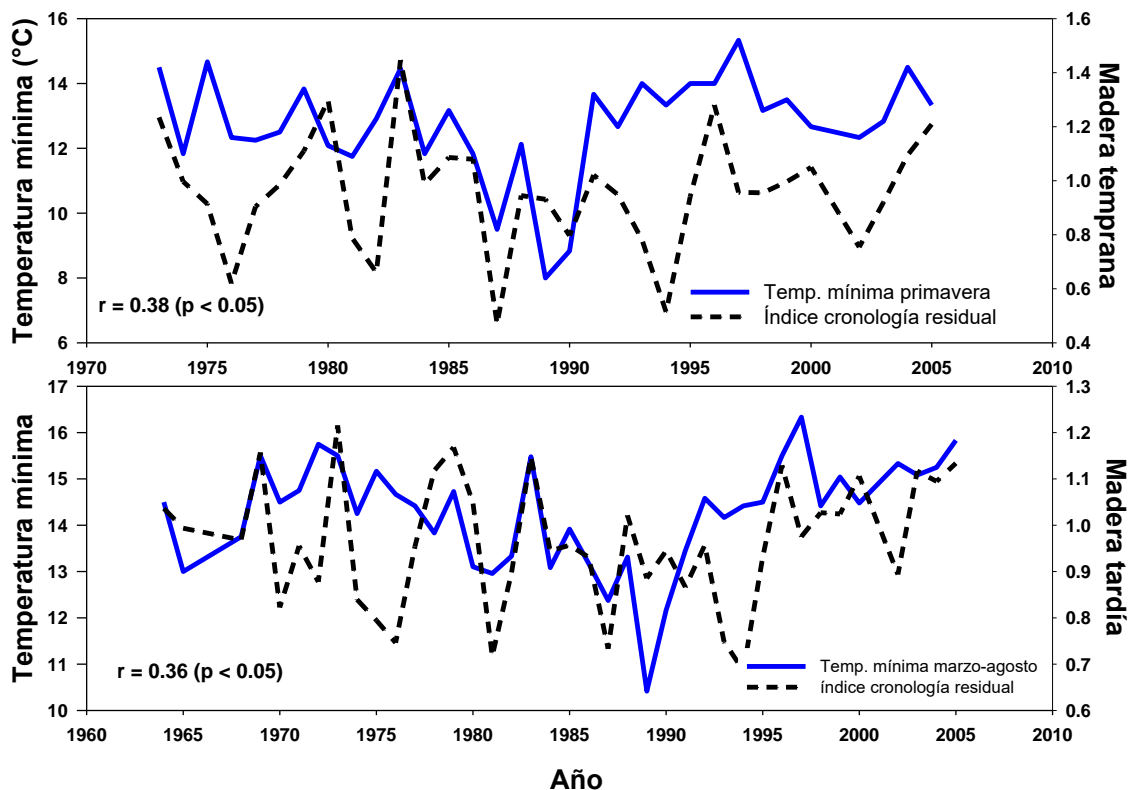


Figura 10. Correlaciones de las maderas, temprana y tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura mínima en los periodos de primavera y de marzo a agosto en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.

Para el sitio OA, los índices de crecimiento de *P. oocarpa* de las cronologías estándar y residual, indicaron que la temperatura mínima promedio mensual mostró correlaciones positivas con el anillo total, la madera temprana y la madera tardía, para los 18 meses (julio-diciembre y enero-diciembre) (Figura 11).

La cronología estándar mostró correlaciones significativas ($p < 0.05$) y altamente significativas ($p < 0.01$) en anillo total y madera temprana, respectivamente (Figura 11).

Para las cronologías estándar y residual, los meses de febrero, marzo, abril y mayo mostraron correlaciones altamente significativas con los índices de anillo total y la madera temprana ($p < 0.01$; Figura 11).

La cronología estándar indicó correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre la temperatura mínima del periodo de primavera con el anillo total y la madera temprana y tardía ($r = 0.79, 0.81$ y 0.60 , respectivamente) (Figura 11; Cuadro 7). Mientras que para la cronología residual en este mismo periodo se encontraron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) para los tres índices de anillo ($r = 0.69, 0.68$ y 0.44 , respectivamente) (Figura 11, Cuadro 7).

Las cronologías estándar y residual, observaron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre el periodo de temperatura mínima de febrero a marzo para los tres índices de anillo, para la cronología estándar valores de $r = 0.79, 0.81$ y 0.60 , respectivamente, para la cronología residual valores de $r = 0.69, 0.68$ y 0.44 , correspondientemente (Figura 11; Cuadro 7).

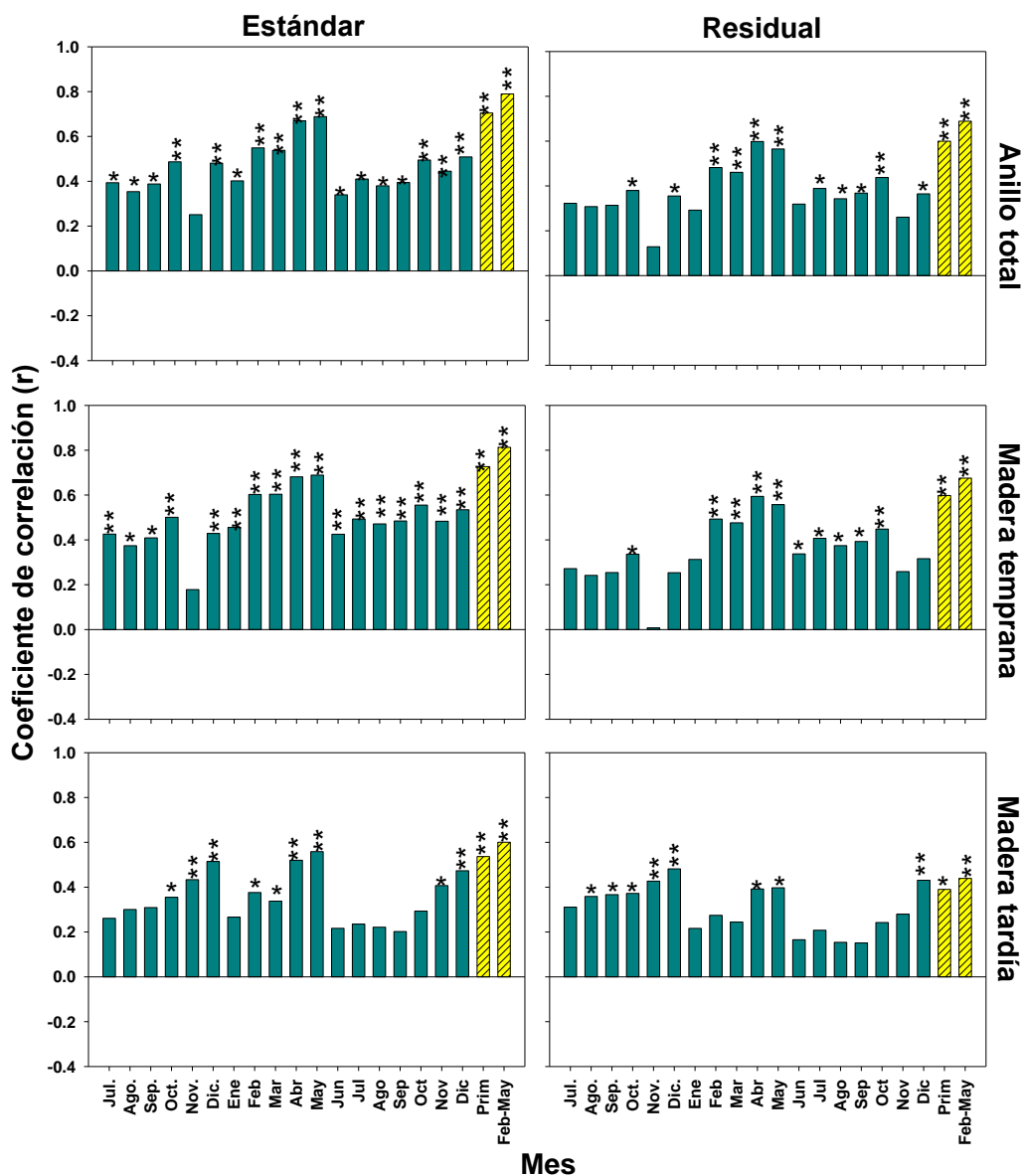


Figura 11. Coeficientes de correlación entre la temperatura mínima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1961 a 2004) y de febrero a mayo (de 1961 a 1990) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

Cuadro 7. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la temperatura mínima de primavera y febrero a mayo con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede., en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R^2		$Pr>F$	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
Temperatura mínima primavera	Intercepto	7.17	6.95	0.79	0.69	0.62	0.48	<0.000	<0.000
	Anillo total	6.88	6.81					<0.000	<0.000
	Intercepto	7.41	8.01	0.81	0.68	0.66	0.46	<0.000	<0.000
	Madera temprana	6.55	5.70					<0.000	<0.000
	Intercepto	9.20	9.71	0.60	0.44	0.36	0.19	<0.000	<0.000
	Madera tardía	5.03	4.30					<0.003	<0.036
Temperatura mínima febrero-mayo	Intercepto	7.31	7.13	0.79	0.69	0.62	0.47	<0.000	<0.000
	Anillo total	6.11	6.04					<0.000	<0.000
	Intercepto	7.51	8.08	0.81	0.68	0.66	0.46	<0.000	<0.000
	Madera temprana	5.84	5.05					<0.000	<0.000
	Intercepto	9.11	9.57	0.60	0.44	0.36	0.19	<0.000	<0.000
	Madera tardía	4.48	3.82					<0.002	<0.036

Lo anterior indica potencial para generar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la temperatura mínima de primavera o de febrero a marzo para los últimos 91 años en el Ejido Ojo de Agua (Figura 12).

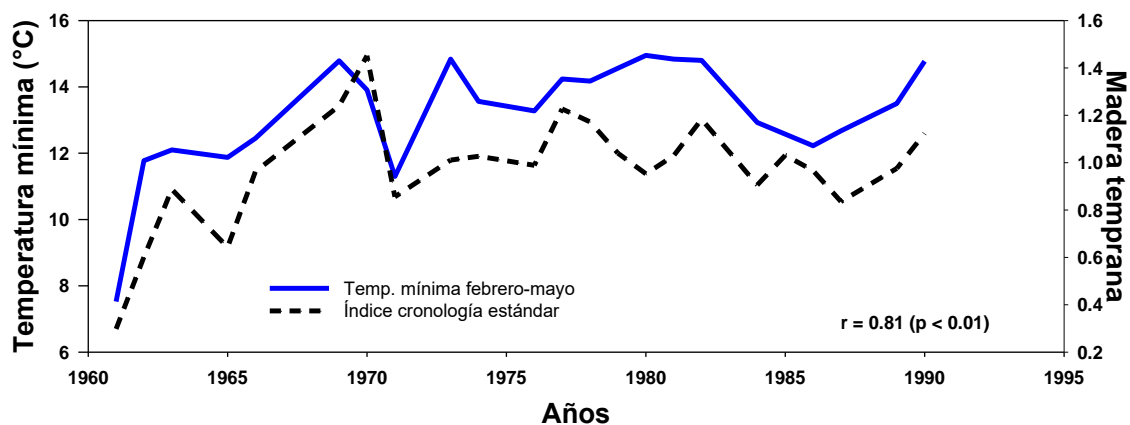


Figura 12. Correlación de la madera temprana de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura mínima en el periodo de febrero a mayo en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.

El crecimiento radial de *P. oocarpa* en RS responde a la temperatura mínima de manera positiva y negativa (Figura 9), mientras que en OA el incremento radial responde positivamente (Figura 10). Para el sitio RS, la temperatura mínima del periodo de primavera responde de manera significativa ($p < 0.05$), con el índice de anillo total, la madera temprana y la madera tardía de la cronología estándar con valores de $r = 0.32$, 0.32 y 0.25 , respectivamente. Para la cronología residual, se determinaron correlaciones de $r = 0.37$, 0.38 y 0.32 , respectivamente (Cuadro 6). En OA el incremento radial de *P. oocarpa* responde con valores altamente significativos ($p < 0.01$) para los tres índices de anillo ($r = 0.79$, 0.81 y 0.60 , respectivamente) para las cronologías estándar y residual ($r = 0.69$, 0.68 y 0.44 , en ese orden) (Cuadro 7).

López-Hernández *et al.* (2018) encontraron que el incremento de la madera temprana de *P. oocarpa* en Chiapas, está influenciado por la temperatura mínima y es posible reconstruirla en el periodo de marzo a mayo. Lo cual es similar a lo

encontrado en el presente estudio, el crecimiento de la madera temprana está influenciado por ese mismo periodo, en RS responde de manera significativa ($p < 0.05$) y en OA altamente significativa ($p < 0.01$).

Estudios dendroclimáticos en México, han encontrado respuestas diferentes entre el crecimiento radial de las coníferas y las temperaturas mínimas, tal es el caso de Marles *et al.* (2015) quienes no observaron relación entre la temperatura mínima media y los tres índices de anillo de *Pinus devoniana* Lindley y *P. pseudostrobus* en Michoacán. En contraste, en este estudio se encontró que la temperatura mínima tiene relación con el anillo total, la madera temprana y madera tardía de *P. oocarpa*.

Chávez-Gándara *et al.* (2017) en San Dimas, Durango, encontraron asociación entre los tres índices de anillo de *P. durangensis*, *Pinus cooperi* C.E Blanco y *Pinus lumholtzii* Rob. & Fernald y la temperatura mínima, la mayoría de los meses mostraron correlaciones positivas. La temperatura invernal de enero tuvo la mejor correlación altamente significativa ($p < 0.01$) con el anillo total, la madera temprana y madera tardía ($r = 0.54, 0.52$ y 0.54 , respectivamente). Lo cual es similar a lo encontrado en el presente estudio, en OA los tres índices de anillo respondieron positivamente a la temperatura mínima, en contraste, en RS respondieron negativa y positivamente.

González (2019) encontró que el anillo total de *P. pseudostrobus* del Parque Nacional Cumbres de Monterrey y la temperatura mínima responde significativamente para los meses de noviembre y diciembre con correlaciones de $r = 0.27$ y 0.25 , respectivamente. En contraste, en este estudio en el sitio RS no se encontró correlación significativa entre la temperatura mínima de esos meses, para el sitio OA se encontró una correlación altamente significativa ($p < 0.01$).

Cortés-Cortés *et al.* (2021) en Coyuca de Catalán, Guerrero encontraron que los índices de crecimiento de anillo total y madera temprana de *P. montezumae* tienen correlación negativa con la temperatura mínima mensual, a excepción del anillo total con el mes de junio en la cronología residual. La correlación fue altamente significativa ($p < 0.01$) en el mes de marzo. En contraste, a este estudio en RS el mes de junio responde negativamente y en OA positiva y significativamente ($p < 0.05$).

García-Suárez, Butler y Baillie (2009) relacionan la tasa de crecimiento radial y las características de los anillos con las variables ambientales como la temperatura, precipitación e intensidad luminosa.

López-Hernández *et al.* (2018) encontraron que a menor temperatura hubo más crecimiento, de tal forma que los crecimientos se relacionan significativamente con la temperatura mínima. Sin embargo, temperaturas cercanas a 5 °C o por debajo de ésta, propician que los estomas se cierren interrumpiendo el intercambio de gases (Barceló, Nicolás, Sabater y Sánchez, 2001).

Respuesta del crecimiento de *P. oocarpa* a la temperatura máxima

El crecimiento radial de *P. oocarpa* en RS indicó una relación negativa con la temperatura máxima del mes de julio del año previo para los tres índices de anillo (Figura 13). Para las cronologías estándar y residual, la temperatura máxima de los meses de noviembre y diciembre se correlacionó de manera negativa para el anillo total y la madera temprana y tardía, excepto por la madera tardía en la cronología residual que fue positiva la relación sólo en noviembre (Figura 13).

En la cronología estándar, la temperatura máxima del periodo de primavera, se correlacionó de manera altamente significativa ($p < 0.01$; $r = 0.52$) con la madera tardía. La temperatura máxima en ese periodo sólo respondió positivamente con el anillo total y la madera temprana ($r = 0.42$ y 0.41 , correspondientemente) (Figura 13; Cuadro 8).

En la cronología estándar, la temperatura máxima que comprende el periodo de marzo a agosto, se correlacionó significativamente ($p < 0.05$) con el anillo total, la madera temprana y tardía ($r = 0.44, 0.32$ y 0.43 , respectivamente) (Figura 13). Para la cronología residual, se encontraron correlaciones positivas entre la temperatura máxima del citado periodo y el anillo total y la madera temprana ($r = 0.26$ y 0.25 , en ese orden), la madera tardía respondió significativamente ($p < 0.05$; $r = 0.43$) (Figura 13).

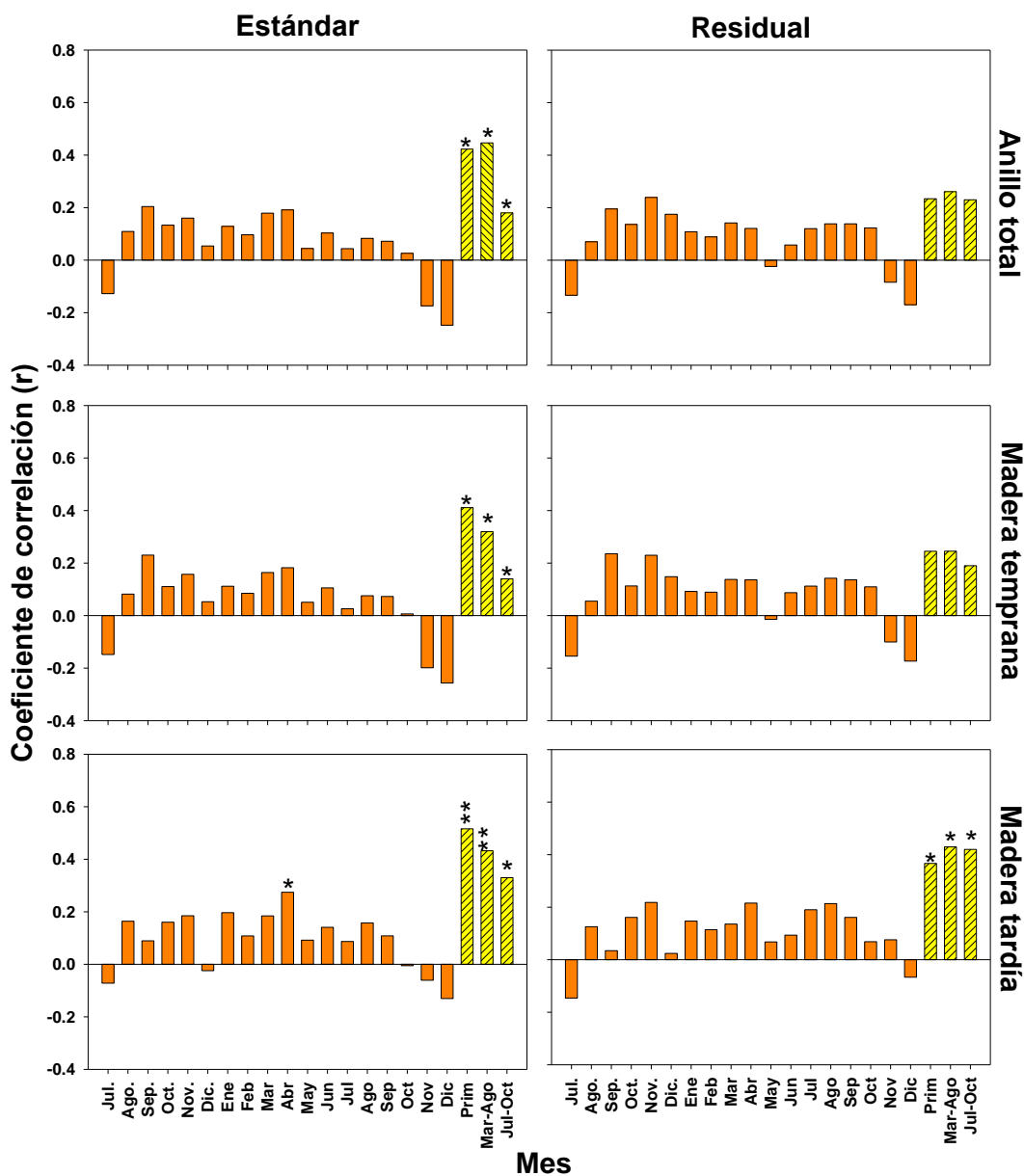


Figura 13. Coeficientes de correlación entre la temperatura máxima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1978 a 2010), marzo a agosto (de 1979 a 2009) y julio a octubre (de 1978 a 2010) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

Cuadro 8. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R²) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre temperatura máxima de primavera y julio a octubre con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede., en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R ²		Pr>F	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
Temperatura máxima primavera	Intercepto	33.45	34.62	0.42	0.23	0.18	0.06	<0.000	<0.000
	Anillo total	3.14	1.92					<0.016	<0.196
	Intercepto	33.73	34.64	0.41	0.25	0.17	0.06	<0.000	<0.000
	Madera temprana	2.91	1.92					<0.019	<0.175
	Intercepto	31.68	32.10	0.52	0.37	0.27	0.13	<0.000	<0.000
	Madera tardía	4.98	4.47					<0.003	<0.039
Temperatura máxima julio-octubre	Intercepto	33.21	32.68	0.18	0.23	0.03	0.05	<0.000	<0.000
	Anillo total	1.34	1.84					<0.317	<0.207
	Intercepto	33.58	33.06	0.14	0.19	0.02	0.04	<0.000	<0.000
	Madera temprana	0.98	1.48					<0.444	<0.290
	Intercepto	31.43	29.50	0.33	0.42	0.11	0.18	<0.000	<0.000
	Madera tardía	3.18	5.07					<0.061	<0.016

Las cronologías estándar y residual, se correlacionó positivamente con la temperatura máxima del periodo de julio a octubre, con los tres índices de anillo; para la madera tardía, se encontró una correlación significativa ($p < 0.05$) entre la temperatura máxima del citado periodo ($r = 0.33$ y 0.42 , respectivamente para cada cronología) (Figura 13; Cuadro 8).

Para la cronología estándar, el periodo de temperatura máxima que influyó de manera altamente significativa ($p < 0.01$) en la madera tardía de *P. oocarpa* fue primavera con una $r = 0.52$ (Figura 14; Cuadro 8). Lo anterior indica el potencial para generar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la temperatura máxima de primavera para los últimos 153 años en el Ejido Rosendo Salazar.

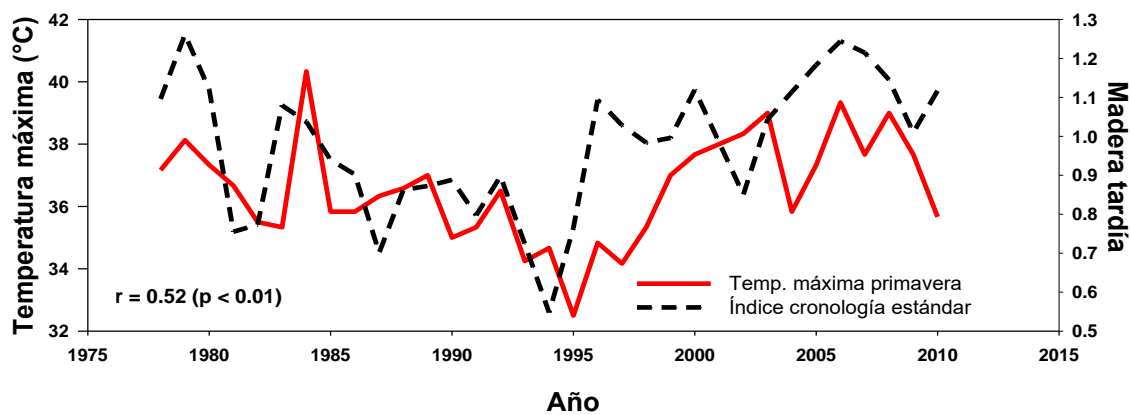


Figura 14. Correlación de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura máxima en el periodo de primavera en el Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa, Chiapas.

Para OA, los índices de crecimiento de *P. oocarpa* de las cronologías, estándar y residual, indicaron que la temperatura máxima del mes de febrero mostró la correlación más baja con el anillo total, la madera temprana y tardía (Figura 15).

En la cronología estándar de la madera tardía, los meses de julio a diciembre del año previo, enero, marzo, julio, septiembre-diciembre del año actual mostraron

una correlación significativa y altamente significativa ($p < 0.05$; $p < 0.01$), respectivamente (Figura 15).

Las altas correlaciones significativas de noviembre, diciembre, enero y marzo con la madera tardía pueden explicar la producción de un anillo falso, ya que ni el anillo total y ni la madera temprana tienen los valores de correlación alta y significativa que tiene la madera tardía en esos meses. Elevadas temperaturas por arriba de los 25 °C producen una fuerte presión al nivel de los estomas, el déficit de presión de vapor se incrementa hasta por arriba de los 2.0 kPa provocando el cierre de estomas y limitando el intercambio de gases y el crecimiento radial (Barceló *et al.*, 2001). Lo anterior, provoca la acumulación de carbohidratos en las paredes de las células lo cual aumenta su espesor (Bidwell, 1979; Giménez *et al.*, 2005).

Para la cronología estándar, se encontró una correlación significativa ($p < 0.05$) entre la temperatura máxima del periodo de primavera y la madera tardía ($r = 0.40$, correspondientemente). Mientras que, para la cronología residual en ese mismo periodo, se determinó una correlación negativa con la madera temprana ($r = 0.04$, respectivamente) (Figura 15).

Las cronologías estándar y residual, muestran correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre el periodo de temperatura máxima de julio a octubre con el anillo total, la madera temprana y la madera tardía; los valores de correlación en la cronología estándar fueron de $r = 0.68$, 0.68 y 0.65 , respectivamente, mientras que en la cronología residual los valores fueron de $r = 0.56$, 0.51 y 0.51 , correspondientemente (Figura 15; Cuadro 9).

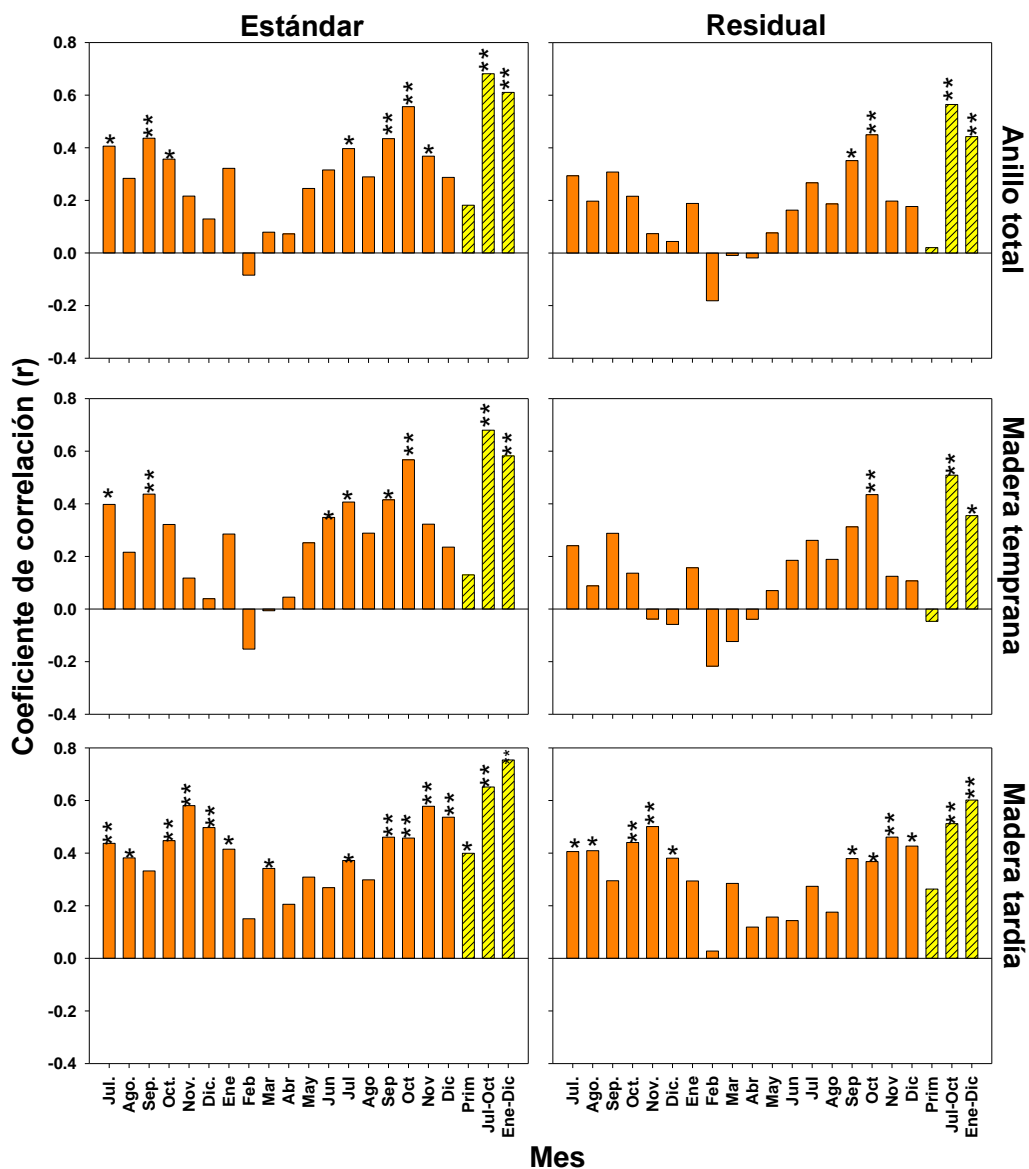


Figura 15. Coeficientes de correlación entre la temperatura máxima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1961 a 1990), julio a octubre (de 1961 a 1996) y enero a diciembre (de 1961 a 1987) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

Cuadro 9. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la temperatura máxima de enero a diciembre, julio a octubre, con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede, en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R ²		Pr>F	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
Temperatura máxima julio-octubre	Intercepto	22.51	22.61	0.68	0.56	0.46	0.32	<0.000	<0.000
	Anillo total	3.06	2.87					<0.000	<0.001
	Intercepto	22.70	23.26	0.68	0.51	0.46	0.26	<0.000	<0.000
	Madera temprana	2.84	2.20					<0.000	<0.005
	Intercepto	22.87	23.02	0.65	0.51	0.42	0.26	<0.000	<0.000
	Madera tardía	2.81	2.57					<0.000	<0.005
Temperatura máxima enero-diciembre	Intercepto	23.40	23.71	0.61	0.44	0.37	0.20	<0.000	<0.000
	Anillo total	2.31	1.90					<0.003	<0.045
	Intercepto	23.64	24.30	0.58	0.35	0.34	0.13	<0.000	<0.000
	Madera temprana	2.03	1.30					<0.006	<0.114
	Intercepto	23.14	23.21	0.75	0.60	0.57	0.36	<0.000	<0.000
	Madera tardía	2.72	2.53					<0.000	<0.004

Para la cronología estándar, se determinaron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre el periodo de temperatura máxima de enero a diciembre con los tres índices de anillo ($r = 0.61$, 0.58 y 0.75 , correspondientemente), para la cronología residual, se obtuvieron valores de $r = 0.44$, 0.35 y 0.57 , en ese orden (Figura 15; Cuadro 9). Lo que indican el potencial para generar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la temperatura máxima de julio-octubre o anual para los últimos 91 años en el Ejido Ojo de Agua.

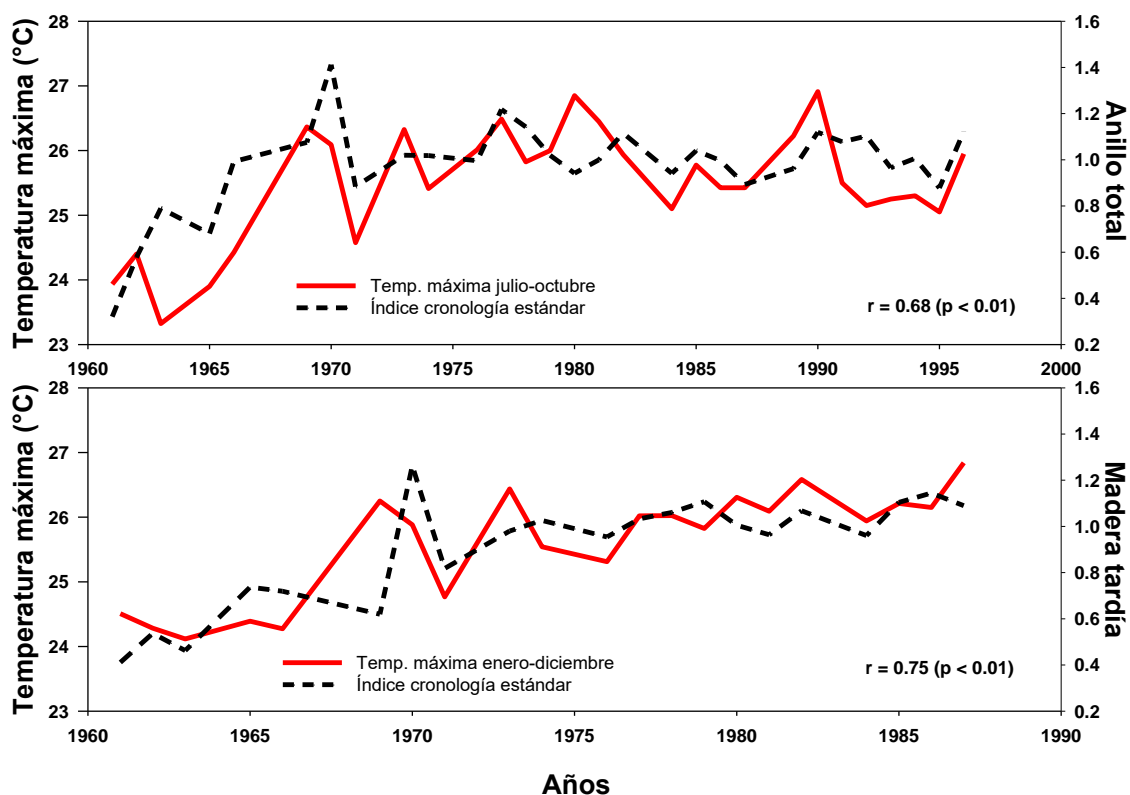


Figura 16. Correlaciones del anillo total y la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura máxima en los periodos de enero a diciembre y de julio a octubre en el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, Chiapas.

El crecimiento radial de *P. oocarpa* en RS y OA, respondió positivamente a la temperatura máxima en la mayoría de los meses, encontrando las más altas correlaciones para las cronologías estándar y residual de madera tardía (Figura 13 y 15).

Cortés-Cortés *et al.* (2021) encontraron que el crecimiento de los tres índices de anillo de *P. montezumae* en Guerrero, responden de manera positiva a la temperatura máxima promedio del periodo de primavera, aunque la correlación no fue significativa. Lo cual es similar a lo encontrado en el presente estudio, en la cronología estándar, se determinó que el crecimiento del anillo total, madera temprana y madera tardía de *P. oocarpa* está influenciado positivamente en ese periodo con correlaciones positivas, significativas y altamente significativas ($p < 0.05$; $p < 0.01$).

Diversos estudios dendroclimáticos han encontrado una relación negativa con la temperatura máxima. Huante *et al.* (1991) encontraron relación negativa y altamente significativa ($r = -0.719$; $p < 0.01$) en el anillo total de *A. religiosa*, en Michoacán, con la temperatura máxima de otoño, para el periodo anual y de primavera la relación es negativa pero no significativa ($r = -0.098$ y -0.050 , $p < 0.05$) respectivamente. En contraste, se encontró, en el presente estudio, que la temperatura máxima tiene relación positiva con el anillo total de *P. oocarpa* en el periodo de primavera.

Marles *et al.* (2015), encontraron una relación negativa y significativa ($p < 0.05$) entre la temperatura máxima de agosto y octubre el año previo con el anillo total en *P. pseudostrobus* y *P. devoniana* en Michoacán, en el mes de julio y agosto del año anterior. Es decir, a mayor temperatura menor crecimiento. En contraste, en este estudio se encontró en OA correlaciones positivas, significativas y altamente significativas ($p < 0.05$; $p < 0.01$) en esos meses, en cambio, para el sitio RS se halló correlación negativa en el mes de julio, los meses de agosto y septiembre fueron positivos para los tres índices de anillo.

Villanueva-Díaz *et al.* (2018) en *P. oocarpa* en el Bosque La Primavera, Jalisco, encontraron relación entre la cronología de madera temprana y temperatura máxima promedio estacional enero a junio ($r = -0.622$), la serie de madera temprana explicó 38.7% de la variación estacional; esta relación fue negativa; es

decir, una mayor temperatura máxima ocasionó menor valor de los índices y viceversa. En contraste, en los sitios RS y OA, en el presente estudio, en la cronología estándar se encontró correlación positiva en el citado periodo con la madera temprana ($r = 0.15$ y 0.22 , respectivamente).

P. oocarpa en el presente estudio responde diferente a las otras especies en cuanto a la temperatura máxima, en RS en la cronología estándar la madera tardía explicó el 27% de la variabilidad de la temperatura máxima del periodo de primavera, mientras que, en la cronología residual la madera tardía explicó el 18% del periodo de julio a octubre (Cuadro 8). En el caso de OA en la cronología estándar la madera tardía explicó el 57% de la variabilidad de la temperatura máxima de enero a diciembre, en tanto que en la cronología estándar el anillo total explicó el 46% de la variabilidad del periodo de julio a octubre (Cuadro 9).

En la región intertropical la actividad del cambium vascular se presenta en la mayor parte del año debido a las condiciones de humedad y temperatura; pero en las zonas desérticas, la actividad se restringe al periodo de lluvias y en las zonas templadas se inicia cuando las temperaturas aumentan (Creber y Chaloner, 1984; Borchert, 1999;). Los árboles adquieren los recursos necesarios para generar fotosintatos y usarlos en diversos tejidos y funciones (Binkley, 2004).

El efecto de la temperatura está asociado a la longitud del periodo vegetativo en mayor grado que a la radiación recibida en las diferentes latitudes y altitudes y se traduce en un efecto sobre la producción primaria neta (Kirschbaum, 2000).

La mayoría de las coníferas en estudios dendroclimáticos, reportan correlaciones negativas entre la cronología y la temperatura máxima, es decir, que las temperaturas máximas tienen un efecto negativo en el crecimiento, a medida que incrementan las temperaturas el crecimiento disminuye (Marles *et al.*, 2015; Gutiérrez-García y Ricker, 2019).

Boisvenue y Running (2006) mencionan que a nivel mundial el impacto del aumento de temperatura sobre el crecimiento arbóreo en bosques generalmente es positivo, siempre y cuando no exista una limitante del agua. La explicación de que *P. oocarpa* responde positivamente a la temperatura máxima es por la importancia de la humedad, los sitios RS y OA, responden positivamente a la precipitación de marzo a mayo y de julio a octubre, manifestándose con valores de correlaciones altas.

CONCLUSIONES

P. oocarpa presenta alta frecuencia de anillos falsos; sin embargo, para RS y OA se logró fechar el 54 y 43% de las muestras colectadas, respectivamente. Contar con varias muestras por árboles y una gran cantidad de árboles permitió el fechado de las muestras.

Las series de crecimiento de *P. oocarpa* tienen potencial para ser consideradas proxy de la variabilidad climática del Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa y el Ejido Ojo de Agua, La Independencia, por lo que se rechaza la hipótesis nula que el crecimiento del anillo total, de la madera temprana y de la madera tardía de *P. oocarpa* no tiene potencial para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en dos regiones, suroeste y sureste, del estado de Chiapas.

Las series presentan una extensión de 153 años (1867-2019) con base en los crecimientos de *P. oocarpa* en el Ejido Rosendo Salazar y de 91 años (1925-2015) en el Ejido Ojo de Agua. La especie se considera con potencial dendrocronológico para reconstruir las siguientes variables climáticas:

❖ Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa

- La precipitación de enero a noviembre con base en la cronología estándar de la madera tardía o el periodo de julio a octubre con base en la cronología residual de la madera tardía.
- La temperatura mínima de primavera de marzo a mayo, con base en la cronología residual de madera temprana y la del periodo de marzo a agosto con la cronología residual de la madera tardía.
- La temperatura máxima de primavera de marzo a mayo con base en la cronología estándar de la madera tardía.

❖ Ejido Ojo de Agua, La Independencia

- La precipitación de primavera de marzo a mayo, con base a la cronología estándar de la madera temprana y el periodo de julio a octubre con la cronología estándar de la madera tardía.

- La temperatura mínima de primavera o de febrero a marzo con base a la cronología estándar de la madera temprana.
- La temperatura máxima de julio a octubre con base a la cronología estándar del anillo total y el periodo de enero a diciembre con la cronología estándar de la madera tardía.

REFERENCIAS

- Ballesteros-Barrera, C., & Rodríguez Ramírez A. (2011). Métodos de reconstrucción paleoclimática. In R. G. Sánchez, B. C. Ballesteros & N. P. Pavón (Eds.), *Cambio Climático: Aproximaciones para el estudio de su efecto sobre la biodiversidad* (1er ed., pp. 1-14). Universidad Autónoma Del Estado De Hidalgo, México.
- Barceló, C. J., Nicolás, R. G., Sabater, G. B., & Sánchez, T. R. (2001). *Fisiología vegetal*. Madrid, España: Ediciones Pirámide.
- Bidwell, R. G. S. (1979). *Fisiología vegetal*. (AGT Editor. S.A.) (Primera edición en español). México.
- Binkley, D. (2004). A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. *Forest Ecology and Management*, 190(2-3), 265–271. doi:10.1016/j.foreco.2003.10.018
- Boisvenue, C., & Running, S. W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology*, 12(5), 862–882. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>
- Borchert, R. (1999). Climatic periodicity, phenology y cambium activity in tropical dry forest trees. *IAWA Journal*, 20(3), 239–247. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000687>
- Cardoza, M, G. F., Cerano, P, J., Villanueva, D, J., Cervantes, M, R., Guerra, De la C. V., & Estrada, A. J. (2014). Reconstrucción de la precipitación anual para la región oriental del Estado de Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 110-127. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v5n23/v5n23a9.pdf>
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387–399. doi: 10.4067 / S0717-92002017000200016

- Constante, G. V., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Cornejo, O. E. H., & Valencia, M. S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17–39. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/cfm/v34n106/v34n106a2.pdf>
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin Copyright*, 47, 7–59. Obtenido de <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261788/trb-47-037-059.pdf?sequence=1>
- Cortés-Cortés, O., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Flores-López, C., & Valencia-Manzo, S. (2021). Relationship between climate variability and radial growth of *Pinus montezumae* Lamb. in Coyuca de Catalán, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(1), 109–126. doi:10.5154/r.rchscfa.2020.03.012
- Creber, G.T., & Chaloner, W. G. (1984). Influence of environmental factors on the wood structure of living and fossil trees. *The Botanical Review*, 50(4), 357–448.
- Dave, Y. S., & Rao, K.S. (1982). Seasonal activity of the vascular cambium in *Gmelina arborea* Roxb. *IAWA Bulletin n. s.*, 3(1), 59–65.
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y Bosques*, 22(1), 111–123. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221480>
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. New York, Estados Unidos: Academic Press.
- Fuentes, N. y Patricio, E. (1995). *Desarrollo de cronologías para alerce (Fitzroya cupressoides) en las Cordilleras de la Costa y de los Andes*. (561.24(83)/NEId). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- García, E. (1998). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. (5ta ed.) México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

- García-Suárez, A. M., Butler, J., & Baillie, M. G. L. (2009). Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: A multi-species approach. *Dendrochronologia*, 27(3), 183–198. doi:10.1016/j.dendro.2009.05.003
- Giménez, A. M., Moglia, J.G., Hernández, P., & Gerez, R. (2005). *Anatomía de madera*. Santiago del Estero Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales. Obtenido de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/sd-1-anatomia-de-madera.pdf>
- González, J. J. (2019). *Respuesta del crecimiento de Pinus pseudostrobus Lindl a las variables climáticas en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Gutiérrez, G. G. (2014). *La relación entre crecimiento y clima en árboles tropicales: un estudio dendrocronológico en la selva de los Tuxtlas, Veracruz, México*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gutiérrez-García, G., & Ricker, M. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>
- Haghshenas, M., Mohadjer, M. R. M., Attarod, P., Pourtahmasi, K., Feldhaus, J., & Sadeghi, S. M. M. (2016). Climate effect on tree-ring widths of *Fagus orientalis* in the Caspian forests, northern Iran. *Forest Science and Technology*, 12(4), 176–182. <https://doi.org/10.1080/21580103.2016.1144542>
- Hastenrath, S. L. (1963). Dendrochronologie en El Salvador. *Meteorologische Rundschau*, 16, 110-113.
- Hastenrath, S. L. (1967). Rainfall distribution and regime in Central America. *Theoretical and Applied Climatology*, 15(3), 201–241. doi:10.1007/BF02243853
- Hazlett, D. L. (1986). Seasonal cambial activity, litterfall, and foliage decomposition rates for *Pinus oocarpa* in Honduras. *CEIBA*, 27(2), 261–

278. Obtenido de
<https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/3891/1/04.pdf>

Hernández, L., & Castellanos, H. (2006). Crecimiento diamétrico arbóreo en bosques de Sierra de Lema, Guayana venezolana: Primeras evaluaciones. *Interciencia*, 31(11), 779–786. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/339/33912205.pdf>

Holmes, R. L. (1983). Computer-assited quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Buletin*, 43 (1), 69-78.

Huante, P., Rincón, E., & Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, Mexico. *Tree-Ring Research*, 51, 15–28. Obtenido de <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/262286/trb-51-015-028.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

INECC y PNUD. (2017). *Análisis de las condiciones climáticas holocénicas, mediante los resultados de estudios paleoclimáticos, paleoceanográficos y paleolimnológicos, y su relación con el cambio climático en México*. Proyecto 85488. Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Obtenido de http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/publicaciones/243/857_2017_Paleoclima_Tenorio.pdf?sequence=1&isAllowed=y

INEGI. (2003). Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1407. Escala 1:250,000. Serie I. Aguascalientes Ags. México.

INEGI. (2014a). Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México, escala: 1:50000. Edición: 2. México.

INEGI. (2014b). Conjunto de datos Vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional). Edición: 2. Aguascalientes Ags. México.

INEGI. (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250000, serie VI (conjunto Nacional). Edición: 1. Aguascalientes, Ags. México.

Johnson, W. C. (1980). Dendrochronological sampling of *Pinus oocarpa* Shiede near Copan, Honduras: a preliminary note. *Biotrópica*, 12 (4), 315–316. doi: 10.2307 / 2387704

- Kirschbaum, M. U. F. (2000). Forest growth and species distribution in a changing climate. *Tree Physiology*, 20(5-6), 309–322. doi: 10.1093/treephys/20.5-6.309
- Lara, A., & Villalba, R. (1993). A 3,620-year temperature reconstruction from *Fitzroya cupressoides* tree rings in southern South America. *Science*, 260(5111), 1104–1106. doi: 10.1126/science.260.5111.1104
- López-Hernández, M. I., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E.H., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Esquivel-Arriaga, G. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede a variables climáticas en el noroeste de Lagunas de Montebello, Chiapas México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1–17. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v66n4/0034-7744-rbt-66-04-1580.pdf>
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in México. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/568/56842304.pdf>
- Magaña, V., Amador, J. A., & Medina, S. (1999). The midsummer drought over México and Central America. *Journal of Climate*, 12, 1577–1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Marlés M. J., Valor, I. T., Claramunt, L. B., Pérez, S. D. R., Maneja, Z. R., Sánchez, M. S., & Boada, J. M. (2015). Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, (88), 19–32. <https://doi.org/10.14350/rig.43338>
- Martínez, M. (1992). *Los pinos mexicanos*. (Tercera edición, pp. 361). Editorial Botas. México.
- Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23, 1175–1188. doi: 10.1175/2009JCLI3080.1
- Miranda, F. (1952). La vegetación de Chiapas. Ediciones del gobierno del Estado. Tuxtla Gutiérrez. 2 vols.

- Perry, J. P. Jr., Graham, A., & Richardson, M. D. 1998. The history of pines in México and Central America. In M. D. Richardson (ed). *Ecology and Biogeography of Pinus*. (pp.137-149). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. (1ra.) Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- SGM. 2017. *Rocas ígneas*. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-igneas.html>
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, KB., Tignor, M., & Miller, HL. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Nueva York, EUA.
- Stahle, D. W., Burnette, D.J., Villanueva D., J., Heim, RR., Fye, FK., Cerano P., J., Acuña-Soto, R., & Cleaveland, MK. (2012). Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics*, 39, 1431–1446. doi 10.1007/s00382-011-1205-z
- Stat Soft Inc. (2000). STATISTICA Software, Kernel Release version 5.5 A. 1984-2000. Tulsa, Oklahoma, USA.
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to the tree-ring dating*. The University of Arizona Press. USA.
- Szejner S., P. (2011). *Tropical dendrochronology: exploring tree-rings of Pinus oocarpa in Eastern Guatemala*. Tesis de maestría. Universidad de Gotinga, Europa, Facultad de Ciencias Forestales y de Ecología Forestal. Europa.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Villanueva-Díaz, J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(14), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2001JD000851>
- Villalba, R. (1990). Climatic fluctuations in northern Patagonia during the last 1,000 years as inferred from tree-ring records. *Quaternary Research* 34(3), 346–360. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(90\)90046-N](https://doi.org/10.1016/0033-5894(90)90046-N)

- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, W. D., Matthew, D. T., Cleaveland, M. K., & Sánchez, C. I. (2004). *Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México*. Folleto Técnico No.2 INIFAP, CENID-RASPA, 2, 48.
- Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E. A., Chávez-Durán, A. A., Zavala-Aguirre, J. L., Cerano-Paredes, J., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–14. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v24n1/1405-0471-mb-24-01-e2411464.pdf>

**IV. CAPÍTULO 2: POTENCIAL DENDROCLIMÁTICO DE *Pinus
oocarpa* Schiede EN EL EJIDO SAN ISIDRO CHICHIHUISTAN,
TEOPISCA, CHIAPAS**

Resumen

POTENCIAL DENDROCLIMÁTICO DE *Pinus oocarpa* Schiede EN EL EJIDO
SAN ISIDRO CHICHIHUISTAN, TEOPISCA, CHIAPAS.

POR:

MARÍA ISABEL LÓPEZ-HERNÁNDEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ELADIO HERIBERTO CORNEJO OVIEDO – ASESOR

El número de especies para las cuales se ha determinado su potencial dendrocronológico ha ido en aumento; sin embargo, falta un gran número de especies por analizar. El objetivo del presente estudio fue determinar el potencial dendrocronológico de *Pinus oocarpa* Schiede para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. Se colectaron 108 muestras con un taladro de Pressler correspondientes a 54 árboles. Se fecharon el 54% de las muestras mediante técnicas dendrocronológicas estándar. Se generó un promedio mensual regional (1946-2018) tanto de precipitación como de temperatura. Se correlacionaron el anillo total y las maderas, temprana y tardía, con el promedio mensual de la precipitación y las temperaturas, mínima y máxima. El programa COFECHA indicó una correlación entre series de $r = 0.44$ ($p < 0.01$). Se generaron dos cronologías, estándar y residual, de 74 años (1945-2019) de anillo total y las maderas, temprana y tardía. El análisis de función de respuesta indicó que se puede reconstruir, con base a la madera tardía, la precipitación de enero a marzo ($r = 0.65$, $p < 0.01$), la temperatura mínima de enero a diciembre ($r = 0.61$, $p < 0.01$) y la temperatura máxima anual ($r = 0.49$, $p < 0.01$). Los parámetros estadísticos dendrocronológicos indican que *P. oocarpa*, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas, tiene potencial dendrocronológico para estudios de variabilidad climática.

Palabras claves: *Pinus oocarpa*, potencial dendrocronológico, precipitación, temperatura, primavera.

Abstract

DENDROCHRONOLOGICAL POTENTIAL OF *Pinus oocarpa* Schiede AT THE
EJIDO SAN ISIDRO CHICHIHUISTAN, TEOPISCA, CHIAPAS

BY

MARÍA ISABEL LÓPEZ HERNÁNDEZ

MASTERS IN SCIENCE IN ENGINEERING OF PRODUCTION SYSTEMS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ELADIO HERIBERTO CORNEJO OVIEDO – ADVISER

The objective of this study was to determine the dendrochronological potential of *Pinus oocarpa* Schiede to reconstruct rainfall and maximum and minimum temperatures at the Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. A total of 108 incremente bored samples were collected from 54 trees. Dated samples represented 54% of the total and used for dendrochronological study. Average monthly rainfall and minimum and maximum temperature were obtained from 1946 to 2018. Response function analysis between growth rates and climate data was conducted. The COFECHA program indicated a correlation between series of $r=0.44$ ($p < 0.01$). Two chronologies, standard and residual, were generated for each of the three growth rates (total ring, early and latewood). The response function analysis showed that it is possible to reconstruct the rainfall from January to March ($r=0.65$, $p < 0.01$), the minimum temperature from January to December ($r = 0.61$, $p < 0.01$) and the maximum annual temperature ($r = 0.49$, $p < 0.01$) with the latewood. Statistical parameters indicated that *P. oocarpa* is an adequate proxy source for climate variability reconstruction studies.

Key words: *Pinus oocarpa*, dendrochronological potential, rainfall, temperature, radial growth.

INTRODUCCIÓN

México por su situación geográfica, condiciones climáticas, orográficas e hidrológicas, hacen que este expuesto a eventos hidrometeorológicos que pueden resultar en periodos de fuertes lluvias o severas sequías. La mayor parte de la dinámica atmosférica de verano en México está relacionada con la presencia de la Zona Inter-Tropical de Convergencia (ZITC) en el Pacífico del este (Landa, Magaña y Neri, 2008).

Las limitantes para el estudio de la variabilidad del clima y de los cambios que están ocurriendo en el mismo es la escasez de registros climáticos instrumentales (González, González, Villanueva y Cerano, 2017).

Los datos climáticos instrumentales son de periodos recientes y cortos y en algunos casos de dudosa calidad que impiden un análisis real de la variabilidad climática en el tiempo, por lo que, el uso de anillos de árboles para la reconstrucción de variables hidroclimáticas justifica plenamente estudios de este tipo, y que a la vez proporcionan información ecológica adicional para el manejo de ecosistemas (Fritts, 1976).

La variabilidad del clima, la composición atmosférica, las características físicas y químicas del suelo, entre otros, modifican la formación de los anillos, además, el efecto de otros factores puede ser registrado por los anillos (Salinas, 2017). Si el cambium del árbol sufre alguna herida causada por el fuego, los animales, golpes de piedras, el acontecimiento queda gravado en forma de cicatriz en el anillo (Gutiérrez, 2009).

Un anillo de crecimiento está conformado por madera temprana y tardía, la primera es la que se ve favorecida por condiciones como disponibilidad de agua y altas temperaturas, que dan como resultado un rápido crecimiento en diámetro, al disminuir la temperatura durante la segunda mitad del año, el crecimiento en

diámetro va disminuyendo, produciendo madera densa marcando así la diferencia con el anillo del año siguiente (González, 2001).

En condiciones normales, un árbol produce un anillo por año, sin embargo, puede producir varios anillos por año, conocidos como anillos falsos, estos se pueden formar por causas como una segunda floración en un periodo de crecimiento o después de la caída de hojas, un crecimiento discontinuo en el verano, que vuelve a ser activo al final de la misma estación de crecimiento (Monrey, 1977).

La dendrocronología se denomina como una disciplina científica que permite datar los anillos de crecimiento anuales, extraer, separar e interpretar la información que contienen de los diferentes factores que han influido en su crecimiento (Gutiérrez, 2009). Es así que los estudios dendrocronológicos resultan de gran relevancia para realizar reconstrucciones paleoclimáticas, debido a su alta resolución, que permiten analizar las fluctuaciones interanuales y multianuales del clima pasado (Fritts, 1976).

En México los estudios dendrocronológicos son cada vez más comunes, especialmente en bosques de coníferas del género *Pinus*, debido a la capacidad de las especies para producir anillos de crecimiento anual bien definidos que facilitan el análisis de las condiciones climáticas en periodos sin registro (Stahle *et al.*, 2000).

Por ejemplo, González *et al.* (2017) encontraron que los tres índices de anillo de *Pinus lumholtzii* Rob. & Fernald al sur del estado de Durango, tienen relación con la precipitación del periodo de noviembre del año previo a mayo del año actual de crecimiento

Cerano *et al.* (2014) encontraron que el anillo total de *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham., en el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán, tiene relación con la precipitación del periodo enero-mayo, con una correlación de 0.81

y es altamente significativo ($p < 0.01$), con base en ello lograron reconstruir la precipitación para 127 años (de 1884 a 2010).

Cerano *et al.* (2011) encontraron que la madera temprana de *Pseudotsuga menziessii* (Mirb.) Franco al sureste de Coahuila, y la temperatura de los meses de abril y julio presentaron correlaciones positivas y en la madera tardía los meses de marzo, abril, junio y julio.

Luna (2020) encontró que el anillo total de *Pinus teocote* Schiede ex Schldl en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey tiene relación con la temperatura mínima de los meses de noviembre y enero ($r = 0.18$ y 0.16 , respectivamente).

El número de especies para las cuales se ha determinado su potencial dendrocronológico ha ido en aumento; sin embargo, falta un gran número de especies por analizar (Cortés- Cortés *et al.*, 2021). El crecimiento radial de *P. oocarpa* tienen potencial dendrocronológico para reconstruir las variables climáticas (Gutiérrez ,2014; Villanueva-Díaz *et al.*, 2018; López-Hernández *et al.*, 2018).

Su amplia distribución de *P. oocarpa*, puede representar una alternativa para desarrollar una red de cronologías y analizar la variabilidad climática a nivel local y regional del estado de Chiapas.

El objetivo e hipótesis del presente trabajo fueron:

Objetivo

- Determinar el potencial dendrocronológico de *Pinus oocarpa* Schiede para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

Hipótesis

La hipótesis nula fue:

- Ho: El crecimiento del anillo total y de las maderas, temprana y tardía, de *Pinus oocarpa* Schiede no tienen potencial para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

La hipótesis alterna fue:

- Ha: El crecimiento del anillo total y de las maderas, temprana y tardía, de *Pinus oocarpa* Schiede tienen potencial para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

Localización geográfica

El área de estudio se localiza en el centro de Chiapas, en el Ejido San Isidro Chichihuistan (SIC), Teopisca, entre las coordenadas 16° 35' 50.63" latitud Norte y 92° 33' 41.24" longitud Oeste, a una elevación de 2072 msnm, pertenece a la Región de los Altos (Figura 1).

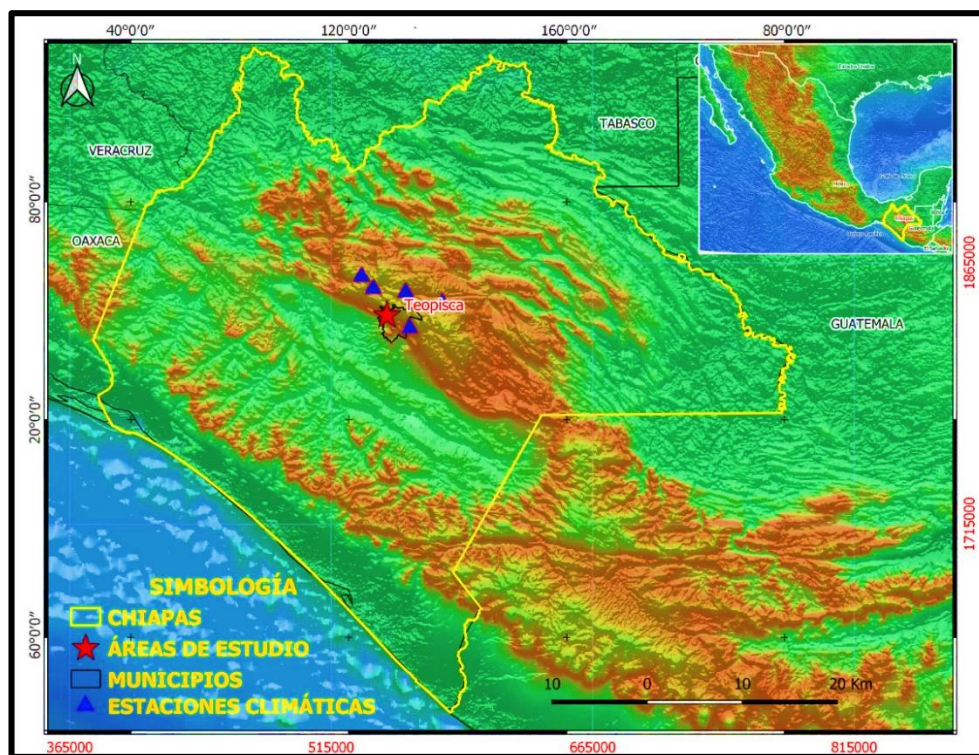


Figura 1. Ubicación geográfica del área de muestreo de *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas y las estaciones climatológicas consideradas para el análisis dendroclimático.

Hidrología

La región hidrológica que conforma SIC es Grijalva- Usumacinta, conformada por la cuenca Rio Grijalva-Tuxtla Gutiérrez y subcuenca Rio La Angostura (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2014a).

Geología

El origen de sus rocas es ígnea extrusiva (INEGI, 2003). Caracterizado por las rocas volcánicas típicas que se forman por el rápido enfriamiento de la lava y de fragmentos piroclásticos. Este proceso ocurre cuando el magma es expulsado por los aparatos volcánicos; ya en la superficie y al contacto con la temperatura ambiental, se enfría rápidamente desarrollando pequeños cristales que forman rocas de grano fino (no apreciables a simple vista) y rocas piroclásticas (Servicio Geológico Mexicano [SGM] 2017).

Edafología

Con base en la clasificación de la carta edafológica, para el estado de Chiapas, el tipo de suelo que presenta SIC es luvisol, son suelos que se encuentran sobre una gran variedad de materiales no consolidados, tales como las terrazas aluviales o los depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales. Son muy comunes en climas templados y fríos o cálidos húmedos con estacionalidad de lluvia y sequía. Son comunes en bosques de coníferas y selvas caducifolias del sur del país (INEGI, 2014b).

Clima

Con base en la clasificación de los tipos de climas de Köppen modificado por García (1998) para México y el climograma generado, el tipo de clima presente en el área de estudio SIC, Chiapas, es C (wz) (w) (Cuadro 1; Figura 2).

Cuadro 1. Descripción de la fórmula climática que ocurre en el Ejido de San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

Sitio	Fórmula climática	Descripción
San Isidro Chichihuistan	C (wz) (w)	Templado subhúmedo, los más húmedos de los subhúmedos, con precipitación en el mes, más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55. Temperatura media del

mes más frío entre -3° y 18°C y el mes más caliente mayor de 18°C .

Con base en los datos climáticos de las estaciones más cercanas al área de estudio SIC presenta una precipitación anual promedio de 1183 mm, encontrando en los meses de mayo a octubre el 84% de la lluvia total, las temperaturas se encuentran en el rango de 0.7° y 27°C (Figura 2).

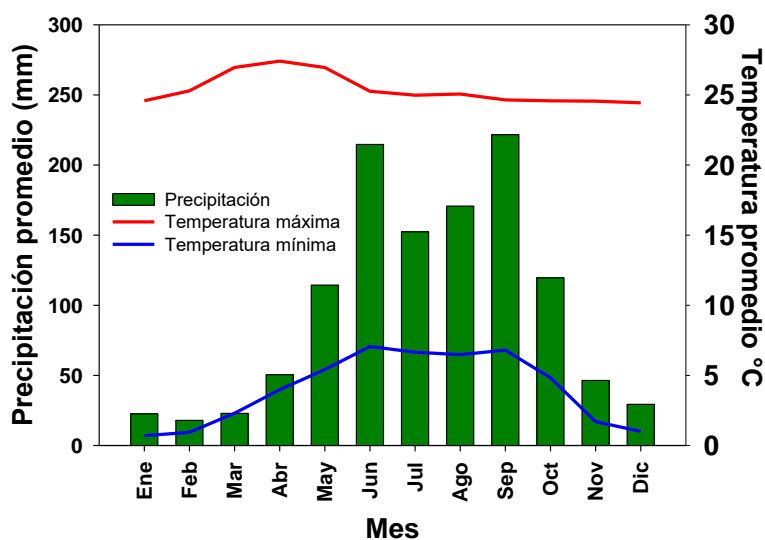


Figura 2. Climograma generado para la región de estudio de San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

Vegetación

La vegetación presente en SIC es de un bosque de pino, caracterizado por la morfología y la disposición de sus hojas, los pinos poseen una fisionomía particular y los bosques que forman presentan un aspecto difícilmente de confundir (Rzedowski, 2006; INEGI, 2016).

Trabajo de campo

Diseño de muestreo

El muestreo que se utilizó fue selectivo. Se seleccionaron 54 árboles de los más longevos y libres de daños mecánicos, plagas y enfermedades.

Colecta y extracción de muestras

La colecta y extracción de núcleos de crecimiento (virutas) se llevó a cabo en el periodo de junio 2019 y enero 2020. A cada árbol seleccionado se le extrajeron dos virutas a 1.30 m sobre el nivel del suelo (Figura 3). Las muestras se extrajeron con el apoyo del taladro de Pressler de diferentes longitudes con un diámetro de 5 mm.



Figura 3. Extracción de núcleos de crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede, en el centro del estado de Chiapas, empleando el taladro de Pressler.

Etapas de laboratorio

Las muestras se prepararon para su análisis en el Laboratorio de Ingeniería Forestal del Departamento Forestal, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila. Las muestras se montaron en una moldura de madera, cuidando que las traqueidas estuvieran en posición vertical para tener una mejor apreciación de los anillos de crecimiento. Cada muestra se pegó con pegamento 850 y se ajustó a la moldura con cinta adhesiva. Posteriormente, las muestras se lijaron para resaltar las estructuras de crecimiento, utilizando lijas de las más gruesas (grano de 120) a las más finas (grano de 1,200) (Figura 4).



Figura 4. Muestras de *Pinus oocarpa* Schiede en el proceso de lijado en el Laboratorio de Ingeniería Forestal del Departamento Forestal, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila.

Análisis dendrocronológico

Pre – fechado de crecimientos anuales

El pre-fechado de las muestras se hizo en el Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA, INIFAP, Gómez Palacio, Durango. Primeramente, con el apoyo de un estereomicroscopio, se contaron los anillos en todas las muestras, con esto se determinó la edad aproximada de cada árbol. Finalmente, el pre-fechado se hizo mediante la técnica de Skeleton plots (gráficos de crecimiento) (Stokes y Smiley, 1996).

Medición de los anillos anuales

Una vez concluido el pre-fechado, se midió el crecimiento total anual, la longitud de madera temprana y de la madera tardía para todas las muestras, por lo cual se empleó un sistema de medición Velmex con platina de fase deslizante y una precisión de 0.001 mm, misma que está conectada a una computadora. Para una mejor apreciación de los anillos de crecimiento se usó un estereoscopio con una retícula graduada que permite marcar el límite del anillo. Las bases de datos que se obtuvieron de esta medición se guardaron en la computadora para lo cual se usó el software Measure J2X.

Verificación del fechado y generación de cronologías

Los archivos generados del sitio se ingresaron al programa COFECHA, para verificar la calidad de fechado y su medición (Holmes, 1983). El programa analiza

estadísticamente el fechado de cada serie correlacionando sucesivamente segmentos de 50 años con traslapes de 25 años, compara cada serie individual con todas las muestras y con la serie promedio, con base en este procedimiento se identifican errores de anillos ausentes y falsos.

Una vez verificada la calidad del fechado y la medición con el programa COFECHA, se procedió a utilizar el programa ARSTAN para generar cronologías a partir de las series de ancho de anillo (anillo total, madera temprana y madera tardía). Mediante dicho programa se estandariza cada serie individual, al remover la varianza debido a factores biológicos, como competencia y liberación, y geométricos (el área de fuste se incrementa con la edad y el crecimiento anual tiende a disminuir al distribuirse en una mayor superficie) no relacionadas con el clima (Cook, 1987).

El programa ARSTAN maximiza la varianza debida a factores ambientales que afecten a la población en conjunto (factores climáticos). Con el programa ARSTAN se generaron tres cronologías (Arstan, Estándar y Residual). Para cada serie individual se obtuvo un índice de crecimiento, al dividir el valor del ancho del anillo (madera temprana y madera tardía) entre el valor correspondiente de la curva; finalmente, se promediaron los índices anuales de las series individuales para producir la cronología correspondiente. Para el caso del presente estudio se empleó la versión estándar y residual.

Obtención de datos climáticos

Para determinar la relación entre la variabilidad climática y el crecimiento de *P. oocarpa*, se descargaron de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) los datos de clima (precipitación y temperaturas, mínimas y máximas) de cinco estaciones meteorológicas cercanas a SIC (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas empleadas para el análisis dendroclimatológico de *Pinus oocarpa* Schiede, en el estado de Chiapas.

Sitio	ID	Estación	Longitud (Oeste)	Latitud (Norte)	Altitud (msnm)	Período de datos
San Isidro Chichihuistan	7144	San Cristóbal de las Casas	92.63	16.73	2115	1946-2018
	7007	Amatenango del Valle	92.43	16.52	1820	1965-2017
	7076	Huixtan (CFE)	92.45	16.71	1990	1961-2005
	7030	San Juan Chamula	92.69	16.79	1930	1961-2017
	7031	Chanal	92.26	16.65	2100	1969-2016

Análisis estadístico

Se realizaron pruebas estadísticas de correlación de Pearson entre el índice de ancho del anillo y los datos climáticos, esto con la finalidad de observar que variable climática (precipitación mensual, temperatura mínima y temperatura máxima) y qué periodo del año (mensual, bimensual, estacional o acumulado) influye más en el crecimiento de *P. oocarpa*. En Excel se realizaron los análisis de correlación, este método consiste en correlacionar la cronología (estándar y residual) de anillo total, madera temprana y madera tardía con los registros climáticos (precipitación y temperaturas, mínima y máxima).

Primeramente, se corrió un análisis a nivel mensual, se definieron los meses con mayor correlación, posteriormente, el período estacional que más influye en el crecimiento. El análisis se realizó con variables climáticas del año previo (de julio a diciembre) y del año actual (de enero a diciembre) de crecimiento, debido a que el crecimiento de los árboles está influido por las condiciones climáticas del año actual y del año previo, es decir, se abarcó 18 meses. Así mismo, estos análisis de correlación se verificaron y validaron estadísticamente ($p < 0.05$) utilizando el programa STATISTICA Kernel Reléase 5.5 (Stat Soft Inc., 2000). Finalmente, se corrieron modelos de regresión y se determinó la cronología más apropiada para ser empleada como proxy para reconstruir una variable climática en específico, esto con base a que, dicha cronología explica la mayor variabilidad de determinada variable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fechado

De un total de 108 virutas de 54 árboles de *P. oocarpa* colectadas se fecharon 56 muestras de 34 árboles. Lo anterior representa el 54% de las muestras del sitio, el 46% restante se descartó porque presentó bajas correlaciones entre los patrones de crecimiento.

Estudios realizados para otras coníferas en México, han tenido dificultad para sincronizar y fechar las muestras, por ejemplo, González *et al.* (2017) de 415 muestras procesadas de *P. lumholtzii* al sur del estado de Durango lograron sincronizar y fechar 258 (62 %), a lo que lo atribuyen a que la especie presentó gran cantidad de anillos falsos y perdidos y existe más dificultad para sincronizar y fechar muestras provenientes de árboles viejos.

López-Hernández *et al.* (2018) de un total de 65 muestras de 34 árboles de *P. oocarpa* en Chiapas lograron fechar 30 muestras (46%) de 22 árboles; el 54% de las muestras no fechadas lo atribuyen a problemas de crecimiento debido a que la especie presentó alto porcentaje de anillos falsos y períodos de supresión.

Cortés-Cortés *et al.* (2021) reportan que de un total de 80 muestras colectadas de *Pinus montezumae* Lamb en Guerrero lograron fechar el 75%; el 25% no fechadas lo atribuyen a que la especie presenta bajas correlaciones entre los patrones de crecimientos debido a la presencia de anillos falsos.

El éxito en la sincronización y fechado de las muestras depende de las condiciones del sitio donde crecen los árboles y de las edades, ya que pueden variar de 31 % (árboles mayores de 200 años) a 62 o 90% (de todas las edades) (Villalba, 1990; Lara y Villalba, 1993; Fuentes y Patricio, 1995; González *et al.*, 2017).

Con relación a los resultados de COFECHA indicaron una correlación altamente significativa ($p < 0.01$) entre series ($r = 0.44$). Dado que el programa COFECHA establece para el exacto fechado y calidad de respuesta climática como mínima correlación significativa entre series de $r = 0.3281$ ($p < 0.01$) (Holmes, 1983). La sensibilidad media obtenida fue 0.25. Los valores estadísticos obtenidos para fines dendrocronológicos se consideran adecuados y fueron similares a los generados para otras especies del centro y sur de México consideradas con buen potencial dendrocronológico (Cuadro 3).

Cuadro 3. Parámetros estadísticos de cronologías estudiadas en trabajos previos y el presente realizado en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

Especie	Longitud de la serie	Correlación (r)	Sensibilidad media	Autor
<i>Abies religiosa</i>	1884-2010	0.473		Cerano <i>et al.</i> (2014)
<i>Taxodium mucronatum</i> Ten	1521-2012	0.39	0.41	Villanueva-Díaz <i>et al.</i> (2014)
<i>Juniperus monticola</i> Martínez	1750-2013	0.55	0.41	Villanueva-Díaz <i>et al.</i> (2016)
<i>Abies guatemalensis</i> Rehder	1810-2015	0.57	0.31	Aquino-Ramírez <i>et al.</i> (2019)
<i>Pinus montezumae</i> Lamb	1790-2017	0.57	0.31	Cortés-Cortés <i>et al.</i> (2021)
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede	1945-2019	0.44	0.25	Estudio actual

Respuesta del crecimiento de *P. oocarpa* a la precipitación

El anillo total, la madera temprana y la madera tardía presentan respuestas similares a la precipitación mensual en los 18 meses (de julio a diciembre del año anterior y de enero a diciembre del año del anillo) (Figura 5).

Con respecto a los análisis de correlación entre la cronología estándar se encontró correlación negativa entre la precipitación con el mes de julio del año previo, además con los meses de julio, septiembre y octubre del año actual en el anillo total y las maderas, temprana y tardía. Para la cronología residual, la precipitación, en los meses de julio y octubre del año actual se correlacionó negativamente en los tres índices de anillo (Figura 5).

En las cronologías, estándar y residual, se hallaron correlaciones significativas ($p < 0.05$) y altamente significativas ($p < 0.01$) entre la precipitación mensual de diciembre a marzo y el anillo total, la madera temprana y la madera tardía (Figura 5).

En la cronología estándar se encontraron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre la precipitación del periodo de primavera y el anillo total, la madera temprana y la madera tardía ($r = 0.48, 0.45$ y 0.34 , respectivamente). Mientras que para la cronología residual en ese mismo periodo se encontraron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) para los tres índices de anillo ($r = 0.51, 0.50$ y 0.34 , correspondientemente) (Figura 5).

En la cronología estándar se hallaron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre la precipitación del periodo de enero a marzo y los tres índices de anillo ($r = 0.61, 0.58$ y 0.65 , respectivamente) (Figura 5; Cuadro 4).

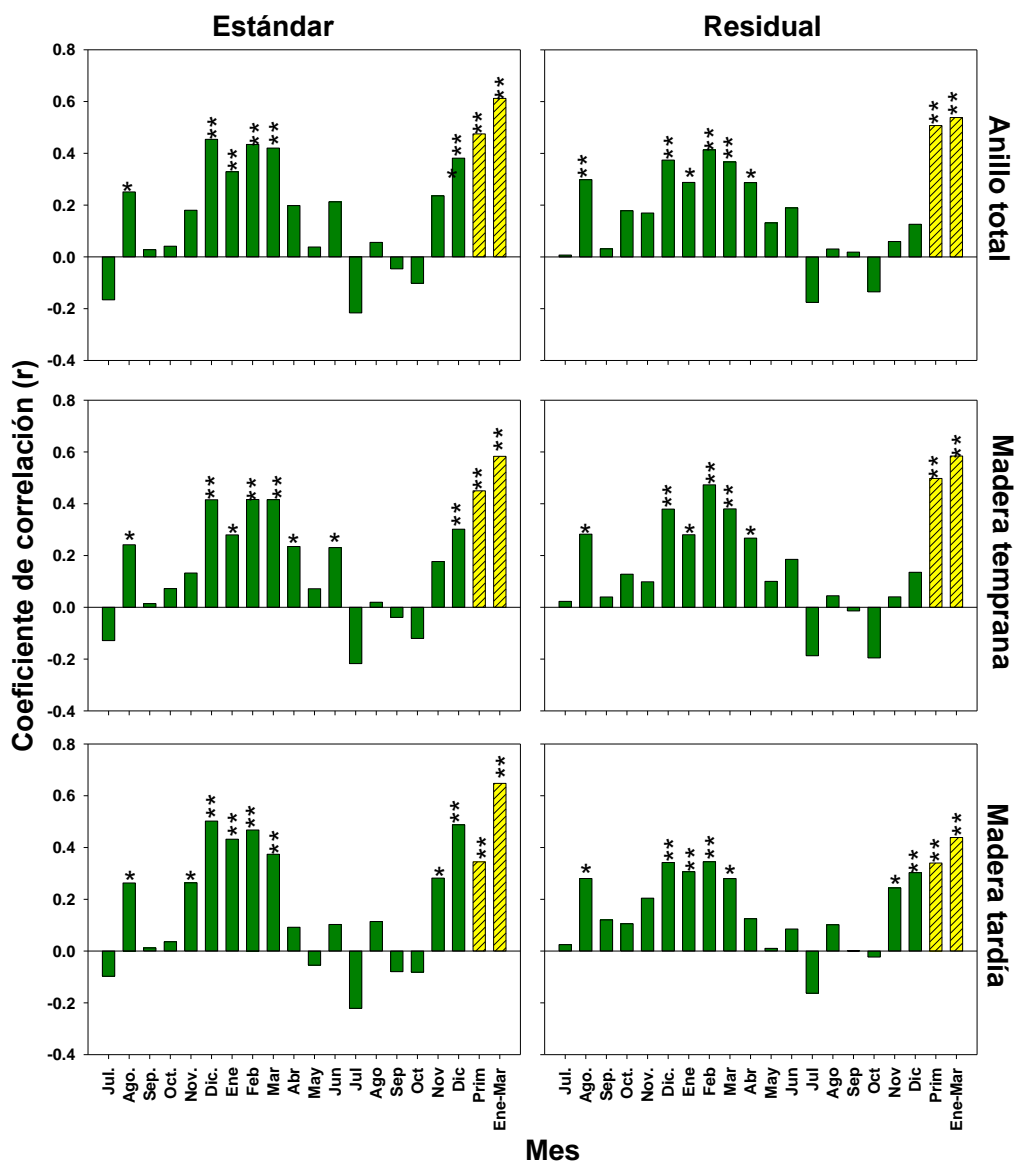


Figura 5. Coeficientes de correlación entre la precipitación mensual, para los periodos de primavera (Prim; de 1957 a 2014) y enero a marzo (de 1946 a 2014) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

Cuadro 4. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la precipitación de enero a marzo y los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R^2		$Pr>F$	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
	Intercepto	-7.25	-19.23	0.61	0.54	0.37	0.29	<0.146	<0.026
	Anillo total	29.84	40.85					<0.000	<0.000
Precipitación enero-marzo	Intercepto	-6.48	-16.42	0.58	0.58	0.34	0.34	<0.215	<0.022
	Madera temprana	28.86	38.36					<0.000	<0.000
	Intercepto	-3.64	-9.37	0.65	0.44	0.42	0.19	<0.361	<0.264
	Madera tardía	27.15	31.28					<0.000	<0.001

En la cronología residual se hallaron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre la precipitación del periodo de enero a marzo y el anillo total, las maderas, temprana y tardía con valores de $r = 0.54$, 0.58 y 0.44 , respectivamente (Figura 5; Cuadro 4).

En la cronología residual, uno de los periodos mensual de lluvia que influyó de manera altamente significativo ($p < 0.01$) en el anillo total de *P. oocarpa* fue el de primavera con una $r = 0.51$ (Figura 6). Similarmente en la cronología estándar, el periodo de enero a marzo en la madera tardía, mostró una correlación altamente significativa ($p < 0.01$) de $r = 0.65$ (Cuadro 4; Figura 6). Lo anterior indica el potencial para generar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la precipitación de primavera o de enero a marzo para los últimos 74 años en el Ejido San Isidro Chichihuistan.

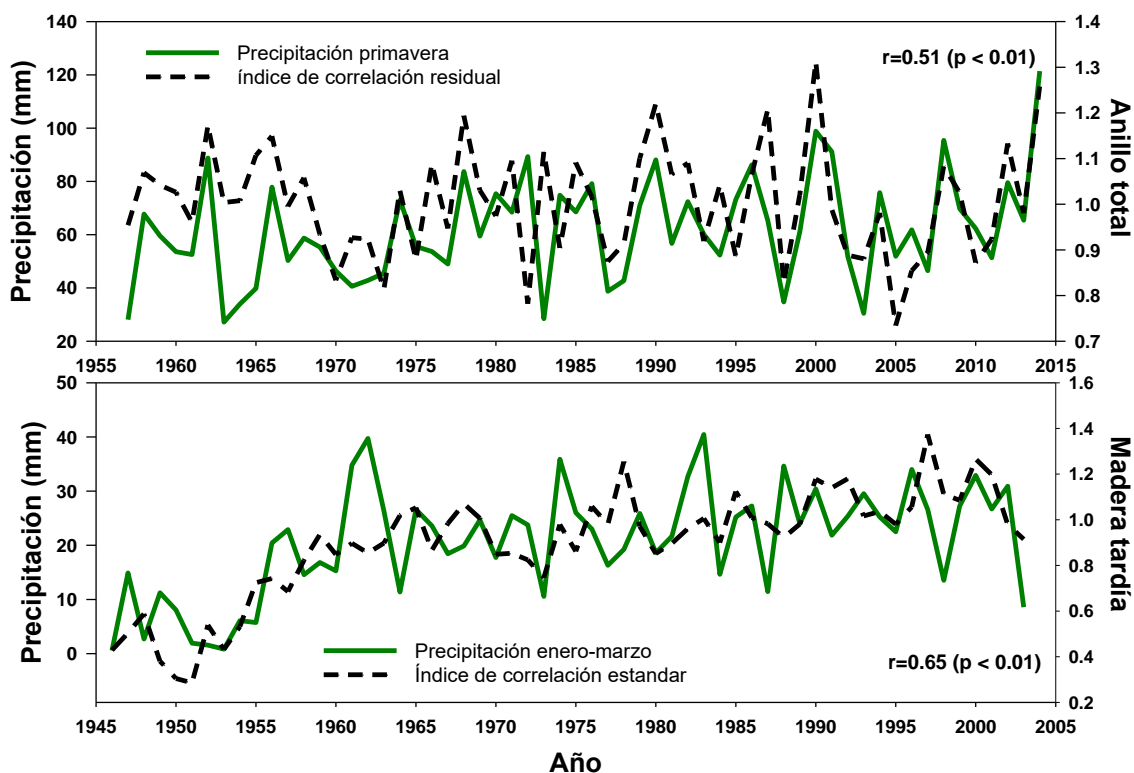


Figura 6. Correlación del anillo total y la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la precipitación mensual en los periodos de primavera y de enero a marzo, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

El incremento radial de *P. oocarpa* responde a la precipitación de manera positiva y negativa (Figura 5). El crecimiento de los árboles en condiciones hídricas no limitantes puede mostrar una respuesta negativa a la precipitación, esta respuesta puede atribuirse a las condiciones típicas de los climas lluviosos, en que la abundante nubosidad reduce considerablemente la radiación solar, la tasa fotosintética, la asimilación de carbohidratos y el crecimiento de los árboles (Min y Wang 2008).

El crecimiento de los árboles parece depender no sólo de la disponibilidad de agua, sino también de las reservas de carbohidratos y nutrientes almacenados en temporadas de crecimiento anteriores (Rutherford, 1984). Además de esto, la disponibilidad de agua involucra más factores que la precipitación solamente y depende de las características de la vegetación y el tipo de suelo (Alexandre, 1977).

La relación entre el ancho de anillo y variables climáticas se obscurece por la influencia de otros factores y en algunos estudios las relaciones no explican más del 28% de la variación entre los anillos y el clima (Trouet, Esperb y Beeckman, 2010). En contraste al presente estudio, en la cronología estándar de la madera tardía de *P. oocarpa* explica el 42% de la variabilidad de la precipitación del periodo de enero a marzo (invierno). Pero es similar en el periodo de marzo a mayo (primavera) que explica el 26% de la variabilidad de la precipitación.

A diferencia de la respuesta del crecimiento de *P. oocarpa* en Chiapas, las coníferas de México responden a diversos periodos de la lluvia estacional, esto ha sido corroborado por diversos estudios.

Gutiérrez (2014) encontró que el anillo total de *P. oocarpa* en Los Tuxtlas, Veracruz, tiene relación con la precipitación de invierno-primavera, siendo las correlaciones máximas en los meses de diciembre, enero y junio ($r = 0.36, 0.38$ y 0.46 , respectivamente). En contraste, en este estudio en la cronología estándar

se encontró las correlaciones máximas en los meses de diciembre del año previo y enero, febrero, marzo y diciembre del año actual ($r = 0.45, 0.33, 0.43, 0.42$ y 0.38 , respectivamente).

Cerano *et al.* (2014) encontraron que el anillo total de *A. religiosa* en el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán, tiene relación con la precipitación del periodo enero-mayo (invierno-primavera) y responde altamente significativo ($r = 0.81$; $p < 0.001$). Lo cual es similar a lo encontrado en el presente estudio, *P. oocarpa* responde altamente significativo ($p < 0.01$) al periodo de enero a marzo en los tres índices de anillo de la cronología estándar ($r = 0.61, 0.58$ y 0.65 , respectivamente).

Villanueva-Díaz *et al.* (2018) en el Bosque La Primavera, Jalisco, en la cronología residual hallaron relación entre la madera temprana de *P. oocarpa* y la precipitación acumulada de octubre a mayo ($r = 0.77$). En contraste, en este estudio las correlaciones más altas se encontraron en el periodo acumulado de primavera ($r = 0.51$) y enero a marzo ($r = 0.65$).

Aquino-Ramírez *et al.* (2019) encontraron que la madera temprana de *Abies guatemalensis* en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, tiene relación con la precipitación estacional acumulada de marzo-abril con la cronología residual de madera temprana ($r = 0.60$; $p < 0.05$) y con la cronología estándar de madera tardía ($r = 0.60$, $p < 0.05$). Lo cual es similar a lo encontrado en el presente estudio, *P. oocarpa* responde altamente significativo ($p < 0.01$) al periodo de marzo-mayo en la cronología residual de madera temprana con una $r = 0.50$ y en la cronología estándar de la madera tardía con $r = 0.34$.

Cortés-Cortés *et al.* (2021) en Coyuca de Catalán, Guerrero, encontraron que el periodo de precipitación que más influyó en los tres índices de anillo de *P. montezumae* fue el de primavera en la cronología estándar con correlaciones altamente significativas ($r = 0.66, 0.65$ y 0.54 , respectivamente; $p < 0.01$). Lo cual

es similar a lo encontrado en el presente estudio, el crecimiento del anillo total, las maderas, temprana y tardía de *P. oocarpa* está influenciado por ese mismo periodo y responde de manera altamente significativa ($p < 0.01$).

Las cronologías en el norte y centro de México responden a diversos periodos de lluvia, mientras que las cronologías del sur de México responden principalmente a la precipitación de primavera, este patrón puede estar relacionado con anomalías en la fecha de inicio del Sistema de Monzones de América del Norte (NAMS, por sus siglas en inglés), que se caracteriza por lluvias intensas a partir de mediados de mayo a lo largo de la costa occidental de México, avanzando hacia el suroeste de Estados Unidos hasta los meses de julio y agosto (Therrell, Stahle, Cleaveland y Villanueva-Díaz, 2002).

Respuesta del crecimiento de *P. oocarpa* a la temperatura mínima

Los índices de crecimiento de *P. oocarpa* con relación a los análisis de correlación entre la cronología estándar y los datos de temperatura mínima mensual para el periodo de 1946 al 2018 indicaron que la temperatura promedio mensual mostró correlaciones positivas con el anillo total, para los 18 meses (de julio a diciembre y enero a diciembre) (Figura 7).

En la cronología estándar se encontró correlación altamente significativa ($p < 0.01$) en el mes de noviembre del año previo y actual en los tres índices de anillo. Mientras que, para la cronología residual, únicamente noviembre del año actual respondió altamente significativo ($p < 0.01$) para el anillo total, las maderas, temprana y tardía (Figura 7).

En las cronologías, estándar y residual se hallaron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre el periodo de temperatura mínima de primavera (de 1946 a 2001) en los tres índices de anillo, para la cronología estándar valores de $r = 0.54$, 0.48 y 0.56 , respectivamente, para la cronología residual valores de $r = 0.38$, 0.36 y 0.40 , correspondientemente (Figura 7; Cuadro 5).

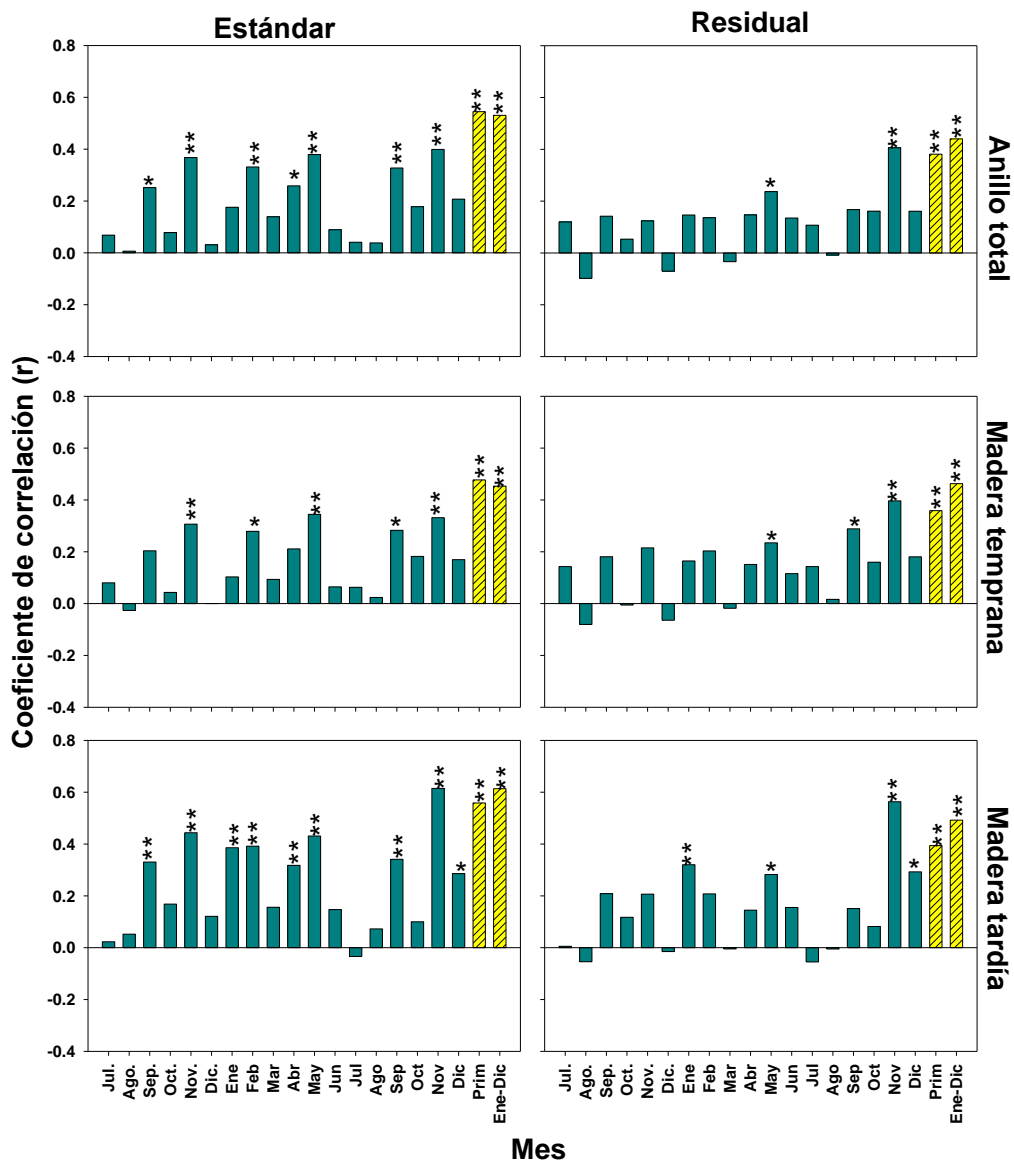


Figura 7. Coeficientes de correlación entre la temperatura mínima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1946 a 2001) y enero a diciembre (de 1946 a 2001) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

En la cronología estándar, se encontraron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre la temperatura mínima acumulada del periodo de enero a diciembre y el anillo total y las maderas, temprana y tardía ($r = 0.53, 0.45$ y 0.61 , en ese orden). Para la cronología residual se encontraron correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$) entre la temperatura mínima del citado periodo y los tres índices de anillo ($r = 0.44, 0.46$ y 0.49 , correspondientemente) (Figura 7; Cuadro 5).

En la cronología estándar, el periodo de temperatura mínima de primavera influyó de manera altamente significativa ($p < 0.01$) en la madera tardía de *P. oocarpa* con una $r = 0.56$ (Figura 8; Cuadro 5). Similarmente, el periodo de enero a diciembre mostró una correlación de $r = 0.61$ (Cuadro 5; Figura 8). Lo anterior indica el potencial para general un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la temperatura mínima de primavera y anual para los últimos 74 años en el Ejido San Isidro Chichihuistan.

Cuadro 5. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R²) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre la temperatura mínima promedio del periodo de primavera, enero a diciembre y los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede, en el Ejido San Isidro Chichihuitan, Teopisca, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R2		Pr>F	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
Temperatura mínima primavera	Intercepto	0.69	0.24	0.54	0.38	0.30	0.15	<0.297	<0.841
	Anillo total	3.28	3.60					<0.000	<0.004
	Intercepto	1.01	0.93	0.48	0.36	0.23	0.13	<0.156	<0.365
	Madera temprana	2.92	2.92					<0.000	<0.006
	Intercepto	1.18	0.41	0.56	0.39	0.31	0.16	<0.033	<0.707
Temperatura mínima enero-diciembre	Madera tardía	2.89	3.48					<0.000	<0.003
	Intercepto	1.48	0.60	0.53	0.44	0.28	0.19	<0.008	<0.519
	Anillo total	2.60	3.39					<0.000	<0.001
	Intercepto	1.79	0.94	0.45	0.46	0.21	0.21	<0.003	<0.238
	Madera temprana	2.26	3.08					<0.000	<0.000
	Intercepto	1.61	0.50	0.61	0.49	0.38	0.24	<0.000	<0.548
	Madera tardía	2.59	3.55					<0.000	<0.000

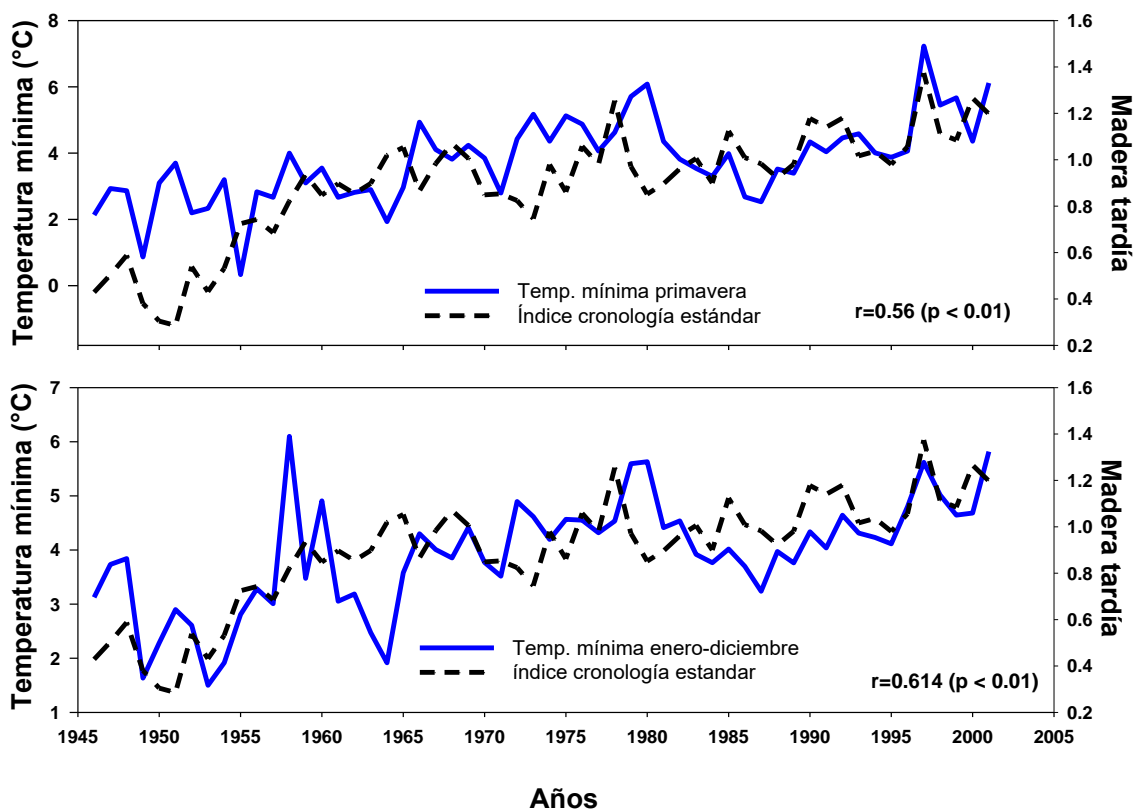


Figura 8. Correlación de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura mínima mensual en los periodos de primavera y de enero a diciembre, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

El crecimiento radial de *P. oocarpa* se correlaciona positiva y altamente significativa ($p < 0.01$) con las cronologías de anillo total y las maderas temprana y tardía, a la temperatura mínima del periodo de primavera y enero a diciembre (Figura7; Cuadro 5).

Estudios dendroclimáticos en México han encontrado respuestas diferentes entre el crecimiento radial de las coníferas y las temperaturas mínimas, por ejemplo, Cerano *et al.* (2011) encontraron que la temperatura no influyo de manera significativa en el crecimiento ($p > 0.05$) de la madera temprana de *Pseudotsuga menziessii* al sureste de Coahuila, los meses de abril y julio presentaron correlaciones positivas y en la madera tardía los meses de marzo, abril, junio y julio. En contraste con el presente estudio, *P. oocarpa* presenta correlaciones

altamente significativas ($p < 0.01$) en el periodo de primavera y el periodo de enero a diciembre.

Cerano *et al.* (2014) encontraron que el anillo total de *A. religiosa* en Michoacán, tiene relación con la temperatura media y mínima de los meses de enero y febrero y responde significativamente ($r = 0.37$ y 0.29 , respectivamente; $p < 0.05$), el mes de mayo influye de forma altamente significativa ($p < 0.01$; $r = 0.45$). En contraste a este estudio, el anillo total de *P. oocarpa* tiene relación positivamente con la temperatura mínima del mes de enero con una $r = 0.18$, mientras que febrero y mayo influyeron de manera altamente significativa ($p < 0.01$) con correlación de $r = 0.33$ y 0.38 , correspondientemente.

Chávez-Gándara *et al.* (2017) en San Dimas, Durango, en *Pinus durangensis* Ehren, *Pinus cooperi* C. E Blanco y *P. lumholtzii*, encontraron que existe una relación positiva, altamente significativa ($p < 0,01$), entre las temperaturas mínimas y el crecimiento del anillo total y las maderas temprana y tardía, en el mes de enero, dicha relación sólo es significativa ($p < 0,05$) para la madera tardía en el mes de febrero. Lo cual es similar a lo encontrado en el presente estudio, la madera tardía de *P. oocarpa* responde de manera altamente significativa ($p < 0.01$) a la temperatura mínima del mes de enero y febrero, para el anillo total el mes de enero responde de manera altamente significativa ($p < 0.01$) y en la madera temprana ese mismo mes responde de forma significativa ($p < 0.05$).

Gutiérrez-García y Ricker (2019) hallaron que el crecimiento radial de *Abies vejarii* Martínez y *Pinus strobiformis* Engelman al sureste de Nuevo León y la temperatura mínima se correlacionaron negativamente en los meses de mayo y junio del año actual, respectivamente. En contraste al presente estudio, *P. oocarpa* responde positivamente en esos meses, el mes de mayo responde altamente significativo ($p < 0.01$) en la cronología estándar y en la cronología residual significativo ($p < 0.05$).

Luna (2020) encontró que el anillo total de *P. teocote* en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey tiene relación con la temperatura mínima de los meses de noviembre y enero, estos fueron los que presentaron mayor correlación de $r = 0.18$ y 0.16 , respectivamente. En contraste al presente estudio, el anillo total de *P. oocarpa* tiene relación con la temperatura mínima, los meses de septiembre, noviembre, febrero, mayo, septiembre y noviembre fueron los que presentaron la mayor correlación ($r = 0.25, 0.37, 0.33, 0.38, 0.33$ y 0.40 , respectivamente).

El rango óptimo para la realización de la fotosíntesis de algunas coníferas se encuentra entre 15 y 25°C , disminuyendo gradualmente a ambos extremos (Meinzer, 1982; Smith y Hinckley, 1995).

Lo, Blanco, Seely, Welham y Kimmins (2010) en su estudio realizado en Canadá con *Pseudotsuga menziessii*, *Pinus contorta* Douglas ex Loudon y *Picea glauca* Moench, mencionan que la relación con la asociación positiva de la temperatura se debe a la disponibilidad de agua, que contribuye a extender la estación de crecimiento; por consiguiente, el árbol genera más biomasa y por tanto mayor crecimiento.

Chávez-Gándara *et al.* (2017) atribuyen que la relación positiva entre la temperatura mínima y el crecimiento radial del árbol en los meses de enero y febrero se debe a que en esos meses se registran las menores temperaturas mínimas promedio del sitio, lo cual se relaciona con una menor evaporación y por lo tanto mayor humedad en el suelo, agua que el árbol tiene disponible para emplear al inicio de la estación de crecimiento.

La explicación de que *P. oocarpa* responde positivamente a la temperatura mínima es por la importancia de la humedad del sitio, por lo que responden positivamente a la precipitación de marzo a mayo y de enero a diciembre, con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

Respuesta del crecimiento de *P. oocarpa* a la temperatura máxima

El crecimiento radial de *P. oocarpa* indicó una relación negativa con la temperatura máxima del mes de agosto y septiembre del año previo para el anillo total y madera temprana de la cronología estándar. Para la madera tardía en esa misma cronología agosto de año previo y actual respondió negativamente (Figura 9).

En la cronología residual, la temperatura máxima en los meses de julio, agosto, septiembre, octubre y diciembre del año anterior se correlacionó de manera negativa para los tres índices de anillo (Figura 9).

En la cronología estándar, la temperatura máxima en el periodo de primavera se correlacionó de forma altamente significativa ($p < 0.01$); $r = 0.43$) con la madera tardía. La temperatura máxima en el citado periodo sólo respondió positivamente en el anillo total y madera temprana ($r = 0.24$ y 0.05 , en ese orden) (Figura 9).

En la cronología estándar, la temperatura máxima en el periodo de enero a diciembre se correlacionó altamente significativa ($p < 0.01$) con el anillo total, la madera temprana y madera tardía ($r = 0.42$, 0.36 y 0.49 , correspondientemente). Para la cronología residual se encontraron correlaciones positivas entre la temperatura máxima del citado periodo y el anillo total y madera temprana ($r = 0.20$ y 0.18 , respectivamente), en la madera tardía respondió altamente significativa ($p < 0.01$; $r = 0.36$) (Figura 9; Cuadro 6).

En la cronología estándar, el periodo de temperatura máxima que más influyó de manera altamente significativa ($p < 0.01$) en la madera tardía de *P. oocarpa* fue de enero a diciembre con una $r = 0.49$ (Cuadro 6; Figura 10). Lo anterior indica el potencial para generar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la temperatura máxima anual para los últimos 74 años en el Ejido San Isidro Chichihuistan.

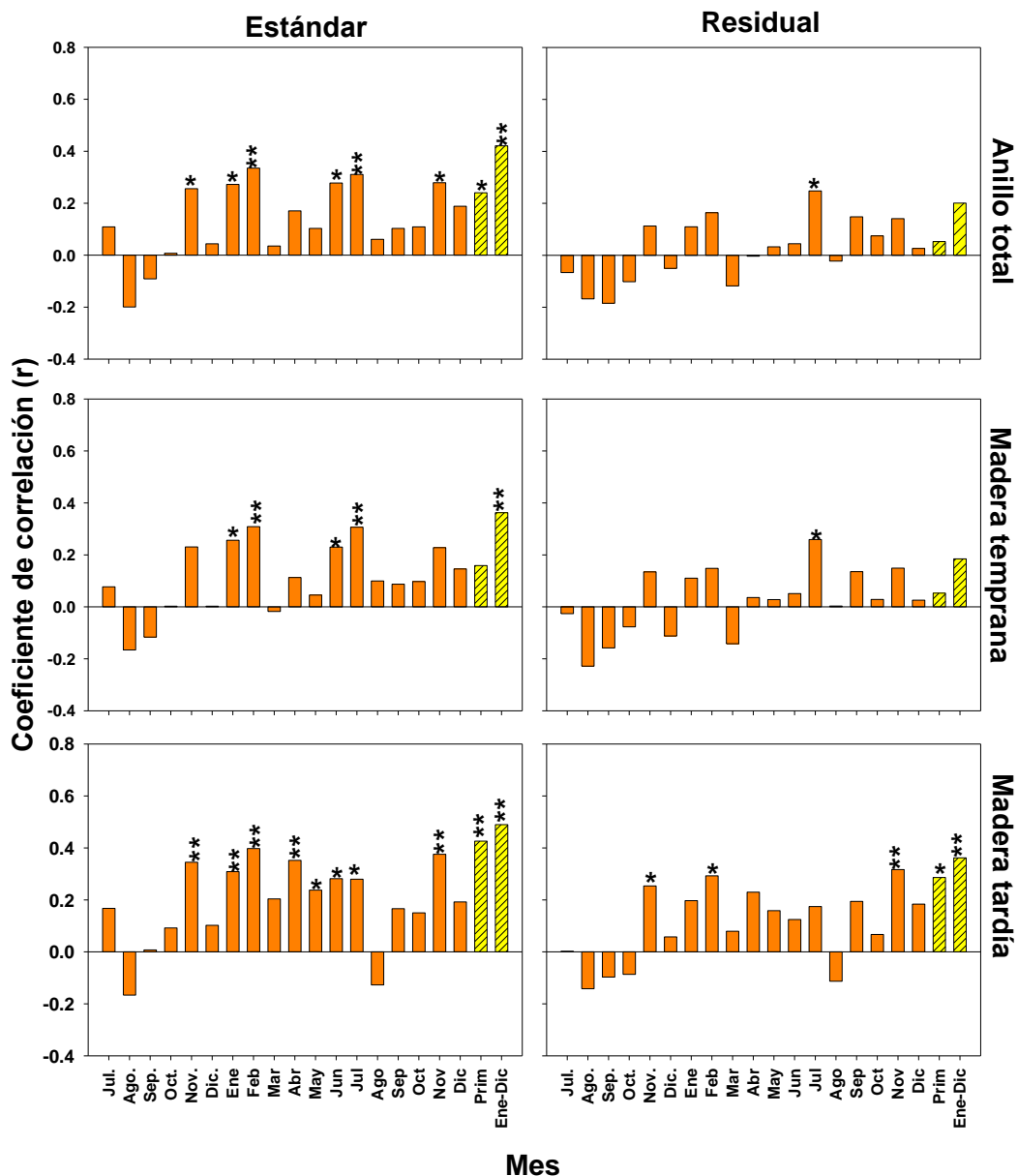


Figura 9. Coeficientes de correlación entre la temperatura máxima mensual, para los períodos de primavera (Prim; de 1946 a 2002) y enero a diciembre (de 1946 a 2002) con el índice de ancho de anillo total, maderas, temprana y tardía, en las dos cronologías, estándar y residual para *Pinus oocarpa* Schiede en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas. (*) Representa los meses con correlaciones significativas ($p < 0.05$) y (**) los meses con correlaciones altamente significativas ($p < 0.01$).

Cuadro 6. Coeficientes de regresión, sus valores estimados, coeficientes de correlación (r) y de determinación (R^2) y significancia de los valores estimados del modelo de regresión entre temperatura máxima de enero a diciembre con los índices de crecimiento, anillo total, madera temprana y madera tardía, de la cronología estándar (Est) y residual (Res) de *Pinus oocarpa* Schiede., en el Ejido San Isidro Chichihuitan, Teopisca, Chiapas.

Variable climática	Modelo	Parámetros estimados		r		R ²		Pr>F	
		Est	Res	Est	Res	Est	Res	Est	Res
Temperatura									
máxima	Intercepto	23.81	24.16	0.42	0.20	0.18	0.04	<0.000	<0.000
enero-diciembre	Anillo total	1.68	1.26					<0.001	<0.134
	Intercepto	24.00	24.42	0.36	0.18	0.13	0.03	<0.000	<0.000
	Madera temprana	1.47	1.00					<0.006	<0.169
	Intercepto	23.88	23.35	0.49	0.36	0.24	0.13	<0.000	<0.000
	Madera tardía	1.68	2.12					<0.000	<0.006

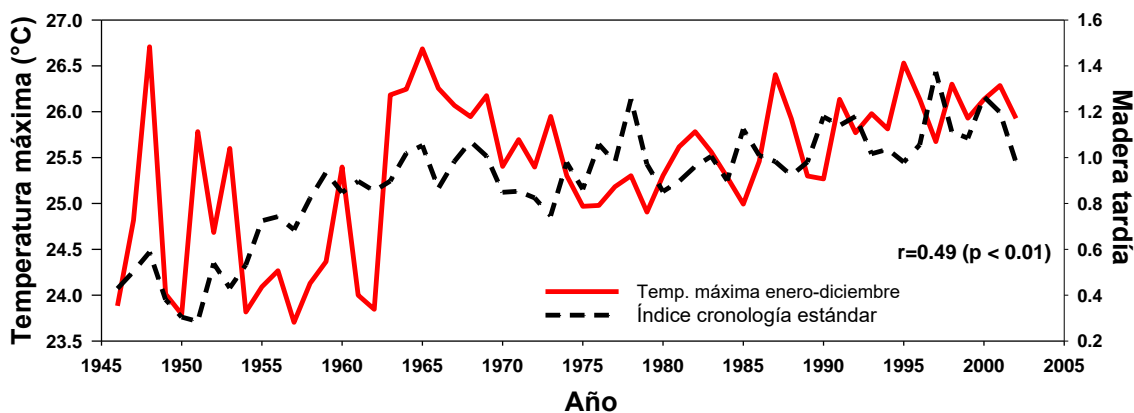


Figura 10. Correlación de la madera tardía de *Pinus oocarpa* Schiede y la temperatura máxima en el periodo de enero a diciembre en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca, Chiapas.

En la cronología estándar, el crecimiento radial de *P. oocarpa* respondió a la temperatura máxima en la mayoría de los meses positivamente y con las más altas correlaciones en la madera tardía (Figura 9).

Cerano *et al.* (2014) encontraron que el anillo total de *A. religiosa* en Michoacán y la temperatura máxima del mes de febrero tiene una relación negativa y altamente significativa ($r = -0.379$; $p < 0.01$). Similar a lo encontrado en el presente estudio, el anillo total de *P. oocarpa* y la temperatura máxima de febrero responde altamente significativo ($p < 0.01$) y positivo con una $r = 0.34$.

Chávez-Gándara *et al.* (2017) en Durango en *P. durangensis*, *P. cooperi* y *P. lumholtzii*, analizaron la respuesta climática, donde las temperaturas máximas de los meses de marzo y abril presentaron las correlaciones más bajas tanto para anillo total como para madera temprana ($r = -0.47, -0.41$ y $-0.48, -0.41$, respectivamente). Similarmente a lo encontrado en este estudio, marzo y abril presentaron correlaciones bajas en el anillo total y la madera temprana ($r = 0.03, -0.02$ y $0.17, 0.11$, en orden).

Aquino-Ramírez *et al.* (2019) encontraron que el anillo total de *A. guatemalensis* en Oaxaca, tiene relación negativa y altamente significativa ($p < 0.01$) con la temperatura máxima del marzo a mayo ($r = -0.42$). En contraste a este estudio, en la cronología estándar, el anillo total de *P. oocarpa* tiene relación positiva y significativa ($p < 0.05$) al citado periodo con una $r = 0.24$.

La temperatura juega un papel importante en los procesos fisiológicos, ya que un incremento en la temperatura puede originar una disminución en la producción de carbohidratos, cuando los árboles en condiciones de alta evapotranspiración capturan menos CO_2 , cierran sus estomas, para evitar la pérdida de agua (Pallardy, 2008).

En el presente estudio, *P. oocarpa* responde de manera diferente a los estudios mencionados anteriormente. Cortés-Cortés *et al.* (2021) mencionan en su estudio realizado en Guerrero con *P. montezumae* que la explicación a lo anterior podría ser atribuida a que el 40% de la precipitación media anual del sitio ocurre en el periodo mayo-julio, por lo que las condiciones ambientales presentes, tales como la humedad en el suelo y la humedad relativa se encuentran disponibles en cantidades adecuadas, de manera que no son una limitante para el crecimiento radial de la especie. Esto es similar a lo que ocurre en el sitio SIC, en ese mismo periodo ocurre el 40% de la precipitación anual, para el periodo de mayo a octubre el 84%, lo que explica por qué los tres índices de anillo de *Pinus oocarpa* responden al periodo de primavera y anual.

CONCLUSIONES

Se logró fechar el 54% de las muestras colectadas de *P. oocarpa*, debido a que presento bajas correlaciones entre los patrones de crecimiento.

Las series presentan una extensión de 74 años (1945-2019), con valores estadísticos dendrocronológicos, por lo que se rechaza la hipótesis nula que el crecimiento del anillo total y de las maderas, temprana y tardía, de *Pinus oocarpa* Schiede no tienen potencial para reconstruir la precipitación y las temperaturas, máxima y mínima, en el Ejido San Isidro Chichihuistan, Teopisca.

P. oocarpa tiene potencial dendrocronológico, y mediante la sensibilidad de los anillos de crecimiento se pueden reconstruir las siguientes variables climáticas:

- La precipitación de primavera (de marzo a mayo) con base en la cronología residual del anillo total o la del periodo de enero a marzo en la cronología estándar de la madera tardía.
- La temperatura mínima de primavera, de marzo a mayo, con base en la cronología estándar de madera tardía o la del periodo de enero a diciembre.
- La temperatura máxima promedio anual con base en la cronología estándar de la madera tardía.

REFERENCIAS

- Alexandre, J. (1977). Le bilan de l'eau dans le miombo (forêt claire tropicale). *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 13, 107–116.
- Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Villanueva-Díaz, J., Hervert-Zamora, H. L., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V. J., & Ramírez-Valverde, G. (2019). Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521773. doi: 10.21829/myb.2019.2521773
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Vázquez, S. L., Trucios, C. R., & Guerra, de la C. V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 42-55. doi: 10.14350/rig.35190
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Cornejo, O. E. H., Sánchez, C. I., & Constante, G. V. (2011). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 31-45. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000200004
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387–399. doi: 10.4067 / S0717-92002017000200016
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin Copyright*, 47, 7–59. Obtenido de <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261788/trb-47-037-059.pdf?sequence=1>
- Cortés-Cortés, O., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Flores-López, C., & Valencia-Manzo, S. (2021). Relationship between climate variability and radial growth of *Pinus montezumae* Lamb. in Coyuca de Catalán, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(1), 109–126. doi:10.5154/r.rchscfa.2020.03.012
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. New York, Estados Unidos: Academic Press.

- Fuentes, N., & Patricio, E. (1995). Desarrollo de cronologías para alerce (*Fitzroya cupressoides*) en las Cordilleras de la Costa y de los Andes. (561.24(83)/NEId). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- García, E. (1998). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. (5ta ed.) México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, E. M. S., González, E. M., Villanueva, D. J., & Cerano, P. J. (2017). Evaluación del potencial dendroclimático de *Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 28-54. doi:10.29298/rmcf.v8i42.18
- González, R. A. (2001). Efecto del chamuscado de copa en el crecimiento en diámetro de *Pinus hartwegii* Lind. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Gutiérrez, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. Universidad de Barcelona. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/286242799_La_dendrocronologia_metodos_y_aplicaciones
- Gutiérrez, G. G. (2014). *La relación entre crecimiento y clima en árboles tropicales: un estudio dendrocronológico en la selva de los Tuxtlas, Veracruz, México*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gutiérrez-García, G., & Ricker M. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90: e902676, 1-14. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assited quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Buletin*, 43 (1), 69-78.
- INEGI. (2003). Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1407. Escala 1:250,000. Serie I. Aguascalientes Ags. México.
- INEGI. (2014a). Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México, escala: 1:50000. Edición: 2. México.
- INEGI. (2014b). Conjunto de datos Vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional). Edición: 2. Aguascalientes Ags. México.

- INEGI. (2016). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250000, serie VI (conjunto Nacional). Edición: 1. Aguascalientes, Ags. México.
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008) *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F.
- Lara, A., & Villalba, R. (1993). A 3,620-year temperature reconstruction from Fitzroya cupressoides tree rings in southern South America. *Science*, 260 (5111), 1104–1106. doi: 10.1126/science.260.5111.1104
- Lo, Y.H., J.A. Blanco, B. Seely, C., Welham y J.P., Kimmins. 2010. Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management* 259(5):932-942. doi: 10.1016/j.foreco.2009.11.033
- López-Hernández, M. I., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E.H., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Esquivel-Arriaga, G. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede a variables climáticas en el noroeste de Lagunas de Montebello, Chiapas México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1–17. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v66n4/0034-7744-rbt-66-04-1580.pdf>
- Luna, R. A. A. (2020). *Aplicación de técnicas dendrocronológicas en Pinus teocote Schiede ex Schltdl para la reconstrucción climática en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Meinzer, F.C (1982). The effect of vapor pressure on stomatal control of gas exchange in Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*) saplings. *Oecologia*, 54(2), 236-242.
- Min, Q., & Wang, S. (2008). Clouds modulate terrestrial carbon uptake in a midlatitude hardwood forest. *Geophysical Research Letters*, 35(2), 1-5. doi: 10.1029/2007GL032398
- Morey, P. R. (1977). *Como crecen los árboles*. Ediciones Omega. Segunda edición en español. Barcelona, España.
- Pallardy, S. G., & Kolowski, T. T. (2008). *Physiology of woody plants*. (3ra ed.). Boston: Elsevier.

- Rutherford, M.C. (1984). Relative allocation and seasonal phasing of growth of woody plant components in a South African savanna. *Progress in Biometeorology*, 3, 200–221.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. (1ra.) Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Salinas, J. R. (2017). *Identidad y tiempo. Esculpir el tiempo, descubrir la identidad: una reflexión en obra de escultura en madera y piedra*. Laboratorio de Dendrocronología de Universidad Austral de Chile.
- SGM. 2017. Rocas ígneas. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-igneas.html>
- Smith, W. K., & Hinckley, T. M. (1995). *Resource Physiology of Conifers, Acquisition, Allocation, and Utilization*. London: Academic Press
- Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Cleaveland, M.K., Therrell, M.D., Paull, G.J., Burns, B.T., Salinas, W., Suzan, W., & Fule P.Z. (2000). Recent tree-ring research in México. In F.A. Roig (Ed.), *Dendro-cronología en América Latina* (Editorial de la Universidad Nacional del Cuyo, pp. 285-306). Mendoza, Argentina.
- Stat Soft Inc. (2000). STATISTICA Software, Kernel Release version 5.5 A. 1984-2000. Tulsa, Oklahoma, USA.
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to the tree-ring dating*. The University of Arizona Press. USA.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Villanueva-Díaz, J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(14), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2001JD000851>
- Trouet, V., Esper, J., & Beckma, V. (2010). Climate/growth relationships of *Brachystegiaspiciformis* from themiombo woodland insouthcentral Africa. *Dendrochronologia*, 28:161–171. doi:10.1016/j.dendro.2009.10.002
- Villalba, R. (1990). Climatic fluctuations in northern Patagonia during the last 1,000 years as inferred from tree-ring records. *Quaternary Research* 34(3), 346–360. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(90\)90046-N](https://doi.org/10.1016/0033-5894(90)90046-N)
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Gómez-Guerrero, A., Correa-Díaz, A., Castruita-Esparza, L. U., Cervantes-Martínez, R., Stahle, D. W., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2014). Cinco siglos de historia dendrocronológica de los ahuehetes (*Taxodium mucronatum* ten.) del

parque el contador, San Salvador Atenco, estado de México. *Agrociencia*, 48 (7), 725-737. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/302/30232502006.pdf>

Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E. A., Chávez-Durán, A. A., Zavala-Aguirre, J. L., Cerano-Paredes, J., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–14. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v24n1/1405-0471-mb-24-01-e2411464.pdf>

Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Gómez-Guerrero, A., Cerano-Paredes, J., Aguirre-González, N.A., & Franco-Ramos, O. (2016). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el Monte Tláloc, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39 (2), 175-185. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/610/61046502008.pdf>

V. DISCUSIÓN GENERAL

Los resultados de COFECHA indicaron una correlación significativa ($p < 0.01$) entre series para RS, OA y SIC ($r = 0.50$; $r = 0.41$ y $r = 0.44$, respectivamente). Dado que el programa COFECHA establece para el exacto fechado y calidad de respuesta climática como mínima correlación significativa entre series de $r = 0.3281$ ($p < 0.01$) (Holmes, 1983).

De acuerdo con Cerano *et al.* (2014), Gutiérrez (2014), Villanueva-Díaz *et al.* (2018) y Cortés-Cortés *et al.* (2021), el valor de correlación entre series oscila entre 0.39 a 0.60. Los valores estadísticos obtenidos para fines dendrocronológicos se consideran adecuados y fueron similares a los generados en otros estudios, consideradas con buen potencial dendrocronológico.

Los resultados encontrados del presente estudio indican la sensibilidad del crecimiento radial de *P. oocarpa* a los patrones de precipitación y temperaturas, mínimas y máximas, en las tres áreas. La especie mostró potencial para desarrollar una reconstrucción paleoclimática. Casos similares se han encontrado en otras especies de México (Cerano *et al.*, 2011; Chávez-Gándara *et al.*, 2017; Gutiérrez-García y Ricker, 2019; Cortés-Cortés *et al.*, 2021).

El crecimiento radial de *P. oocarpa* responde de manera altamente significativa ($p < 0.01$) a la precipitación de los periodos de enero a noviembre y de julio a octubre en RS, para OA a los periodos de primavera y de julio a octubre y en SIC al periodo de primavera y enero a marzo. Esos periodos son semejantes a otros estudios realizados en México, con similitud al periodo de primavera (López-Hernández *et al.*, 2018; Cortés-Cortés *et al.*, 2021)

La especie presentó correlación positiva entre el crecimiento radial y la temperatura mínima en el periodo de primavera y marzo a agosto en RS, mientras que en OA los periodos de primavera y febrero a marzo, para SIC el periodo de primavera y anual. Similar a lo reportado por Chávez-Gándara *et al.* (2017) en

San Dimas, Durango encontraron asociación entre los tres índices de anillo de *P. durangensis*, *P. cooperi* y *P. lumholtzii* y la temperatura mínima, la mayoría de los meses mostraron correlaciones positivas.

Por otra parte, la temperatura máxima promedio tuvo una correlación positiva con el crecimiento radial de *P. oocarpa* en el periodo de primavera en RS, en OA en el periodo de julio a octubre y anual, para SIC el periodo de enero a diciembre. En contraste a otros estudios se han encontrado correlaciones negativas con la temperatura máxima (Huante *et al.*, 1991; Marles *et al.*, 2015; Villanueva-Díaz *et al.*, 2018; Aquino-Ramírez *et al.*, 2019).

VI. CONCLUSIÓN GENERAL

Se logró fechar el 54, 43 y 54% de las muestras colectadas de *P. oocarpa* Schiede en los ejidos RS, OA y SIC, respectivamente. Esto debido a que la especie presentó bajas correlaciones entre los patrones de crecimiento atribuido a que la especie presenta alta frecuencia de anillos falsos.

Las series presentaron valores estadísticos dendrocronológicos, pero no se correlacionan entre sitios, *P. oocarpa* responde diferente a la precipitación y a las temperaturas, máxima y mínima, entre las regiones.

Las series presentan una extensión de 153 años (1867-2019) con base en los crecimientos de *P. oocarpa* en el Ejido Rosendo Salazar, 91 años (1925-2015) en el Ejido Ojo de Agua y 74 años (1945-2019) en el Ejido San Isidro Chichihuistan.

Con base en lo anterior, la especie se considera con potencial dendrocronológico y mediante la sensibilidad de los anillos de crecimiento de *P. oocarpa*, se pueden reconstruir las siguientes variables climáticas:

❖ Ejido Rosendo Salazar, Cintalapa:

- La precipitación de enero a noviembre ($r = 0.55$, $p < 0.01$) y de julio a octubre ($r = 0.52$, $p < 0.01$).
- La temperatura mínima de primavera ($r = 0.38$, $p < 0.05$) y de marzo a agosto ($r = 0.36$, $p < 0.05$)
- La temperatura máxima de primavera ($r = 0.52$, $p < 0.05$).

❖ Ejido Ojo de Agua, La Independencia:

- La precipitación de primavera ($r = 0.71$, $p < 0.01$) y de julio a octubre ($r = 0.60$, $p < 0.01$).
- La temperatura mínima de febrero a marzo ($r = 0.81$, $p < 0.01$).
- La temperatura máxima de julio a octubre ($r = 0.68$, $p < 0.01$) y enero a diciembre ($r = 0.68$, $p < 0.01$).

❖ Ejido San Isidro Chichihuistan:

- La precipitación de primavera ($r = 0.51$, $p < 0.01$) y de enero a marzo ($r = 0.65$, $p < 0.01$).
- La temperatura mínima de primavera ($r = 0.56$, $p < 0.01$) y de enero a diciembre ($r = 0.61$, $p < 0.01$).
- La temperatura máxima anual ($r = 0.49$, $p < 0.01$).

VII. REFERENCIAS GENERALES

- Aquino-Ramírez, M., Velázquez-Martínez, A., Villanueva-Díaz, J., Hervert-Zamora, H. L., Gómez-Guerrero, A., Reyes-Hernández, V. J., & Ramírez-Valverde, G. (2019). Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521773. doi: 10.21829/myb.2019.2521773
- Bradley, R. S. (1999). *Paleoclimatology. Reconstructin climates of the Quaternary*. Second Edition. Academic Press. USA.
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Vázquez, S. L., Trucios, C. R., & Guerra, de la C. V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 42-55. doi: 10.14350/rig.35190
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Cornejo, O. E. H., Sánchez, C. I., & Constante, G. V. (2011). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 31-45. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000200004
- Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México, pasado presente y futuro*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Agrupación Sierra Madre, S.C. México.
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387–399. doi: 10.4067 / S0717-92002017000200016
- Constante, G. V., Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Cornejo, O. E. H., & Valencia, M. S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia Forestal en México*, 34(106), 17–39. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/cfm/v34n106/v34n106a2.pdf>
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin Copyright*, 47, 7–59. Obtenido de <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261788/trb-47-037-059.pdf?sequence=1>

- Cortés-Cortés, O., Cornejo-Oviedo, E. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., Flores-López, C., & Valencia-Manzo, S. (2021). Relationship between climate variability and radial growth of *Pinus montezumae* Lamb. in Coyuca de Catalán, Guerrero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(1), 109–126. doi:10.5154/r.rchscfa.2020.03.012
- Douglass, A. E. (1914). A method of estimating rainfall by the growth of trees. *Bulletin of the American Geographical Society*, 46(5), 321-335.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. New York, Estados Unidos: Academic Press.
- Giménez, A. M., Moglia, J.G., Hernández, P., & Gerez, R. (2005). *Anatomía de madera*. Santiago del Estero Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales. Obtenido de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/sd-1-anatomia-de-madera.pdf>
- González, E. M. (2003). *Indicadores de cambio climático en algunas especies de pináceas de la sierra madre occidental, México*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Gutiérrez, E. (2009). *La dendrocronología: métodos y aplicaciones*. Universidad de Barcelona. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/286242799_La_dendrocronologia_metodos_y_aplicaciones
- Gutiérrez, G. G. (2014). *La relación entre crecimiento y clima en árboles tropicales: un estudio dendrocronológico en la selva de los Tuxtlas, Veracruz, México*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gutiérrez-García, G., & Ricker M. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90: e902676, 1-14. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assited quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Buletin*, 43 (1), 69-78.
- Huante, P., Rincón, E., & Swetnam, T. W. (1991). Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, Mexico. *Tree-Ring Research*, 51, 15–28. Obtenido de <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/262286/trb-51-015-028.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Kaennel, M. & Schweingruber, F. H. (1995). Multilingual glossary of dendrochronology. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL/FNP. Paul Haupt Publisher. Berne.
- López-Hernández, M. I., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E.H., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Esquivel-Arriaga, G. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede a variables climáticas en el noroeste de Lagunas de Montebello, Chiapas México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1–17. Obtenido de <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v66n4/0034-7744-rbt-66-04-1580.pdf>
- Luckman, B. H. (2007). Dendroclimatology. *Encyclopedia of Quaternary Science*, 1, 465- 475.
- Magaña R. V., Pérez J. L., Conde C., Gay C. y Medina S. (1997). *El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur (ENOS) y sus impactos en México*. Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM.
- Marlés M. J., Valor, I. T., Claramunt, L. B., Pérez, S. D. R., Maneja, Z. R., Sánchez, M. S., & Boada, J. M. (2015). Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca. *Investigaciones Geográficas* (Mx), (88), 19–32. <https://doi.org/10.14350/rig.43338>
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press.
- Stahle, D. W., Villanueva, D. J. Cleaveland, M.K., Therrell, M.D., Paull, G.J., Burns, B.T., Salinas, W., Suzan, W., & Fule P.Z. (2000). Recent tree-ring research in México. In F.A. Roig (Ed.), *Dendro-cronología en América Latina* (Editorial de la Universidad Nacional del Cuyo, pp. 285-306). Mendoza, Argentina.
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to the tree-ring dating*. The University of Arizona Press. USA.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Villanueva-Díaz, J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(14), 1–8. <https://doi.org/10.1029/2001JD000851>
- Villanueva, D. J., Cerano, P. J., Stahle, W. D., Matthew, D. T., Cleaveland, M. K., & Sánchez, C. I. (2004). *Elementos básicos de la dendrocronología y*

sus aplicaciones en México. Folleto Técnico No.2 INIFAP, CENID-RASPA, 2, 48.

Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E. A., Chávez-Durán, A. A., Zavala-Aguirre, J. L., Cerano-Paredes, J., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–14. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v24n1/1405-0471-mb-24-01-e2411464.pdf>

Zamora, S. C. (1981). Algunos aspectos sobre *Pinus oocarpa* Schiede en el estado de Chiapas. *Ciencia Forestal*, 6 (32), 25-53.