



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHINÁ

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO FORESTAL

PRESENTA:

BENJAMIN CASTILLO MORALES

ASESOR INTERNO:

SOL DE MAYO ARAUCANA MEJENES LOPEZ

TÍTULO:

**“PARÁMETROS DENDROCRONOLÓGICOS Y SU INFLUENCIA DE LA
PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA SOBRE EL CRECIMIENTO DE LOS ANILLOS
DE TZALAM *Lysiloma latisiliquum* (L). BENTH., EN BOSQUES TROPICALES DE
LOS ESTADOS DE CAMPECHE Y YUCATÁN”**

NOVIEMBRE 2025





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHINÁ

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO FORESTAL

PRESENTA:

BENJAMIN CASTILLO MORALES

ASESOR INTERNO:

SOL DE MAYO ARAUCANA MEJENES LOPEZ

TÍTULO:

**“PARÁMETROS DENDROCRONOLÓGICOS Y SU INFLUENCIA DE LA
PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA SOBRE EL CRECIMIENTO DE LOS ANILLOS
DE TZALAM *Lysiloma latisiliquum* (L). BENTH., EN BOSQUES TROPICALES DE
LOS ESTADOS DE CAMPECHE Y YUCATÁN”**

NOVIEMBRE 2025





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Chiná
Subdirección académica

Departamento de Ingenierías
Chiná, Campeche, 13/noviembre/2025
OFICIO. No. DING/068/2025
ASUNTO: ASIGNACION DE JURADO

SARAHÍ CARMEN BAEZA NARVAEZ
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PRESENTE

En respuesta a su oficio en que se solicita como se integrará el jurado del Acto Recepcional el Br. **BENJAMIN CASTILLO MORALES** con número de control 20830172 de la carrera de Ingeniería Forestal relativo al proceso de Titulación Integral (TESIS) denominado **PARÁMETROS DENDROCRONOLÓGICOS Y SU INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA SOBRE EL CRECIMIENTO DE LOS ANILLOS DE TZALAM *Lysiloma latisiliquum* (L). BENTH., EN BOSQUES TROPICALES DE LOS ESTADOS DE CAMPECHE Y YUCATÁN.** Informo que dicho jurado quedará integrado como sigue:

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL
VOCAL SUPLENTE

SOL DE MAYO ARAUCANA MEJENES LOPEZ
MARTIN AQUINO RAMIREZ
BRIGIDO MANUEL LEE BORGES
JULIO CESAR CHAC PEREZ

Sin otro particular, me despido enviándole un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Aprender Produciendo"

BRÍGIDO MANUEL LEE BORGES
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIAS



c.c.p. EXPEDIENTE
CCP: EGRESADO

ECCL/bmb



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Calle 11 S/N entre 22 y 28, Chiná,
Campeche, C.P. 24520, Tel. 9818272052 y
9818272082, e-mail: dir_china@tecnm.mx
www.itchina.edu.mx



COMITÉ REVISOR

Este trabajo fue revisado y aprobado por este comité y presentado por el C. **CASTILLO MORALES BENJAMIN** como requisito parcial para obtener el título de: **INGENIERO FORESTAL** el día 03 del mes de diciembre del año 2025 en Chiná, Campeche.

SOL DE MAYO ARAUCANA MEJENES LOPEZ
Presidente



MARTIN AQUINO RAMIREZ
Secretario



BRIGIDO MANUEL LEE BORGES
Vocal



JULIO CESAR CHAC PEREZ
Vocal Suplente



Dedicatoria

A mi madre Sara Morales Martínez y mi padre Ramón Castillo Paredes, por su infinito apoyo, ya que sin ellos no sería posible estar donde estoy, por los momentos de plática y enseñanza para seguir adelante a ellos agradezco absolutamente todo y, aunque ha sido complicado por varios factores, su motivación y sobre todo educación brindada, me han permitido seguir adelante para crecer y mejorar como persona.

A mi hermano Idelfonso Castillo Morales por estar presente en los buenos momentos.

A mis compañeros de tesis y de carrera, por todos los buenos momentos en los que convivimos, sin duda una buena experiencia, gracias por las conversaciones para seguir mejorando.

Agradecimientos

A mis asesores de tesis:

La M.C. Sol de Mayo A. Mejenes López, una de las mejores docentes con la que tuve el privilegio de convivir, por tenerme confianza desde un principio, por el apoyo brindado desde el seguimiento de mi servicio social y por invitarme a mejorar académicamente y como persona.

El Dr. Martín Aquino Ramírez por integrarme con paciencia en el estudio de la dendrocronología y enseñarme las herramientas necesarias para realizar el estudio, a pesar de las limitantes y sobre todo por su tiempo.

Al Instituto Tecnológico de Chiná por permitirme ser parte de la institución, para el desarrollo de mi carrera académica.

A los profesores de la ingeniería por su tiempo y conocimiento brindado, en el transcurso de la carrera.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Edzná, por aceptarme y permitirme conocer el mundo de la dendrocronología.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el financiamiento del proyecto “Evaluación ecológica de la diversidad florística en un área de influencia de una estación del Tren Maya en Campeche, propuesta al pago por aprovechamiento de servicios ambientales en el ámbito de recreación y ecoturismo”, con número de clave del Proyecto: 23436.25-P.

Al financiamiento de recursos externos INIFAP a través del proyecto “Transferencia de tecnología en la producción de carbón vegetal con el horno metálico tipo CEVAG (NCPA Sudzal Chico)” con número de registro SIGI: 3-1.6-437635545-F-M.2-2.

Resumen

La relación clima-crecimiento radial es importante ya que permite identificar los factores limitantes en el crecimiento secundario de los árboles. *Lysiloma latisiliquum* (L). BENTH. (Tzalam) es una especie arbórea nativa de importancia ecológica y maderable dentro de los bosques tropicales del sureste de México. A la fecha, no se dispone de información específica del crecimiento secundario y su relación con las condiciones climáticas. El objetivo del presente estudio fue determinar el potencial dendrocronológico y la influencia del clima en crecimiento de los anillos de *L. latisiliquum* (L). BENTH., en dos sitios de la Península de Yucatán. Las muestras fueron procesadas y fechadas de acuerdo a los métodos tradicionales de dendrocronología, para generar una cronología de ancho de anillo. En cada sitio muestreado se realizó un análisis de correlación para conocer que factor climático (precipitación y temperatura) es determinante en el crecimiento radial del Tzalam. En el sitio de Bethania, Campeche fueron fechadas correctamente 22 series de crecimiento y corresponden a 11 árboles, mientras en el sitio de Sudzal Chico, Tekax, Yucatán se fecharon 30 series de crecimiento que provienen de 18 individuos. El crecimiento promedio anual en el sitio de Bethania es de 2.22 mm y en el sitio de Sudzal Chico es de 1.67 mm. El valor de la inter-correlación entre series para el sitio de Bethania fue de 0.53 y la cronología residual abarcó, un periodo de 51 años (1972-2023). Mientras, para el sitio de Sudzal Chico la inter-correlación fue de 0.46 y la cronología residual comprendió un periodo de 99 años (1926-2024). Los resultados de los coeficientes de correlación para el sitio de Bethania, indican que la precipitación de los meses de

octubre del año previo mostró una correlación positiva significativa $r = 0.423$ ($p < 0.05$) y para el sitio de Sudzal Chico los coeficientes de correlación durante febrero del año actual indican que la temperatura máxima tuvo una correlación negativa $r = -0.436$. Se afirma que existe una señal climática común en los anillos de crecimiento de los árboles para los dos sitios y pueden indicar su anualidad, demostrando que el estudio puede servir para establecer patrones de crecimiento, establecer las variables climáticas dominantes en un sitio de estudio y servir como información para futuros estudios en la Península de Yucatán.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	19
II.	JUSTIFICACIÓN Y PREGUNTAS CIENTÍFICAS.....	21
III.	OBJETIVOS.....	22
	3.1. General.....	22
	3.2. Específicos.....	22
IV.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	23
	4.1. Dendrocronología.....	23
	4.2. Algunos aportes en relación al clima.....	23
	4.3. Crecimiento de los árboles.....	24
	4.4. Relación anillos de crecimiento y clima.....	25
	4.5. Potencial dendrocronológico.....	26
	4.6. Muestras dendrocronológicas.....	27
	4.7. La Dendrocronología como estudio.....	27
	4.7.1. Principios de la Dendrocronología.....	30
	4.7.2. Principio de uniformidad.....	30
	4.7.3. Principio de fechado cruzado.....	31
	4.7.4. Principio de factores limitantes.....	32
	4.7.5. Principio de amplitud ecológica.....	32
	4.7.6. Principio de modelo de crecimiento de árboles agregados.....	33
	4.7.7. Principio de selección del sitio.....	34
	4.7.8. Principio de replicación.....	34
	4.7.9. Principio de la sensibilidad.....	35

4.8. Parámetros dendrocronológicos.....	36
4.8.1. Sensibilidad.....	36
4.8.2. La desviación estándar.....	37
4.8.3. La autocorrelación.....	37
4.8.4. Proporción señal-ruido.....	38
4.8.5. Inter correlación entre series.....	39
4.8.6. Problemas de crecimiento.....	39
4.8.7. El crecimiento anual y la sensibilidad.....	39
4.9. Descripción de la especie.....	42
4.9.1. Información taxonómica de la especie.....	42
4.9.2. Sinonimias.....	42
4.9.3. Nombres comunes en México.....	42
4.9.4. Forma biológica.....	43
4.9.5. Hojas.....	43
4.9.6. Inflorescencia y flores.....	44
4.9.7. Fruto.....	45
4.9.8. Semilla.....	45
4.9.9. Tallo y anillos.....	46
4.9.10. La madera y usos a nivel nacional.....	47
4.9.11. Distribución.....	47
4.9.12. Estudios relacionados con la especie.....	48
V. MATERIALES Y METODOS.....	49
5.1. Área de estudio.....	49

5.1.1. Aspectos físicos de Bethania.....	50
5.1.1.1. Clima.....	50
5.1.1.2. Suelo.....	51
5.1.1.3. Hidrografía.....	51
5.1.1.4. Fisiografía.....	51
5.1.1.5. Geología.....	51
5.1.1.6. Vegetación.....	52
5.1.2. Aspectos físicos de Sudzal Chico.....	52
5.1.2.1. Clima.....	52
5.1.2.2. Suelo.....	53
5.1.2.3. Hidrografía.....	53
5.1.2.4. Fisiografía.....	53
5.1.2.5. Geología.....	53
5.1.2.6. Vegetación.....	54
5.2. Muestreo dendrocronológico.....	54
5.3. Procesamiento de secciones transversales.....	55
5.4. Desarrollo de la cronología.....	55
5.5. Relaciones clima crecimiento.....	56
5.6. Relaciones índice de sequía-crecimiento.....	57
5.7. Correlaciones espaciales.....	58
VI. RESULTADOS.....	59
6.1. Límites de los anillos de crecimiento.....	59
6.2. Cronologías de índice de anillo.....	63

6.3. Relación clima-crecimiento.....	65
VII. DISCUSIÓN.....	78
VIII. CONCLUSIÓN.....	80
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
X. ANEXOS.....	95

Índice de Cuadros/Tablas

Cuadro 1. Años donde se identificaron mayor y menor crecimiento en el ancho de anillo de los dos sitios de estudio.....	61
---	----

Índice de Figuras

Figura 1. Ejemplo de sección transversal en la cual se exhiben los anillos de crecimiento anual de una especie complaciente.....	41
Figura 2. Ejemplo de sección transversal con una alta variabilidad en el ancho de los anillos de crecimiento.....	41
Figura 3. a) Forma bilógica, b) Corteza, c) Hoja, d) Flor, e) Fruto y F) Semillas del árbol de <i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.....	45
Figura 4. a) Sección trasversal de <i>L. latisiliquum</i> y b) Anillos de crecimiento (Fotos para este trabajo, BCM).....	46
Figura 5. Ubicación geográfica de los dos sitios de muestreo y de las estaciones meteorológicas seleccionadas.....	49
Figura 6. Climograma para el sitio de Bethania 1983-2022.....	50
Figura 7. Climograma para el sitio de Sudzal Chico 1984-2024.....	52
Figura 8. Vista del límite de crecimiento de los anillos en una sección transversal de <i>L. latisiliquum</i>	59
Figura 9. Límite de los anillos de crecimiento definido por un parénquima marginal en los árboles de <i>L. latisiliquum</i>	60

Figura 10. Sección transversal con presencia de anillos de crecimiento y fechado de la sección transversal.....	60
Figura 11. Gráfica de crecimiento radial para el sitio Bethania, Campeche, Campeche para un periodo de 51 años (1972-2023), la línea negra representa el crecimiento promedio.....	62
Figura 12. Gráfica de crecimiento para el sitio Sudzal Chico, Tekax, Yucatán para un periodo de 99 años (1926-2024), la línea negra representa el crecimiento promedio.....	62
Figura 13. Cronología residual generada (gris) y número de series (negro) para el sitio Bethania, Campeche, Campeche.....	63
Figura 14. Cronología residual de índice de ancho de anillo (gris) y número de series (negro) para el sitio Sudzal Chico, Tekax, Yucatán.....	64
Figura 15. Correlaciones mensuales entre la cronología residual del sitio Bethania, Campeche con variables climáticas a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.....	65
Figura 16. Análisis de correlación estacional de la: a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima para el sitio de Bethania, Campeche.....	66
Figura 17. Correlación dinámica entre la cronología de <i>L. latisiliquum</i> y la precipitación. Los puntos negros representan periodos significativos ($p < 0.05$).....	67

Figura 18. Correlación espacial de la cronología de Bethania entre el índice de sequía SPEI1, para los meses octubre-agosto del año previo, en el periodo de 1972-2017.....	68
Figura 19. Correlación espacial de la cronología de Bethania entre el índice scPDSI, para el mes de abril, en el periodo de 1990-2023.....	69
Figura 20. Correlación espacial entre la cronología residual de Tzalam y la temperatura promedio de los meses de septiembre-octubre del año previo, de la superficie del mar HadISST1 del conjunto de datos del Centro Hadley (HadISST1) durante el periodo de 1972-2024 con una resolución espacial de 1°. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.....	70
Figura 21. Correlaciones mensuales entre la cronología residual del sitio Sudzal Chico, Yucatán con variables climáticas: a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.....	71
Figura 22. Análisis de correlación estacional de la a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima, para el sitio de Sudzal Chico, Yucatán.....	72
Figura 23. Correlación dinámica entre la cronología residual de <i>L. latisiliquum</i> con la temperatura máxima en el sitio Sudzal Chico. Los puntos negros representan periodos significativos ($p < 0.05$).....	73
Figura 24. Correlación espacial de la cronología residual del sitio Sudzal Chico y el índice de sequía SPEI1, para los meses diciembre-mayo, en el periodo de 1960-1990. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.....	74

Figura 25. Correlación espacial de la cronología residual del sitio Sudzal Chico y el índice de sequía SPEI1, para los meses diciembre-mayo, en el periodo de 1990-2017. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.....75

Figura 26. Correlación espacial entre la cronología residual del sitio Sudzal Chico y el índice scPDSI, para el mes de mayo, en el periodo de 1970-2023. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.....76

Figura 27. Correlación espacial entre la cronología residual de Tzalam y la temperatura promedio de los meses de febrero-marzo del año actual de la superficie del mar HadISST1 del conjunto de datos del Centro Hadley (HadISST1) durante el período de 1970 a 2024 con una resolución espacial de 1°. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.....77

I. INTRODUCCIÓN

A los bosques tropicales se les considera cruciales por que ofrecen una gran variedad de bienes y servicios ambientales que sostienen y satisfacen la vida humana, son provisión o abastecimiento en la regulación global la temperatura y generan oxígeno y finalmente la cultural donde las diversas actividades recreativas, estéticas, turísticas, educativas, espirituales, de identidad entre otras (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2017). Además de albergar una gran variedad de especies animales.

Los estudios dendrocronológicos han sido cada vez más exitosos en la evaluación del impacto de las actividades humanas sobre el bosque, aplicando para masas, especies específicas y en relaciones con variables específicas. El avance de la dendrocronología en las regiones tropicales, pareciera requerir de la incorporación de nuevas especies maderables, en respuesta a la escasez de maderas tradicionales (Escalante *et al.*, 2020) como el roble (*Amburana cearensis*), cuchi (*Astronium urundeuva*), cedro (*Cedrela odorata*) y morado (*Machaerium scleroxylon*).

México se ha formado como uno de principales países en los estudios sobre la dendrocronología, aunque la mayoría de estos estudios son en especies que crecen en zonas templadas, por lo que el número de investigaciones sobre especies potenciales en la dendrocronología ha aumentado y se espera que siga creciendo.

En la Península de Yucatán son nulos los estudios que relacionan el clima con el crecimiento de los árboles. Roig *et al.* (2005) describe la anatomía de los anillos de crecimiento en especies tropicales y resalta aquellas especies con potencial dendrocronológico en la región de la Península de Yucatán, *L. latisiliquum* es un árbol localmente conocido como Tzalam y fue seleccionado en este trabajo, por ser una especie abundante y representativa de la vegetación nativa de la península de Yucatán.

II. JUSTIFICACIÓN Y PREGUNTAS CIENTÍFICAS

El establecimiento de las relaciones entre las variaciones en el ancho de los anillos de crecimiento con variables climáticas a nivel local, por ejemplo, la precipitación y la temperatura, permiten determinar las condiciones climáticas dominantes que modulan el crecimiento de los árboles y dar respuesta a muchas preguntas ecológicas y de manejo forestal, como la edad media del bosque y/o rodal, la determinación de la tasa de crecimiento y el intervalo requerido por los árboles para alcanzar un diámetro determinado.

Por lo anterior, las preguntas de esta investigación fueron: a) ¿*L. latisiliquum* tiene la capacidad para formar anillos de crecimiento?, b) Si forma anillos ¿Estos pueden considerarse como anuales? y c) ¿*L. latisiliquum* es adecuado para desarrollar una cronología de ancho de anillo estadísticamente robusta y que exprese señales climáticas?

La información obtenida en este estudio podrá ser utilizada para estimar tasas futuras de crecimiento, incluir como referencia para la datación de otras especies comparaciones relativas a la dendrocronología y la resiliencia de los bosques bajo escenarios climáticos y cambio climático.

III. OBJETIVOS

3.1. General.

- Determinar el potencial dendrocronológico y la influencia del clima en el crecimiento de los anillos de *Lysiloma latisiliquum* (L). Benth., en dos sitios de la Península de Yucatán.

3.2. Específicos.

- Delimitar los anillos de crecimiento de *L. latisiliquum* de acuerdo a características macroscópicas y asignarle un año calendario para su fechado.
- Generar series de crecimiento de ancho de anillo total y obtener una cronología promedio para cada sitio muestreado en la Península de Yucatán.
- Determinar estadísticos dendrocronológicos de las cronologías generadas de *L. latisiliquum* para identificar su robustez y señal climática.
- Analizar las relaciones entre el crecimiento radial y el clima (precipitación y temperatura) de forma mensual y estacional.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Dendrocronología.

La dendrocronología es una ciencia forestal, dotada de principios, para extraer, separar e interpretar la información que contiene de los diferentes factores que han influido en el crecimiento de los árboles. Deriva del griego dendron –árbol-, crono –tiempo- y logo –conocimiento, indicando una relación muy estrecha entre los árboles y el tiempo (Gutiérrez, 2009). Escasas son las disciplinas que estudian el pasado del clima, que presentan una resolución anual, por ello la dendrocronología se considera una técnica de datación absoluta y a la vez una fuente clave para contextualizar el cambio climático en una perspectiva de largo plazo (Gutiérrez, 2009; Bradley *et al.*, 2003; Schweingruber 1996). Esta ciencia está conceptualizada como la ciencia que hace posible la detección y análisis de los anillos de crecimiento en la madera de los árboles y de piezas en la madera, incluyendo la aplicación de la información registrada en su estructura, para estudios ambientales e históricos (Roig, 2009).

4.2. Algunos aportes en relación al clima.

El clima es relativamente habitual de la capa atmosférica de un sitio o superficie terrestre, es producto de la relación entre la atmosfera, los océanos, capas de hielo y nieve, los continentes y es determinante para la vida en la tierra. El estudio del clima ha permitido hacer uso de las variables presentes que influyen de forma directa, como lo son la temperatura, el viento presente en la superficie del planeta, las precipitaciones en sus distintas formas (lluvia, nieve, granizo) humedad, tipo y cantidad de nubes, y la radiación solar (Conde, 2006).

El clima no ha sido una constante en el tiempo, ni es algo fijo o inamovible, sino que a lo largo de la historia del planeta ha cambiado muchas veces y en algunos momentos de manera bastante general. Una evidencia de esto son las glaciaciones y los periodos interglaciares que han sucedido en el transcurso de millones de años, además de los cortos periodos “crisis” en los que la variación pudo ser mucho más rápida e intensa (Cuentan, 2000).

El fenómeno del niño es un ejemplo de las alteraciones climáticas presentes a gran escala, los expertos consideran que están asociados a los cambios climáticos originados por el calentamiento global. Las anomalías en diferentes parámetros meteorológicos y las desviaciones fuertes están y seguirán apareciendo en diferentes escenarios de la Tierra. El niño fue uno de los factores más influyentes y que contribuyó a que la temperatura de la superficie terrestre registrará el mayor crecimiento del siglo. Durante el fenómeno de El niño las lluvias de invierno se intensifican y las de verano se debilitan (Molina, 2008; Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, 1998; Magaña y Quintanar, 1997).

4.3. Crecimiento de los árboles.

Los árboles son una planta con la información genética para optar por tener un crecimiento, producir madera y desarrollarse tanto como el ambiente lo permita, el termino árbol hace referencia a especies que no cuentan necesariamente con un ancestro en común, los biólogos llaman a esto un grupo polifilético, es decir, no todas las especies de árboles están emparentadas entre sí (Sandí, 2019).

El crecimiento de los árboles, como cualquier proceso de crecimiento, no es continuo y se detiene en algún momento debido a la limitación expuesta por un factor, que puede ser externo y/o interno, formándose la capa de los anillos de crecimiento. Este patrón anual de actividad y reposo queda marcado en la estructura de la madera temprana y tardía, en forma de capas concéntricas las cuales, en un corte transversal, se ven como anillos.

La madera temprana (primavera), formada al principio del periodo de crecimiento, es distinta de la madera tardía (otoño), la formada al final, y por esta razón en el anillo anual de muchas especies se suelen distinguir dos colores; claros en la madera temprana y más oscuros para la madera tardía (Zanni, 2004).

4.4. Relación anillos de crecimiento y clima.

La variabilidad climática anual a lo largo de los años puede imprimir una señal clara de su historia en los anillos de los árboles afectando, por ejemplo, un grosor relativo. Cuando el clima es muy limitante para el crecimiento, los anillos que se forman en ese año son estrechos, en la mayoría de los árboles de una región, es un año característico. Los efectos climáticos como el fenómeno de El niño pueden afectar en el crecimiento de las especies, pero puede diferir en la reproducción de estos (Gutiérrez, 2009; Alfaro-Sánchez, 2017).

En zonas tropicales, la oscilación térmica anual es más débil y la afectuosidad regularmente permite, un crecimiento constante durante todo el año. Por ello, la mayoría de las especies tropicales no forman anillos anuales claros, sólo aquellas que se desarrollan bajo alguna condición ambiental con oscilaciones estacionales persistentes (Gutiérrez, 2009).

En muchas especies tropicales, los anillos pertenecen a periodos de sequía, lluvia o caída de hojas, haciendo posible que puedan suceder dos o más ciclos a lo largo de un año, por lo tanto, los anillos de crecimiento no siempre son anuales (Marcelo-Peña *et al.*, 2020; Worbes, 1999). Sin embargo, cuando hay condiciones severas de sequía (Gourlay, 1995) pueden provocar la presencia de anillos falsos en algunas especies, mientras que en otras la visibilidad y periodicidad del anillo puede ser distorsionadas debido a las condiciones físicas donde se desarrollan, como suelos profundos y bien drenados (Alvim y Alvim, 1978).

4.5. Potencial Dendrocronológico.

Existe un gran reto ante la necesidad de determinar el potencial dendrocronológico de nuevas especies, que permitan reconstruir variables climáticas, en sitios donde no se han desarrollado este tipo de base de datos y que contribuyan al desarrollo de una planeación adecuada de los recursos naturales. El potencial dendrocronológico de una especie se refiere a su capacidad para desarrollar anillos de crecimiento anual, con una fuerte señal climática; esta variabilidad climática, se refleja a través de las fluctuaciones en el grosor de sus crecimientos anuales (Fritts. 1976).

Las series dendrocronológicas permiten la investigación en numerosos campos de la ciencia ya que constituyen un registro del tiempo y un archivo de los acontecimientos pasados, por ello también son muy útiles para datar acontecimientos siempre que hayan afectado a los árboles (perturbaciones), datar objetos y construcciones de madera (Gutiérrez, 2009). El proceso de generar

cronologías de anillos de crecimiento involucra una serie de acciones entre las que se encuentra, la selección de especímenes sensibles en sitios con el menor disturbio posible, la ubicación de arbolado viejo, obtención y procesamiento de muestras, medición, fechado y elección de alternativas de estandarización para la generación de índices dendrocronológicos (Villanueva *et al.*, 2007).

La dendrocronología aplicada en especies de bosques tropicales es un reto, considerando la densidad que tienen las maderas en comparación con las coníferas, las condiciones climáticas a su vez impactan de forma que se formen anillos grandes y anillos pequeños (Tomazello Filho y Cardoso, 1999).

4.6. Métodos de la dendrocronológicas.

Las muestras dendrocronológicas se pueden extraer de forma destructiva o no destructiva, para posteriormente estudiarlas. Se puede tomar la rodaja de una parte del árbol de la especie talada, lo que puede ser más preciso en la búsqueda de características ambientales del sitio y demás análisis dendrocronológicos.

También se tiene el método no destructivo en el que son tomadas comúnmente por medio de un barreno o taladro de incrementos Pressler (Betran y Valencia, 2013).

4.7 La Dendrocronología como estudio.

El desarrollo histórico de la dendrocronología como disciplina científica, se fue desarrollando con cierto desfase y retraso, en ciertas subdisciplinas o aplicaciones, en otras ciencias y técnicas al establecer relaciones, como la climatología (dendroclimatología), geomorfología (dendrogeomorfología), arqueología (dendroarqueología), etc. Los estudios más antiguos se registran a

finales del siglo XIX y cada vez con mayor auge para inicios del siglo XX. Existen registros previos en la Edad Antigua y Edad Media sobre la edad de los árboles y del significado de los anillos de crecimiento, pero se atribuye a Leonardo Da Vinci como el primer autor, al relacionar los anillos de los árboles y su crecimiento con las variables del clima. La sistematización de la ciencia como la conocemos, se atribuye al Astrónomo americano Andrew Ellicot Douglas (Génova, 2022; Bernabei & Macchioni, 2012).

Según Roig (2005) México se ha constituido como uno de los principales países de la región en la investigación sobre dendrocronología, con el registro de cronologías de anillos de crecimiento en 1940-1950 (Schulman 1944, 1956; Scott 1966) en base a árboles de *Pinus sp.*, *Pseudotsuga mensiesii* y *Abies duranguensis*. Roig (2005) describe la anatomía de los anillos de crecimiento de árboles en la península de Yucatán, recomendando las especies de acuerdo a tres clasificaciones: a) anillos de crecimiento marcados, b) anillos de crecimiento presentes con dificultad y c) anillos de crecimiento no marcados o ausentes.

El conocimiento acerca de la existencia de los anillos anuales en los árboles tropicales, fue encontrado a principios del siglo pasado e ignorado por muchos científicos a lo largo del tiempo (Worbes, 1989). Derivado de las complicaciones en la observación de los anillos de crecimiento en árboles tropicales, el estudio para las especies es de menor alcance que el de las especies de zonas templadas, representando una dificultad desde la extracción de las secciones transversales, el lijado y el análisis de los anillos de crecimiento, relacionado a la densidad de los árboles tropicales.

Gutiérrez (2009) sostiene que la actividad del cambium es muy sensible a los factores ambientales y esta sensibilidad se ve reflejada en la formación de los anillos de crecimiento. Aunque, en climas mediterráneos, de todos los posibles factores que pueden influir en el cambium (a excepción de los fenómenos puntuales como incendios, plagas o puestas en luz de arbolado mediante cortas, delimitados por el tiempo y tienen periodicidad baja) sólo el clima presenta una gran variabilidad interanual, registrando sus efectos año tras año en los anillos de crecimiento y una uniformidad espacial elevada, de forma que dichos efectos serán los mismos en árboles distintos que se encuentren formando en conjunto, de un mismo clima.

Malatesta (2020) menciona que estas tendencias se dan por condiciones óptimas o desfavorables de precipitación, radiación solar, evapotranspiración, etc., y que el cambio vascular es sensible a estos aspectos climáticos.

En los climas con estaciones contrastes, el crecimiento radial de los árboles cesa en la época desfavorable (otoño-invierno) y se activa en condiciones favorables (primavera-verano) (Gutiérrez, 2009). Los anillos de los árboles están casi completamente formados. En este caso, parece que observamos que el clima local se ve influenciado por la vegetación local a través de la transpiración, cuya intensidad está asociada con la tasa fotosintética y la anchura de los tejidos xilemáticos transportadores de agua formados durante el último año (Lipatkin *et al.*, 2023).

Los anillos de crecimiento generalmente aumentan de ancho durante 2 a 5 años, seguido de una disminución progresiva y se miden de afuera hacia el centro de la médula. Esta tendencia se relaciona con la ontogenia de los árboles y debe tomarse en cuenta al comparar los anchos de los anillos de árboles de diferentes edades, y al correlacionar el ancho de los anillos en un año determinado con el clima. El efecto de esta tendencia general de crecimiento en cada sección transversal se eliminó convirtiendo cada ancho de anillo en un año específico y el ancho estimado que representa la tendencia de crecimiento, utilizando el método descrito por Fritts (1963).

4.7.1 Principios de la Dendrocronología

La dendrocronología como cualquier otra ciencia, se basa en un conjunto de principios. Algunos principios se aplican específicamente para estudios dendrocronológicos, mientras que otros son comunes con otras disciplinas, algunos de los principios establecidos surgieron a partir del año 1785 (Principio de la uniformidad) y con el transcurso del tiempo se establecieron más (Grissino-Mayer, 1996; Tomazello Filho *et al.*, 2001).

4.7.2 Principio de uniformidad

El uniformismo es un principio científico planteado por James Hutton en 1875, interpretado como: “El presente es la clave del pasado”. Aplicando a la dendrocronología, el principio uniformista involucra que el desarrollo físico y biológico que vinculan el entorno actual con las variaciones actuales en el crecimiento de los árboles debieron estar presentes en el pasado. Debe asumirse como antecedente, que las mismas condiciones limitantes afectaron a los mismos

procesos de la misma manera en el pasado que ahora; solo las frecuencias podrían haber cambiado (Fritts, 1976).

El uniformismo se asume en todas las inferencias dendrocronológicas y como en todas las ciencias del pasado, si no se sostiene, no se pueden obtener conclusiones sobre el pasado. En los análisis relacionados con el clima, al mantener este principio, es posible establecer la relación entre las alteraciones en el crecimiento de los árboles y las variaciones climáticas actuales y deducir la naturaleza del clima pasado a partir de los anillos históricos.

4.7.3 Principio de fechado cruzado

Este principio proporciona el control de asignar a cada anillo de crecimiento, el año preciso de su formación. El ancho de los anillos anuales debe ser sincronizado entre radios del mismo árbol y entre arboles de un mismo rodal: El desarrollo de la sincronización involucra comparar y superponer visualmente los patrones de crecimiento de los anillos de diferentes árboles.

Se buscan características comunes, como los puntos de transición entre anillos de crecimiento más anchos y estrechos, las secuencias de anillos inusuales o marcas determinadas. Al descubrir correspondencias entre los patrones de crecimiento, se puede establecer una secuencia cronológica coherente y rectificar que la mayoría de los anillos de diferentes arboles se estén comparando correctamente (Fritts, 1976).

McCarthy (1998) menciona que el crossdating o fechado cruzado, se puede realizar por medio del manejo de diversos métodos, por ejemplo: el método

clásico, directamente de la madera, gráficos de lista o tabulado, crossdating mediante la medición del ancho de los anillos de computadoras y estadísticos.

4.7.4 Principio de factores limitantes

El crecimiento de los anillos de los árboles se ve principalmente influido por el factor ambiental más limitante, como la precipitación en regiones secas o la temperatura en latitudes más altas. Este principio señala que el proceso de crecimiento de la planta puede ocurrir tan rápido como lo permita el factor que actúa como principal limitante.

Los mismos factores pueden limitar el crecimiento de alguna manera cada año, pero el grado y la duración de sus efectos limitantes varía de un año a otro. Cuando las condiciones son limitantes, muchos factores relacionados con el proceso de crecimiento están limitados, creando una menor cantidad de células, anillos estrechos y las características de las células y densidad de la madera varían en función de que factor actúa como limitante. El principio de los factores limitantes es de gran importancia para la dendrocronología, ya que permite datar la anchura de los anillos mediante datación cruzada, si el crecimiento de un árbol nunca está limitado por ninguna condición climática o ambiental (anillos generalmente anchos), no habrá información climática en los anchos de los anillos y no estarán fechados correctamente (Grissino-Mayer, 1996; Fritts, 1996).

4.7.5 Principio de amplitud ecológica

La importancia de este principio se expresa porque la mayoría de las especies útiles en los estudios dendrocronológicos, con frecuencia, se ubican cerca de los límites de su rango natural de desarrollo (McCarthy, 1998; Grissino-Mayer, 1997).

Las especies pueden desarrollarse, reproducirse y extenderse a través de un intervalo de hábitat que puede ser amplio, angosto o restringido (Grissino-Mayer, 1996).

4.7.6 Principio del modelo de crecimiento de árboles agregados

Este principio está relacionado con las series individuales de crecimiento de un árbol que pueden ser “descompuestas”, el conjunto de factores agregados afecta el patrón de crecimiento del árbol a través del tiempo. Por ejemplo, para maximizar la señal correspondiente al clima, se debe eliminar la tendencia relacionada con la edad y los árboles y sitios seleccionados deben minimizar la posibilidad de acción de la presencia de factores externos o internos que pueden afectar el crecimiento (Grissino-Mayer, 1996; McCarthy, 1998).

El principio puede expresarse de forma matemática, de acuerdo a la siguiente ecuación McCarthy, (1998):

$$R_t = A_t + C_t + D1_t + D2_t + E_t$$

Esta ecuación expresa que cualquier anillo de crecimiento (R) formado en un determinado año (t) es una función de la tendencia de crecimiento relacionada con la edad (A), condiciones climáticas (C), factores internos del bosque que puedan afectar el crecimiento (D1), factores externos del bosque que puedan afectar el crecimiento (D2) y la acción de cualquier otro factor aleatorio (E) que no sea tomado en consideración por las anteriores.

4.7.7 Principio de selección del sitio

Este principio se basa en la premisa de que las características del sitio donde crecen los árboles, como el suelo, la topografía y las condiciones climáticas locales, pueden intervenir en la formación de los anillos de crecimiento, por lo tanto, en la interpretación de los datos dendrocronológicos. La dendrocronología requiere que sus muestras estén afectadas similarmente por una agrupación determinada de factores limitantes, así como también el muestreo es deliberadamente estratificado para resaltar observaciones de esa población de ancho de anillos que contiene la información deseada, pero es limitada a una especie en particular para conservar la respuesta genética más o menos constante (Fritts, 1976).

En la dendrocronología se deben seleccionar sitios que maximicen la señal investigada, se deben identificar y seleccionar en un área ecológicamente homogénea donde se tomaran las muestras de los árboles para el estudio correspondiente (McCarthy, 1998; Kaennel y Schweingruber, 1995).

4.7.8 Principio de replicación

Este principio menciona que se debe tomar más de una muestra por árbol para el estudio y más muestras para un mismo sitio. Esto permite hacer comparaciones estadísticas de variabilidad entre los árboles y entre grupos de árboles. Las mediciones de esta variación proporcionan información valiosa sobre como los factores del sitio y clima controlan el crecimiento.

Al tomar más de una serie de anillos por árbol se reduce más la variación dentro de un mismo árbol (Fritts, 1976; Grissino-Mayer, 2001).

4.7.9 Principio de la sensibilidad

La sensibilidad es uno de los principios básicos de la dendrocronología, este principio puede ser evaluado a través de un parámetro estadístico denominado “sensibilidad media”, el cual indica las diferencias relativas en anchura entre los anillos adyacentes, cuya variación está definida por las fluctuaciones de un factor climático limitante, que para México generalmente es la lluvia.

Este principio señala que la observación de los anillos de crecimiento puede servir de guía sobre como los factores ambientales se pueden convertir en un factor limitante del proceso de crecimiento. La variación del ancho de anillo como consecuencia de la presencia de un factor limitante recibe el nombre de “sensibilidad”, por otro lado, la carencia de variación recibe el nombre de “complacencia”.

Cuanto mayor sea la limitación de crecimiento ocasionada por factores ambientales, mayor será la variación del ancho de los anillos de crecimiento dentro de un árbol, el crecimiento “sensible” existe cuando hay un alto grado de variación anual, produciendo alteraciones entre anillos anchos y estrechos a través del tiempo (Fritts, 1976; McCarthy, 1998; Martínez, 1996).

4.8 Parámetros dendrocronológicos

Para determinar el potencial de una especie arbórea para el desarrollo de series de tiempo dendroclimáticas existe una serie de parámetros específicos. Los estudios enfocados a evaluar el potencial dendrocronológico, se basan principalmente en cuatro: (1) la sensibilidad media, (2) la desviación estándar, (3) la autocorrelación de primer orden y (4) la proporción señal ruido. Sin embargo, también se consideran otros parámetros estadísticos importantes como son: la cantidad de problemas que presentan las muestras al momento del fechado y la asociación de las series de crecimiento, es decir, la Inter-correlación entre series.

Los valores para los criterios se obtienen a partir del análisis de las series de crecimiento anual, de los programas básicos utilizados en el desarrollo de estudios dendrocronológicos COFECHA y ARSTAN.

Constante-García *et al.*, (2010) señala los siguientes parámetros para el análisis dendrocronológico:

4.8.1 Sensibilidad

El valor de la sensibilidad media varía de acuerdo a la especie y a la región climática, pero de manera general se indica que un valor de 0.65 se presenta en especies muy sensibles y de 0.15 para especies poco sensibles. Es posible determinar la sensibilidad de una especie a simple vista, al observar la variabilidad en el grosor de sus anillos, o de manera estadística por medio de cada uno de los criterios dendrocronológicos antes descritos.

El ancho de los anillos de crecimiento puede variar y no únicamente por el cambio climático, sino que también se pueden producir alteraciones como consecuencia de la edad del árbol, la altura del tallo donde se toma la muestra, las condiciones y a la productividad del sitio. En los estudios del ancho de anillo de crecimiento y la variación del cambio climático, es recomendable calcular los cambios sistemáticos de la tasa de ancho de anillos asociados con la edad, para removerlos de las mediciones (León y Espinoza de Pernia, 2001; Tomazello Filho *et al.*, 2001).

4.8.2 La desviación estándar

Es una media de la variación en crecimiento del año previo con respecto al año actual, antes de que las series sean estandarizadas. Generalmente los valores de este parámetro oscilan entre 0.3 a 0.8. Es una medida que tiene poca utilidad cuando se realiza una reconstrucción climática, pero es indicativo de la fluctuación existente entre crecimientos.

4.8.3 La autocorrelación

La autocorrelación es una medida de cómo gran proporción del ancho del anillo en un año “n” es influenciado por el grosor del anillo en un año “n-1”. Las series de anillos de árboles presentan esta correlación denominada de primer orden o Lag-1, principalmente porque el proceso fisiológico en árboles, crea un lag o retraso en respuesta al clima, y también porque las anomalías del clima persisten de un año al siguiente. Valores altos de inter correlación y sensibilidad media, se asocian con una baja autocorrelación.

Los valores más bajos de autocorrelación se dan en el rango de 0.3 a 0.5, estos valores se encuentran en especies con una alta sensibilidad; los valores más comunes oscilan entre 0.6 y 0.8, y los más altos presentan valores por arriba de 0.9, Por ejemplo, en el caso de *T. mucronatum* esta muestra alta autocorrelación, lo que produce que el crecimiento de un año específico, este influenciado por el crecimiento ocurrido hasta dos años previos.

4.8.4 Proporción señal-ruido

Se denomina señal a la información de interés y ruido al resto, visualizado de esta manera, una serie de anillos de árboles es un conjunto de varias señales que pueden ser señal o ruido, según la información que se desee resaltar o extraer.

El concepto de “señal” en dendrocronología se refiere a la común que existe entre todas las muestras o cores (núcleos) que forman una misma cronología, mientras que la variabilidad específica de cada árbol, o de cada muestra, constituye el “ruido” que carece de valor dendroclimático (Cuentan, 2000).

Para indicar el buen potencial dendrocronológico de una especie, esta debe presentar una alta inter correlación entre series, alta sensibilidad, alta desviación estándar, alta relación señal-ruido y una baja autocorrelación de primer orden (Delgado, 2000).

4.8.5 Inter correlación entre series

La Inter correlación entre series representa la confiabilidad de la cronología, es la medida influenciada por la señal climática común en todas las muestras de los árboles del sitio, entre más cercana al valor alto determinado mayor será la confiabilidad. Los valores correspondientes de este parámetro oscilan de 0.4 a 0.9, sin embargo, la mayoría de las cronologías en general, muestran valores que oscilan entre 0.55 y 0.75.

4.8.6 Problemas de crecimiento

Este criterio se refiere al número de problemas susceptibles en la muestra o bien a la baja sincronía entre los anillos de diferentes muestras para un mismo periodo, como consecuencia la variable se ve reflejada de manera directa en la correlación, lo ideal es tener series de crecimiento sin ningún problema para cualquier estudio realizado, es decir, series con una alta sincronía entre los crecimientos anuales.

4.8.7 El crecimiento anual y la sensibilidad

Para su formación los anillos de crecimiento anuales dependen de ciertas condiciones, dentro de lo que es un ciclo anual de crecimiento, de forma que, en zonas intertropicales, durante la mayor parte del año la actividad del cambium vascular está presente, debido a las condiciones de humedad y temperatura favorables, en zonas desérticas, el movimiento se restringe al periodo de lluvias y en zonas templadas, se inicia cuando la temperatura incrementa (Borchert, 1999; Creber y Chaloner, 1984).

Las fases de crecimiento y la inactividad de la planta están muy ligadas con los cambios ambientales, de tal manera, que las bajas temperaturas inducen generalmente a periodos de inactividad en los meristemos, mientras que las condiciones húmedas y cálidas provocan su reactivación, siendo esta periodicidad en el cambium vascular, la que determina el crecimiento anual y su amplitud (Ajmal e Igbal, 1987; Lim y Soh, 1997).

La variabilidad marcada del ancho de anillo es resultado de las consecuencias por un factor limitante de crecimiento, recibe el nombre de “sensibilidad”, en tanto la poca variabilidad en el crecimiento en una especie, se denomina “complacencia”. Los árboles complacientes producen anillos uniformes que muestran condiciones climáticas constantes todos los años, esto como resultado por la alta disponibilidad de agua y suelos fértiles (McCarthy, 1998; Fritts, 1976). (Figura 1,2).



Figura 1. Ejemplo de sección transversal en la cual se exhiben los anillos de crecimiento anual de una especie complaciente.

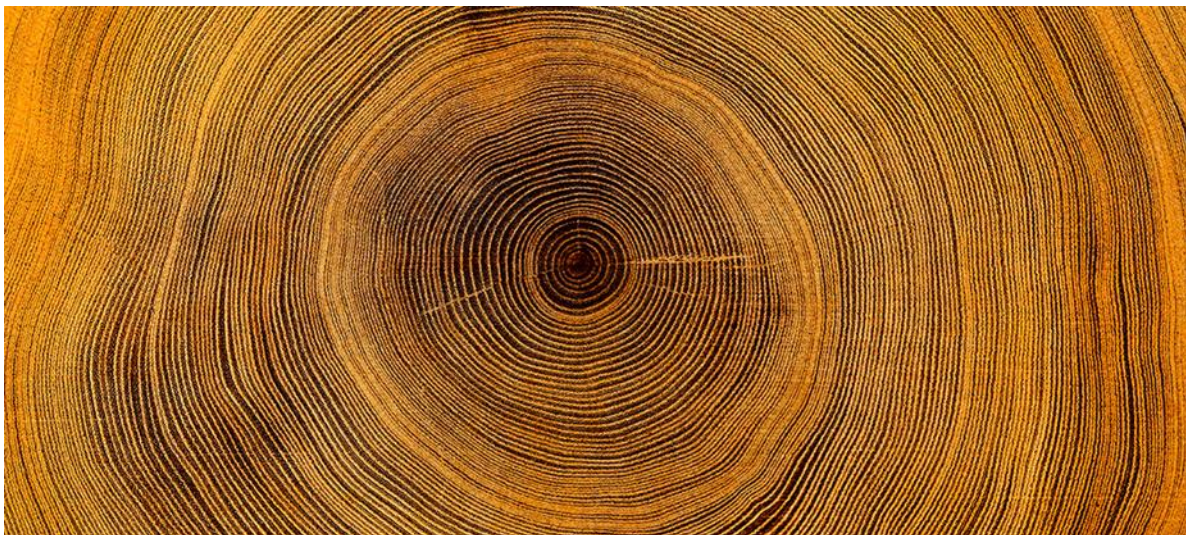


Figura 2. Ejemplo de sección transversal con una alta variabilidad en el ancho de los anillos de crecimiento.

4.9 Descripción de la especie

4.9.1 Información taxonómica de la especie

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Magnoliopsida

Subclase: Rosidae

Orden: Fabal

Familia: Fabaceae

Género: Lysiloma

Especie: *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth

4.9.2 Sinonimias

Acacia bahamensis (Benth.) Griseb.

Acacia latisiliqua (L.) Willd.

Lysiloma bahamense Benth.

Lysiloma bahamensis Benth.

Mimosa latisiliqua L.

Leucaena latisiliqua (L.) Gillis

4.9.3 Nombres comunes en México

Comúnmente se le conoce como Tzalam, en algunas partes como Spolillo, Sukte, en maya se le conoce como Bo'ox salam, Dzalam y aunque la forma de escribirlo cambia en algunos casos, por ejemplo: Tsalam y Tzalam, no hay una diferencia en la pronunciación de estas dos.

4.9.4 Forma biológica

Lysiloma latisiliquum es un árbol (Figura 3 a, b) que alcanza de 20 metros de altura y con diámetro normal de 70 cm, la corteza es de un tinte gris con fuertes placas longitudinales. La copa es amplia, extendida, sosteniendo hojas alternas. Las ramas jóvenes son de color Moreno oscuro con abundantes lenticelas pardas longitudinales. Tiene una corteza lisa finamente fisurada gris pardusca, con algunas lenticelas circulares. La albura es castaño rosáceo claro a blanquecino. Es durable a los agentes destructores. La madera en general no presenta olor o sabor distintivo. Alcanza buen brillo cuando es pulida y es madera de mediana dureza y peso, con una densidad de 0.77 g/cm³. (Pennington & Sarukhán, 2005; Record y Hess, 1943).

4.9.5 Hojas

Las hojas le dan forma a la copa extendida, compuesta de hojas alternas, bipinnadas, con folíolos oblongos de ápice agudo, con yemas de 3 a 4 mm de largo, irregulares, rodeadas por estipulas agudas, pardo oscuras (Figura 3 c).

Presenta hojas dispuestas en espiral, bipinnadas, de 11 a 20 cm de largo incluyendo el peciolo, compuestas por 3 a 6 pares de folíolos primarios opuestos, cada folíolo primario formado por 18 a 35 pares de folíolos secundarios, sésiles, opuestos, de 7 x 2 a 13 x 3 mm, lineares u oblongos, margen entero, ápice agudo, base truncada muy asimétrica; el último par de folíolos secundarios más redondeado; verde oscuro en ambas superficies y escasamente pubescentes en el envés, con una glándula cónica a veces a la mitad del peciolo o en el primer par de folíolos en los dos últimos pares de folíolos, peciolo y pecióculos pulvinados.

Los árboles de esta especie pierden las hojas en la temporada de sequía. (Pennington & Sarukhán, 2005).

4.9.6 Inflorescencia y flores

La inflorescencia (Figura 3 d) conforma grandes racimos de cabezuelas, pedunculadas y blancas. El fruto es una vaina plana, seca parecida a una cinta que se retuerce en el eje axial y se torna color café oscuro al madurar (Duno R. S, 2013).

Las flores son cabezuelas solitarias o agrupadas, axilares, a veces terminales, de 1.5 cm de diámetro, sobre pedúnculos de 2 a 3 cm de largo, escasamente pubescentes o glabros; flores perfumadas, actinomorfas; cáliz verde, ca, 1.5 mm de largo, angostamente infundibuliforme con 5-6 lóbulos lanceolados y 5-6 costillas longitudinales, pubescentes en la superficie exterior; corola, ca, 3 mm de largo, infundibuliforme, con 5-6 lóbulos lanceolados, rojizos, pubescentes; estambres numerosos 1 cm de largo, unidos justamente arriba de la base, glabros; los filamentos blancos y las anteras amarillas; ovarios súperos, alargados de 1 mm de largo, glabro, terminado en un estilo delgado filamentoso, que apenas excede los estambres; estigma pequeño, simple.

La floración se presenta durante los meses de marzo a junio, es polinizada por abejas y murciélagos como el *Artibeus jamaicensis* (Pennington & Sarukhán, 2005; Rico-Gray, 1991, MacSwiney *et al.*, 2017).

4.9.7 Fruto

Los frutos son vainas de 9 a 15 cm de ancho dehiscentes, en forma aplanada, agudas, color café oscuro (Figura 3 e).

4.9.8 Semilla

Las semillas son abundantes (Figura 3 f). Color pardo moreno y aplanadas, de 7.6 a 8 mm de largo, de 3 a 4 mm de ancho y de 1.1 a 1.5 mm de grosor. La dispersión de las semillas se da por el lanzamiento desde los frutos cuando están maduros, entre los meses de septiembre a noviembre (Flores, 1990).

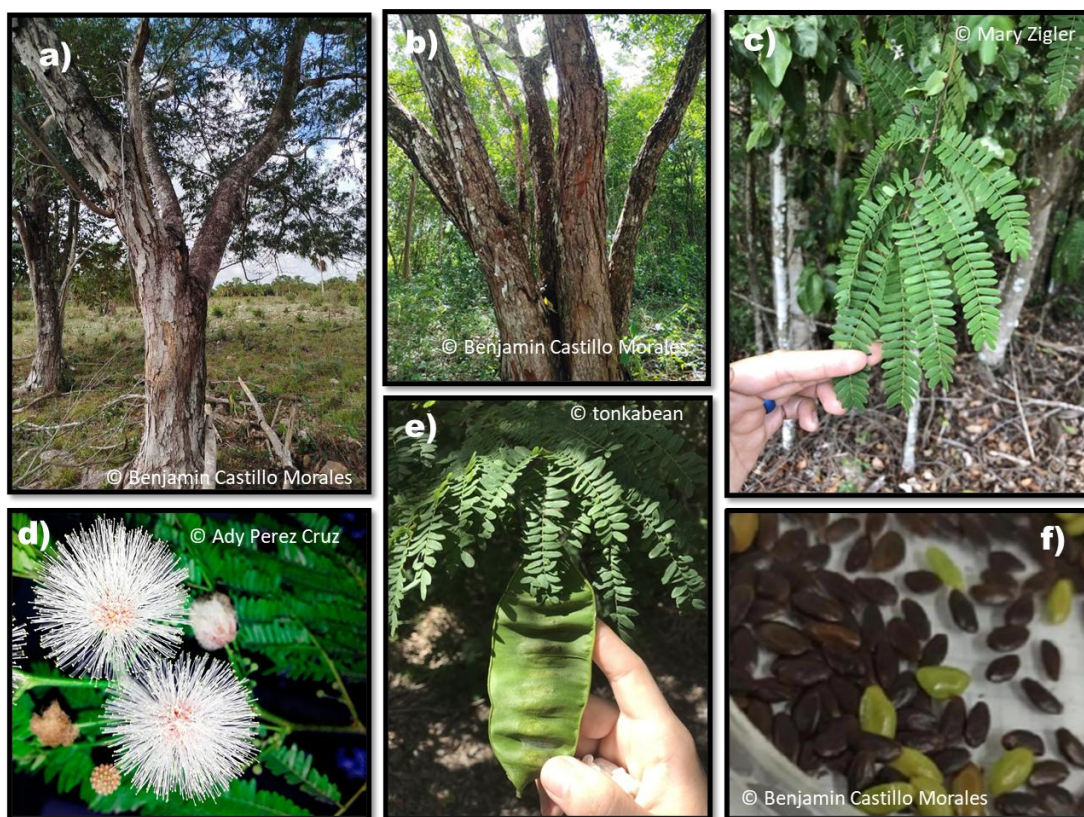


Figura 3. a) Forma bilógica, b) Corteza, c) Hoja, d) Flor, e) Fruto y f) Semillas del árbol de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth.

4.9.9 Tallo y anillos

Los anillos de crecimiento (Figura 4) de Tzalam son difíciles de distinguir cuando la sección transversal es demasiado irregular, están delimitados por una zona de parénquima marginal y por fibras con paredes engrosadas. Durante el estadio juvenil, esta madera puede formar anillos o zonas de crecimiento en ondas irregulares, que en la madurez de la planta se hacen más uniformes y circulares. En algunas porciones con anillos ondulados, se presentan zonas de crecimiento pocas desarrolladas y de apariencia apilada en las irregularidades, lo que dificulta el reconocimiento del límite de los anillos. Por ello la distinción de los anillos es más sencilla en las zonas expandidas de la onda (Duno, 2013).

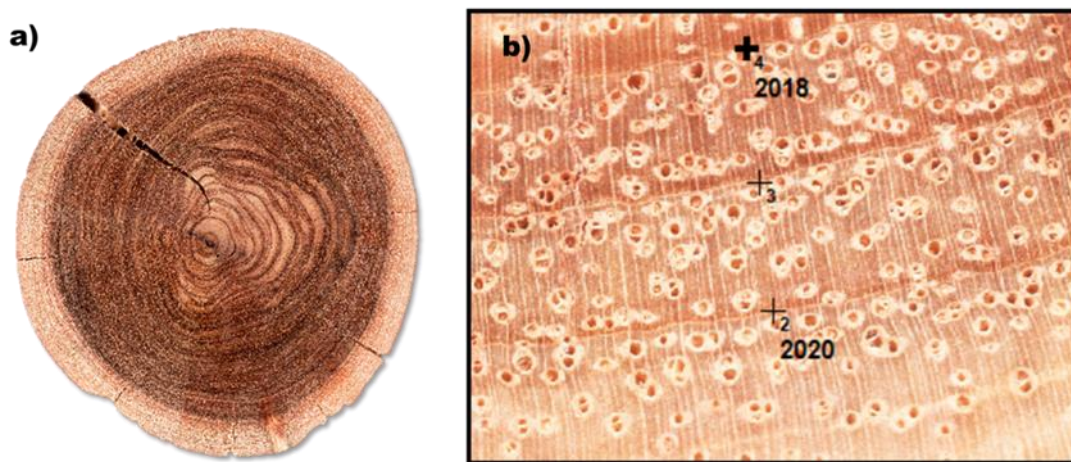


Figura 4. a) Sección trasversal de *L. latisiliquum* y b) Anillos decrecimiento (Fotos para este trabajo, BCM).

4.9.10 La madera y usos a nivel nacional

En el estado de Yucatán esta planta es recomendada para curar llagas o heridas, empleando las hojas que se asan o tuestan para hacer un polvo que se coloca sobre la parte afectada (Medicina Tradicional Mexicana, 2009). Otros aprovechamientos de este árbol son como alimento de forraje para ganado bovino y equino, para obtención de postes y en la construcción de cercos vivos. Por ser una especie pionera, el Tzalam puede ser utilizado para restaurar sitios que han sido quemados y en la alimentación de ganado en las zonas secas. Es una planta melífera que genera miel color ámbar oscuro y de gusto agradable (Flores, 2001; Rico-Gray, 1991; Cordero *et al.*, 2003).

La madera de *L. latisiliquum* se usa para la fabricación de duela, lambrin y parquet, así como ocasionalmente para la fabricación de chapa para vistas de madera terciada; tiene buenas características de aserrado, pero presenta algunos problemas de secado y es relativamente susceptible a la pudrición (humedad); aunque tiene bajo rendimiento en chapa podría usarse en el futuro para producir vistas para madera terciada. (Pennington & Sarukhán, 2005).

4.9.11 Distribución

Cuenta con vegetación secundaria la cual es derivada de la selva mediana subcaducifolia, que se distribuye en la vertiente del pacífico, en el centro de Veracruz y en la parte Centro y Norte de la Península de Yucatán en forma de franja y su composición florística es característica de cada lugar (Pennington & Sarukhán, 2005).

Esta especie es originaria del sur de Florida, las Bahamas, y el Caribe, sur de México y norte de Centro América. En México se distribuye en toda la Península de Yucatán y Chiapas. Habita en clima cálido húmedo a seco y se encuentra en los tipos de vegetación de selva baja caducifolia, sabana, selva mediana subcaducifolia y selva mediana subperennifolia. Forma parte siempre de altitudes menos a 150 m. *L. latisiliquum* es una especie pionera de áreas que han sido perturbadas por incendios, enriqueciendo la tierra con nitrógeno (Duno, 2013).

4.9.12 Estudios relacionados con la especie

Se realizó un estudio en el municipio de Escárcega, Campeche, México., con el tema: Crecimiento e incremento en diámetro de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. en bosques secundarios en Escárcega, Campeche, México para analizar el comportamiento del crecimiento en diámetro de esta especie, en un periodo de 20 años de desarrollo por López-Torres y Tamarit-Urias, (2005).

En Quintana Roo se realizó un estudio sobre crecimiento y regeneración avanzada, tasas de crecimiento y las técnicas sustentables para su aprovechamiento por Negreros-Castillo y Martínez-Salazar, (2011).

Otro estudio realizado en la región fue sobre los modelos alométricos y los efectos mixtos que pueden describir la relación altura total – diámetro normal, con el título: Modelos de altura-diámetro con efectos mixtos para *Lysiloma latisiliquum* (L) Benth. en Quintana Roo, México por Hernández-Ramos *et al.* (2020).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El estudio fue realizado en dos sitios de la Península de Yucatán, región localizada en el sureste de México. El primer sitio se estableció en Bethania (BET) en el municipio de Campeche, a 18 km de la ciudad de Campeche, Campeche (INEGI, 2024), con las coordenadas geográficas de referencia a 19°54'32.57" Latitud Norte y 90°22'0.87" Longitud Oeste (Figura 5). Mientras el segundo sitio se estableció en el ejido Sudzal Chico (SUD) municipio de Tekax, a 145 km al sur de la ciudad de Mérida, en el estado de Yucatán, con coordenada geográfica de referencia a 19°42'37.64" Latitud Norte y a -89°6'14.88" de Longitud Oeste (Figura 5).

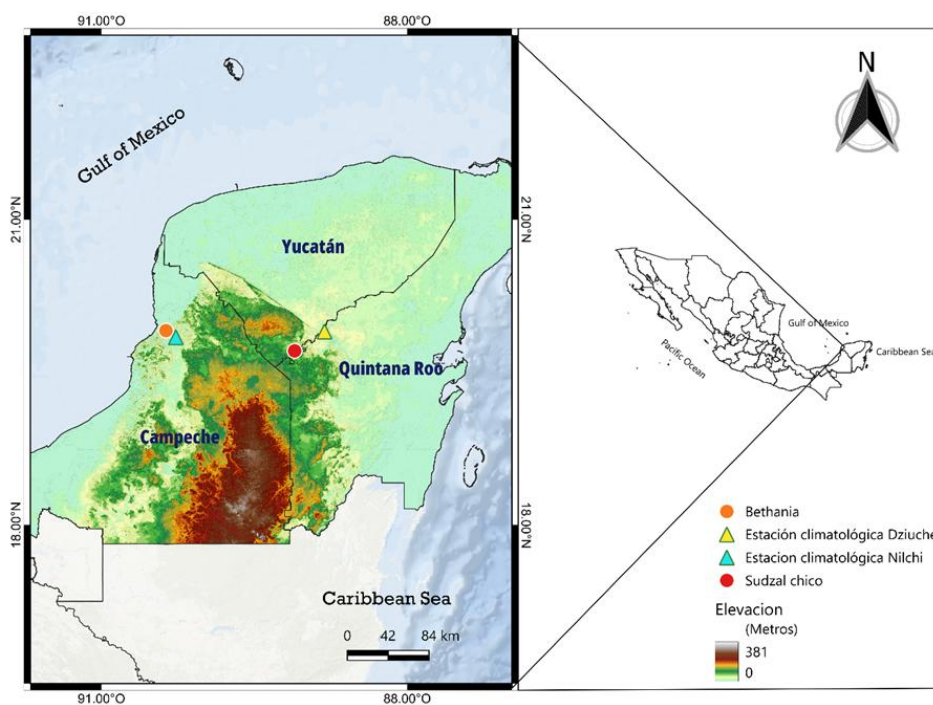


Figura 5. Ubicación geográfica de los dos sitios de muestreo y de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

5.1.1. Aspectos físicos de Bethania

5.1.1.1 Clima

El tipo de clima corresponde a Aw0 (w) cálido subhúmedo con lluvias en verano y bajo porcentaje de lluvias invernales, la época de sequía abarca los meses de diciembre a abril (5 meses) y la época de lluvia de mayo a noviembre, con una precipitación promedio anual de 1250 mm (Figura 6).

La temperatura media anual es de 30.8 °C siendo los meses de marzo y abril los de mínima precipitación y de los valores más altos.

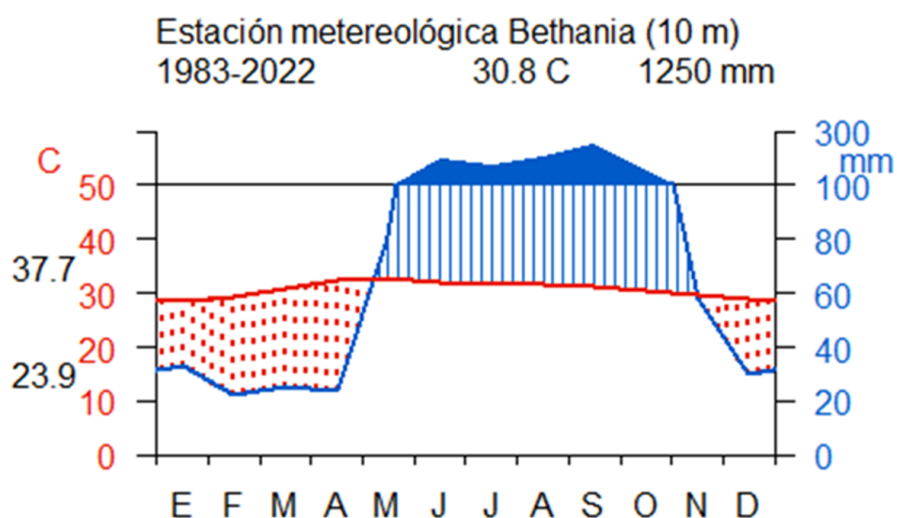


Figura 6. Climograma para el sitio de Bethania 1983-2022.

5.1.1.2 Suelo

Es de tipo luvisol (k' ankab) que se caracteriza por carecer de roca y carbonatos de calcio, es profundo (80 cm), tiene buena cantidad de arcilla en el subsuelo, es uno de los suelos más importantes para la agricultura en la península por su retención de humedad, es de color rojizo a pardo rojizo y de fertilidad moderada (INEGI, 1985a; García, Mizrahi, & Bautista, 2005).

5.1.1.3 Hidrografía

Los estudios señalan que la selva mediana subperennifolia de la localidad está caracterizada por elementos florísticos de ambientes sujetos a inundación, presentando condiciones de ambientes de inundación temporal, lo cual es un factor clave para la estructura y composición de la vegetación (López et al., 2017).

5.1.1.4 Fisiografía

El relieve es de ambiente kárstico. El terreno es predominantemente plano o de planicie sub horizontal (Zamora-Crescencio *et al.*, 2017), es una formación de planicie con elevaciones bajas, alrededor de los 10 m sobre el nivel del mar, la altitud media de la localidad es de aproximadamente 17 m (SEMARNAT, 2025).

5.1.1.5 Geología

Las rocas son sedimentarias pertenecientes al Cenozoico y de formación caliza de edad Eocénica del Terciario Inferior (INEGI, 1985b).

5.1.1.6 Vegetación

Presenta una vegetación secundaria derivada de la selva mediana subcaducifolia con la presencia de las siguientes especies arbóreas como *Croton arboreus*, *Lonchocarpus rugosus*, *Diospyros anisandra*, *Cordia alliodora*, *Bauhinia divaricata*, *Lysiloma latisiliquum*, *Zuelania guidonia*, *Piscidia piscipula*, *Cordia alliodora*, *Coccoloba cozumelensis*, *Diospyros anisandra*, *Gymnopodium floribundum* y *Lonchocarpus xuul* (Zamora-Crescencio et al., 2018).

5.1.2. Aspectos físicos de Sudzal Chico

5.1.2.1 Clima

Corresponde al cálido subhúmedo (Awo'') el más seco de los subhúmedos, con un régimen de lluvias en verano, poca oscilación térmica, la precipitación total anual es de 1201 mm, la mínima ocurre en el mes de febrero y la máxima en septiembre (Figura 7). La temperatura media anual es de 25.9 °C la época de sequía abarca los meses de enero a abril (4 meses).

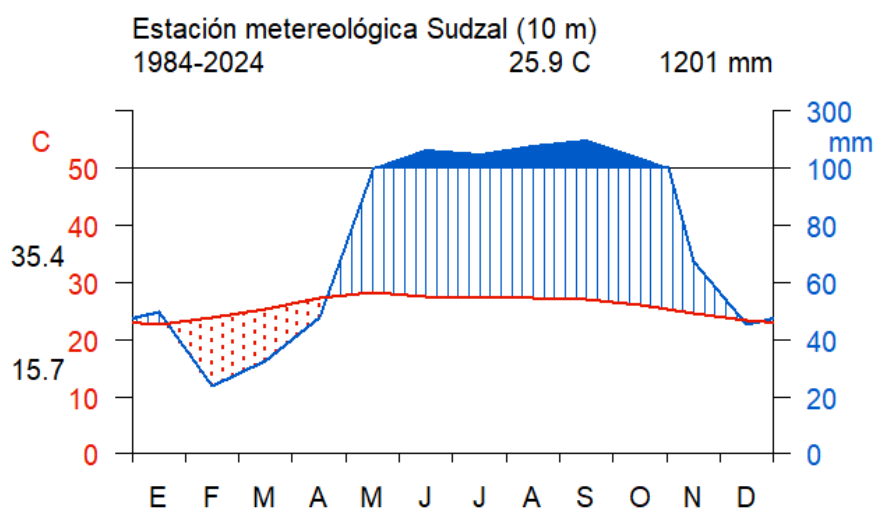


Figura 7. Climograma para el sitio de Sudzal Chico 1984-2024.

5.1.2.2 Suelo

Se desarrolla en la mayor parte de la zona de estudio son los litosoles réndzicos (INEGI, 1984a). Los litosoles réndzicos son suelos derivados de rocas calcáreas de color pardo oscuro y textura arcillosa enriquecida con aporte de materia orgánica.

5.1.2.3 Hidrografía

Es una zona de drenaje superficial escaso o nulo debido a la naturaleza kárstica de las rocas, que son permeables. La mayor parte del agua se infiltra y circula a través del acuífero subterráneo (INEGI, 2010; García Gil & Graniel Castro, 2006).

5.1.2.4 Fisiografía

Su altitud sobre el nivel del mar varía de 100 a 150 m. El relieve de la península de Yucatán es de ambiente kárstico. El relieve no corresponde a las llanuras de la costa norte, si no a zonas de lomas y hundimientos como parte de la Península (Gutiérrez et al, 2011).

5.1.2.5 Geología

Geológicamente, el sitio está compuesto por rocas sedimentarias del Cenozoico. Los afloramientos principales son calizas, margas, lutitas y areniscas del Eoceno. Además, existen pequeñas áreas con materiales aluviales en los valles y acumulaciones residuales en la base de los cortes escarpados. (INEGI, 1984b). Por otro lado, el drenaje es subterráneo sin flujos superficiales de agua, excepto durante la temporada de tormentas cuando se generan escurrimientos visibles por la superficie a través de los canales. (Gates, 1999).

5.1.2.6 Vegetación

El tipo de vegetación corresponde a una selva mediana subcaducifolia con dominancia en número de especies de las familias Fabaceae, Euphorbiaceae, Rubiaceae, Flacourtiaceae, Polygonaceae y Ebenaceae y las especies más abundantes son *Bursera simaruba*, *Caesalpinia gaumeri*, *Coccoloba cozumelensis*, *Guettarda elliptica*, *Hippocratea excelsa*, *Karwinskia humboldtiana*, *Lysiloma latisiliqua*, *Manilkara zapota*, *Maytenus schippii*, *Metopium brownei*, *Neea psychotrioides*, *Piscidia sartorianum*, *Talisia paucidentata* y *Vitex gaumeri* (Gutiérrez et al., 2011).

5.2 Muestreo Dendrocronológico

Las muestras fueron obtenidas en marzo de 2024 para el sitio de Bethania (BET) y en los meses de marzo-abril de 2025 para el sitio de Sudzal Chico (SUD). En cada sitio se aplicó un muestreo destructivo y con la ayuda de una motosierra (Stihl® modelo 250) se obtuvieron un total de 44 secciones transversales (rodajas). En el sitio BET fueron extraídas 19 secciones transversales y en el sitio SUD 25 secciones transversales. La sección transversal de cada árbol fue obtenida a la altura del pecho (~1.30 m) o en la parte más cilíndrica del tronco como los sugiere López (2020) y un grosor de 3 a 5 cm. En función a la disponibilidad en la vegetación y los permisos de los propietarios para derribar individuos de *L. latisiliquum*, se trató de muestrear individuos con la mayor edad posible. En campo cada rodaja fue etiquetada con una clave de identificación del sitio, fecha, número de árbol, altura total y diámetro de la sección transversal.

5.3 Procesamiento de secciones transversales

Todas las muestras fueron trasladadas a laboratorio donde fueron secadas a temperatura ambiente. Cada sección transversal fue pulida con una lijadora orbital utilizando lijas de diferentes granulometrías (36-1200 granos cm^{-2}) para facilitar la observación de los anillos de crecimiento. Posteriormente, en cada rodaja se marcaron de dos a tres radios, distantes entre sí, para garantizar por lo menos una sección transversal que sea fechada correctamente.

Los anillos de crecimiento fueron identificados colocando la muestra (rodaja) bajo un estereoscopio (Amscope® Se306r-pz) para delimitar el año de su formación. Cada radio fue escaneado a una resolución de 2400 dpi en formato de imagen “jpg” utilizando un scanner (EPSON® V39). La medición de anillos de crecimiento se realizó con una precisión de 0.01 mm con el programa CooRecorder v.9.8.1 (Larsson, 2010). Las series de ancho de anillo total generadas fueron convertidas en el formato “.rwl” con ayuda del programa Cybis CDendro versión .9.8.1. (Cybis Elektronik & Data AB, Sweden). Finalmente, el fechado correcto y la medición de cada anillo fue verificado con el programa COFECHA, comparando el total de series obtenidas por árbol a través de la técnica de fechado cruzado (Holmes 1986; Grissino-Mayer 2001).

5.4 Desarrollo de la cronología

Todas las series individuales de ancho de anillo fechadas correctamente fueron estandarizadas con la librería *DpLR* (Dendrochronology Program Library) del software estadístico R (R Development Core Team). Un Spline dependiente de la edad fue aplicado para eliminar las tendencias no climáticas y las relacionadas

con la edad, después se calculó una función de media bi-ponderada robusta para reducir la influencia de los valores atípicos (Cook, 1985).

La cronología versión residual fue la seleccionada para los posteriores análisis. Algunas series individuales fueron descartadas debido a la correlación baja con la serie maestra de cada sitio. Eliminar series individuales es conveniente para construir una correlación a partir de una serie maestra robusta y precisa, para mejorar el valor de la correlación con la influencia climática (Ortega, 2014; Cerano, 2004; Lara *et al.*, 2000). La robustez y la confiabilidad de la cronología generada fue evaluada con los siguientes estadísticos dendrocronológicos: Inter-correlación entre series, sensibilidad media, auto-correlación de primer orden, relación señal ruido y señal expresada de la población (EPS, Bartens *et al.*, 2012).

5.5 Relaciones clima-crecimiento

La influencia clima (precipitación y temperatura) en el crecimiento radial de *L. latifolium* en cada sitio fue determinada con un análisis de correlación de Pearson's y un nivel de significancia del 95 %. Dado a que el crecimiento puede estar influenciado por las condiciones climáticas del año actual, pero también del año anterior (Fritts, 1976). El análisis de correlación se efectuó en una ventana de dos temporadas de crecimiento consecutivas que abarcó 24 meses.

Los datos climáticos mensuales de precipitación (Prec), temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin), fueron obtenidas de la red de estaciones climatológicas de México (Comisión Nacional del Agua).

La estación meteorológica más cercana al sitio BET es Nilchi (19°50'41.99" N, 90°16'12.04" O) y abarca un periodo de datos completos de 1983-2022, mientras la estación Dziuche (19°54'4.26" N, 88°48'42.90" O) es la estación meteorológica más cercana al sitio SUD y la información climática completa abarca un periodo de 1983-2024. Los análisis de correlación se efectuaron de forma mensual y estacional, asimismo, la estabilidad temporal de las relaciones clima-crecimiento fueron examinadas a través de correlaciones móviles en ventanas de 25 años y un rezago de 5 años. Los valores de los coeficientes de correlación de Pearson's fueron obtenidos con el paquete treeclim del programa estadístico R (Zang y Biondi, 2015).

5.6 Relaciones índice de sequía-crecimiento

En este estudio se analizó la influencia de índices de sequía en el crecimiento secundario del Tzalam, para ello se seleccionó el Índice de Severidad de Sequía de Palmer Autocalibrado (scPDSI) (Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index, por sus siglas en inglés) y el índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, por sus siglas en inglés).

El índice scPDSI es una medida de la desviación acumulada de las condiciones normales de humedad climática, donde los valores positivos indican condiciones húmedas y los negativos, sequía. El índice utiliza una escala estandarizada para permitir comparaciones entre diferentes regiones climáticas. El scPDSI se calcula a partir de series temporales de precipitación y temperatura, junto con parámetros fijos relacionados con las características del suelo/superficie

en cada ubicación (van der Schrier *et al.*, 2006). En tanto, el índice SPEI mide la diferencia entre el suministro de agua (precipitación) y la demanda hídrica (evapotranspiración potencial) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). Los valores de SPEI cercanos a 0 representan condiciones casi normales, los valores positivos representan condiciones superiores a lo normal (más húmedas) y los valores negativos representan condiciones inferiores a lo normal (más secas). Los valores del SPEI se clasifican en rangos para determinar la intensidad de la sequía: sequía extrema (≤ -1.5), sequía severa ($-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$) y sequía moderada ($-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$).

Las bases de datos de scPDSI y SPEI fueron descargadas del KNMI Climate Explorer (Trouet & Oldenborgh, 2013; <http://climexp.knmi.nl/>) para cada sitio de estudio. Los análisis de correlación se efectuaron de forma mensual y estacional entre la cronología residual y los índices de sequía a través de la obtención de coeficientes de correlación de Pearson's en el paquete *treeclim* del programa estadístico R (Zang y Biondi, 2015).

5.7 Correlaciones espaciales

Se analizó la relación entre el crecimiento de los árboles de Tzalam y la temperatura superficial del mar (SST) (Sea Surface Temperature, por sus siglas en inglés) del Pacífico ecuatorial. El mapa de correlación espacial fue realizado a partir de conjuntos de datos HadISST1 (Hadley Centre sea Ice and Sea Surface Temperature data set, por sus siglas en inglés) basados en campos mensuales de $1^\circ \times 1^\circ$ para grupos con una correlación positiva significativa en el clima.

VI. RESULTADOS

6.1 Límites de los anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento de *L. latisiliquum* a simple vista son difíciles de distinguir, particularmente en la madera que se encuentra cerca de la corteza (Figura 8). A nivel macroscópico se encontró que el límite entre anillos está demarcado por parénquima marginal y por fibras con paredes engrosadas (Figura 9 y 10). En algunas porciones con anillos ondulados, se presentan zonas de crecimiento poco desarrolladas y de apariencia comprimida, lo que dificulta el reconocimiento del límite de los anillos.

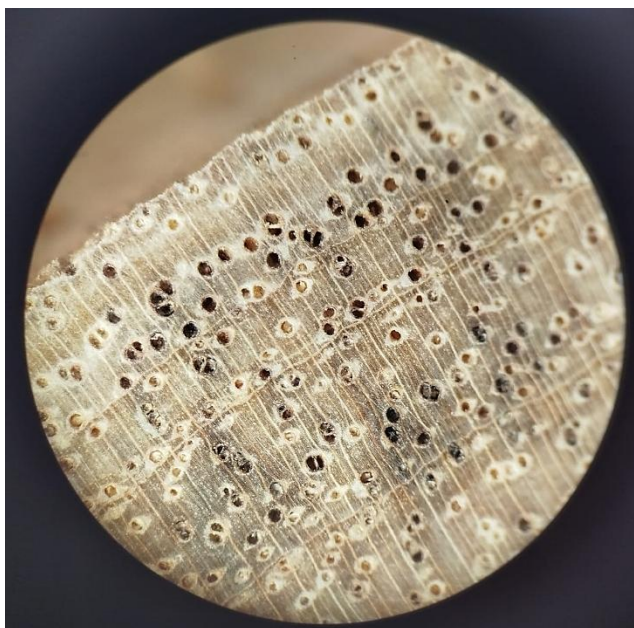


Figura 8. Vista del límite de crecimiento de los anillos en una sección transversal de *L. latisiliquum*.



Figura 9. Límite de los anillos de crecimiento definido por un parénquima marginal en los árboles de *L. latisiliquum*.



Figura 10. Sección transversal con presencia de anillos de crecimiento y fechado de la sección transversal.

En el sitio BET se identificaron que los años con mayor crecimiento en el ancho de anillos son 1980-1981, 1984-1985, 1989-1990 y los años con el menor crecimiento son 2022-2023, 2002-2003, 2011-2012 (Cuadro 1) (Figura 11). En tanto para el sitio SUD los años que mostraron un mayor crecimiento en el ancho de anillo son 1938-1939, 2000-2001, 1979-1980 y los años que registraron valores bajos en los anillos son 1942-1943, 1939-1940, 1934-1935 (Cuadro 1) (Figura 12).

Cuadro 1. Años donde se identificaron mayor y menor crecimiento en el ancho de anillo de los dos sitios de estudio.

Sitio	Años	Crecimiento mayor (mm)	Años	Crecimiento menor (mm)
Bethania	1980-1981	4.418	2022-2023	0.764
	1984-1985	4.217	2002-2003	0.803
	1989-1990	4.192	2011-2012	0.810
Sudzal Chico	1938-1939	3.764	1942-1943	0.285
	2000-2001	3.333	1939-1940	0.516
	1979-1980	3.198	1934-1935	0.575

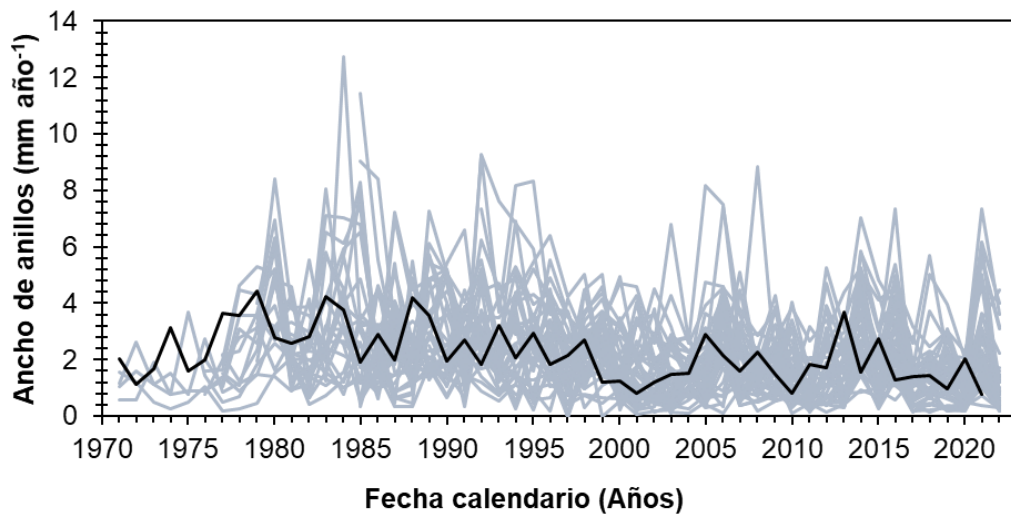


Figura 11. Gráfica de crecimiento radial para el sitio Bethania, Campeche, Campeche para un periodo de 51 años (1972-2023), la línea negra representa el crecimiento promedio.

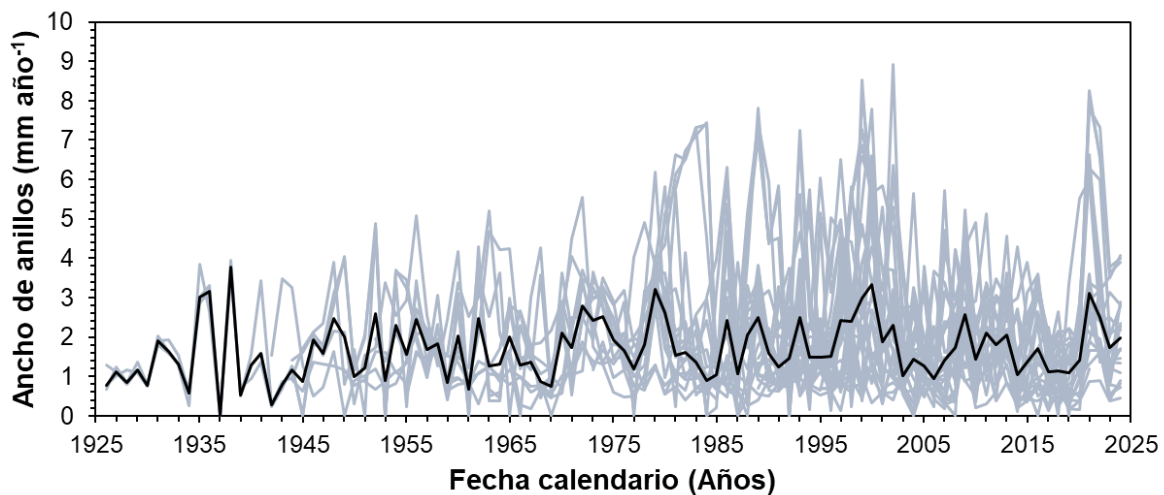


Figura 12. Gráfica de crecimiento para el sitio Sudzal Chico, Tekax, Yucatán para un periodo de 99 años (1926-2024), la línea negra representa el crecimiento promedio.

6.2 Cronologías de índice de anillo

Para el sitio BET, de un total de 45 series inicialmente prefechadas, se logró fechar correctamente 22 series de crecimiento, las cuales provienen de 11 individuos. Estas series presentan una inter-correlación de 0.53, sensibilidad media de 0.63, autocorrelación de primer orden de 0.22. Asimismo, una proporción señal-ruido 4.5 y un valor de (EPS) de 0.81. La cronología residual abarco un periodo de 1972-2023 (51 años) (Figura 13).

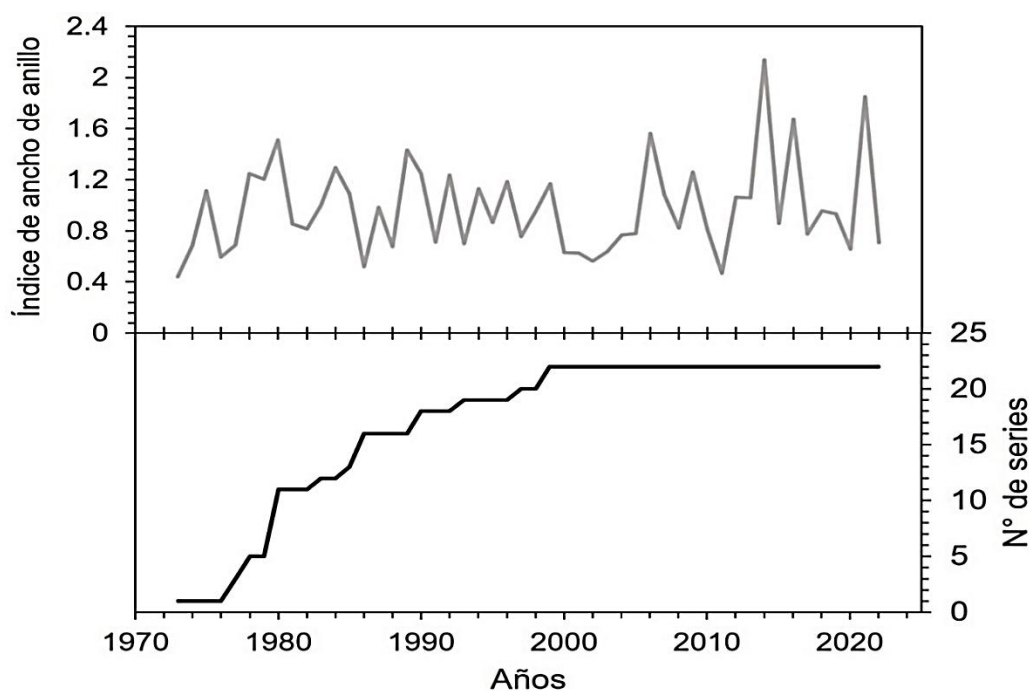


Figura 13. Cronología residual generada (gris) y número de series (negro) para el sitio Bethania, Campeche, Campeche.

Para el sitio BET, de un total de 68 series inicialmente prefichadas se logró fechar correctamente 30 series de crecimiento, las cuales provienen de 18 individuos. Los estadísticos dendrocronológicos obtenidos indican que las series presentan una inter-correlación entre series de 0.46 sensibilidad media de 0.62, autocorrelación de primer orden de 0.22, proporción señal-ruido 4.12 y (EPS) de 0.80. La cronología residual del sitio SUD comprende 99 años (1926-2024) (Figura 14).

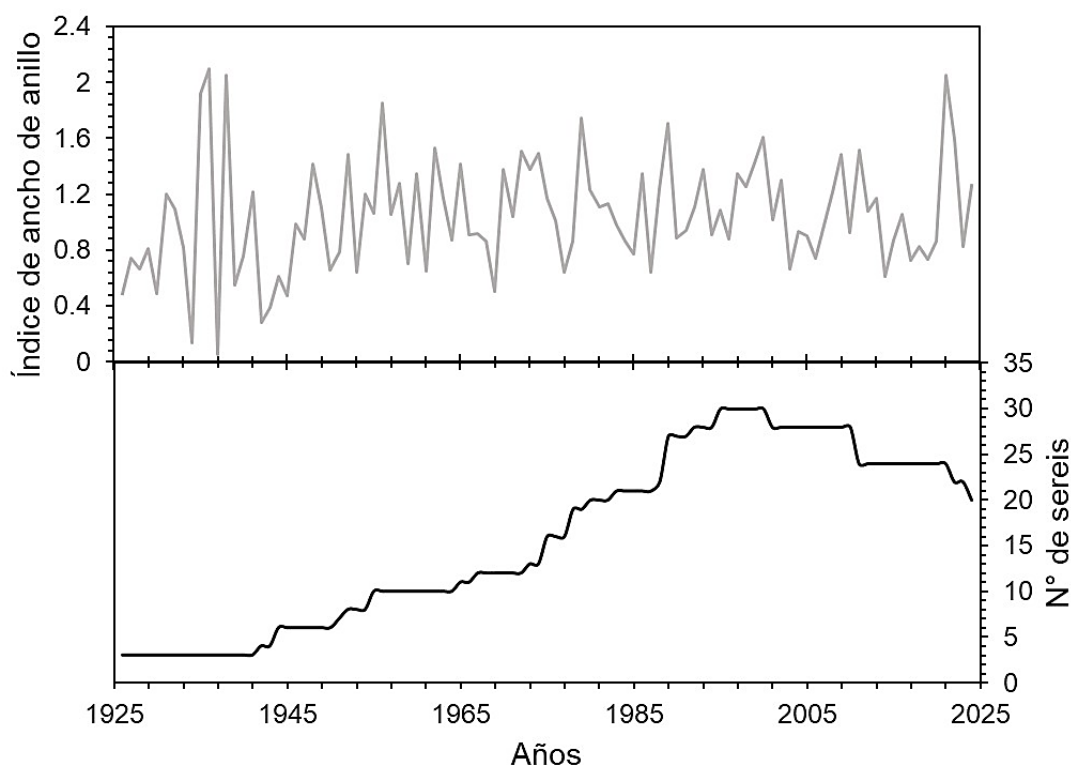


Figura 14. Cronología residual de índice de ancho de anillo (gris) y número de series (negro) para el sitio Sudzal Chico, Tekax, Yucatán.

6.3 Relación clima-crecimiento

Los resultados del análisis de correlación para el sitio de BET, señalaron que la precipitación de octubre del año previo tiene una relación positiva significativa ($r=0.423$, $p<0.05$) con la cronología residual de *L. latisiliquum*. Por el contrario, la temperatura máxima y la temperatura mínima, no mostraron correlación significativa con el crecimiento secundario de Tzalam (Figura 15).

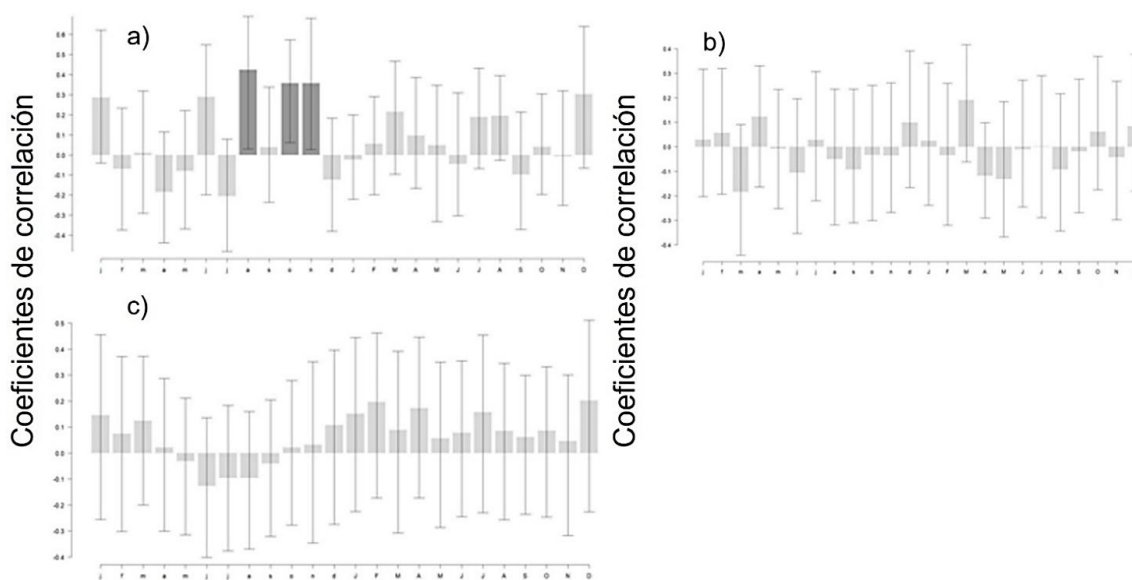


Figura 15. Correlaciones mensuales entre la cronología residual del sitio Bethania, Campeche con variables climáticas a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

En tanto, los resultados del análisis de correlación estacional, indican que la precipitación acumulada de septiembre-octubre del año previo de crecimiento tiene alta influencia en la variabilidad del crecimiento secundario, con un coeficiente de correlación positivo ($r = 0.527$, $p < 0.05$; Figura 16).

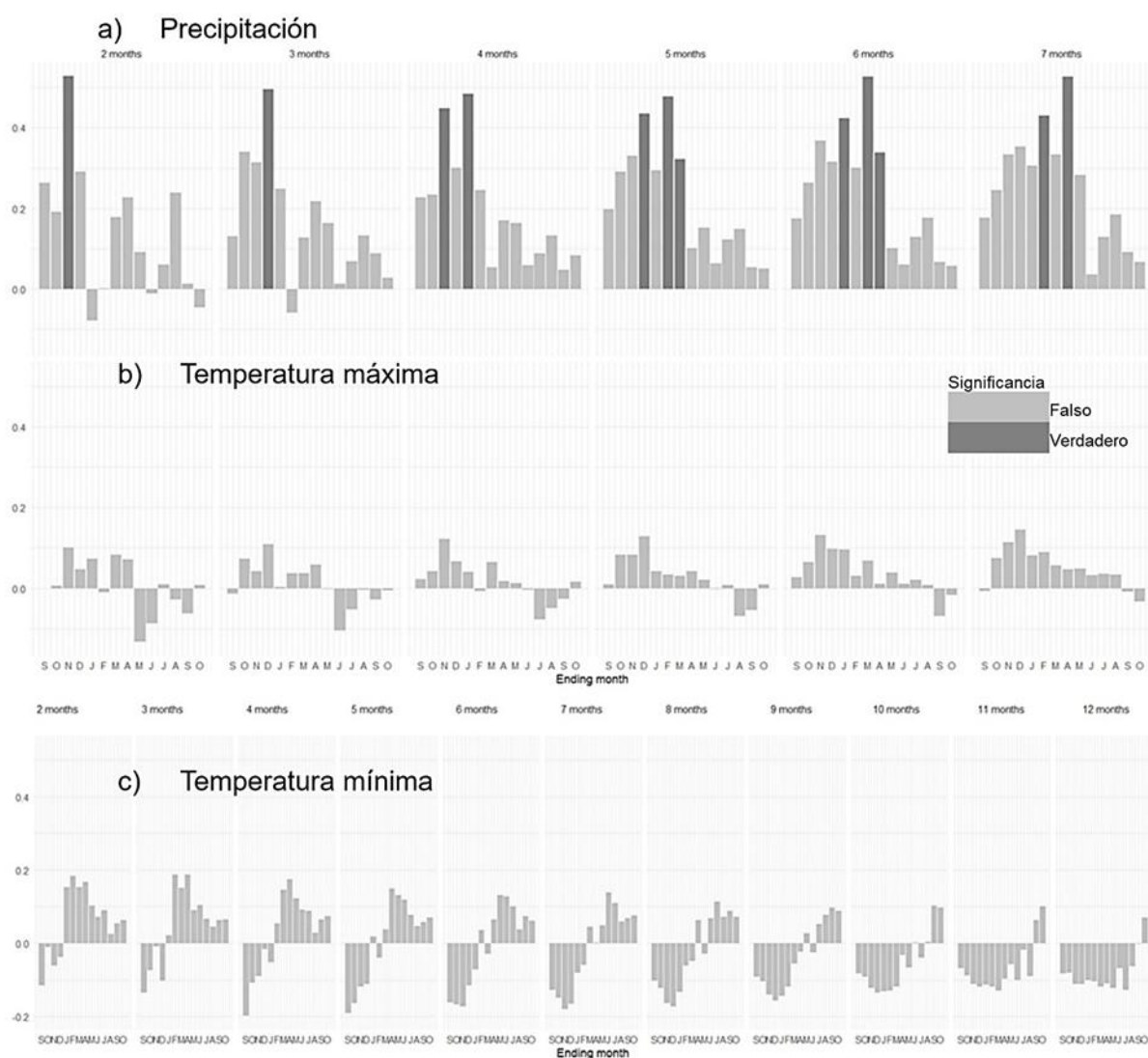


Figura 16. Análisis de correlación estacional de la: a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima para el sitio de Bethania, Campeche.

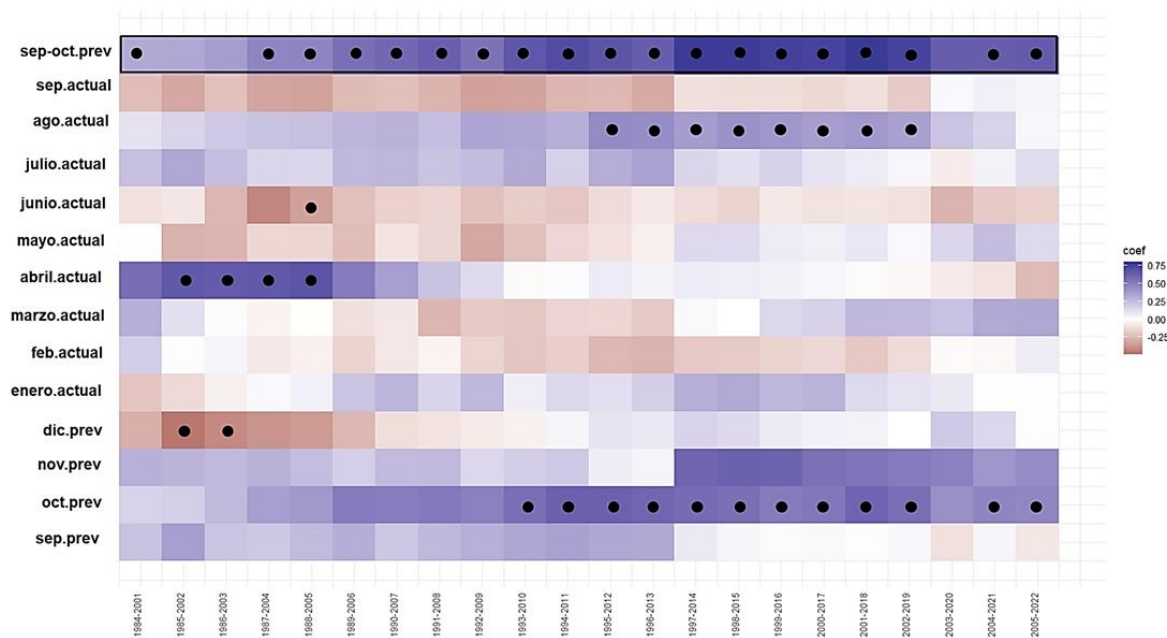


Figura 17. Correlación dinámica entre la cronología de *L. latisiliquum* y la precipitación. Los puntos negros representan periodos significativos ($p < 0.05$).

El análisis de correlación dinámica sobre precipitación en el sitio Bethania reveló que la precipitación acumulada de los meses de septiembre-octubre tienen una relación positiva y estable con el crecimiento radial de *L. latisiliquum* a través del tiempo (1984-2022). Los periodos que mostraron la mayor correlación fueron 1997-2014, 1998-2015 y 2001-2018 (Figura 17).

El análisis de correlación espacial indicó que la cronología residual de ancho de anillo en el sitio BET muestra una señal regional significativa ($p < 0.10$) con el índice SPEI resolución mensual y scPDSI en gran parte de la región norte y sureste de México (Figura 18).

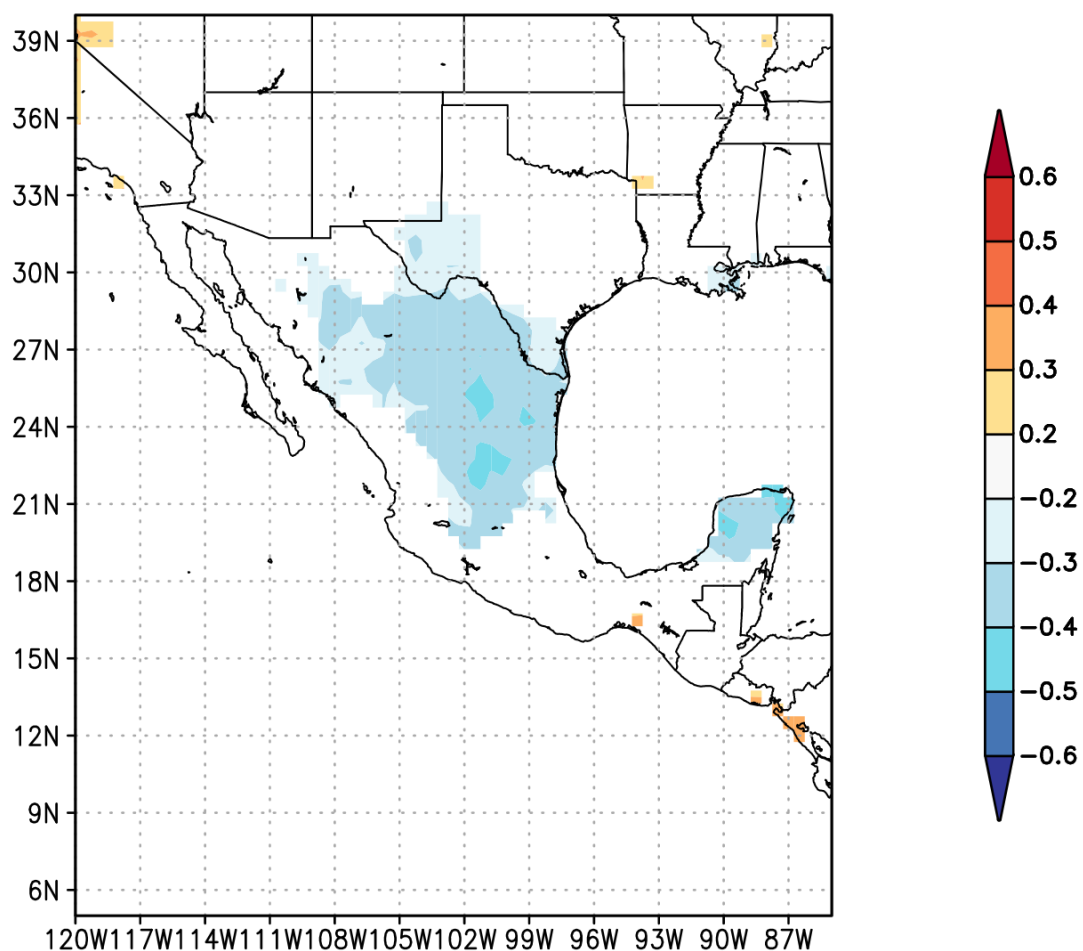


Figura 18. Correlación espacial de la cronología de Bethania entre el índice de sequía SPEI1, para los meses octubre-agosto del año previo, en el periodo de 1972-2017.

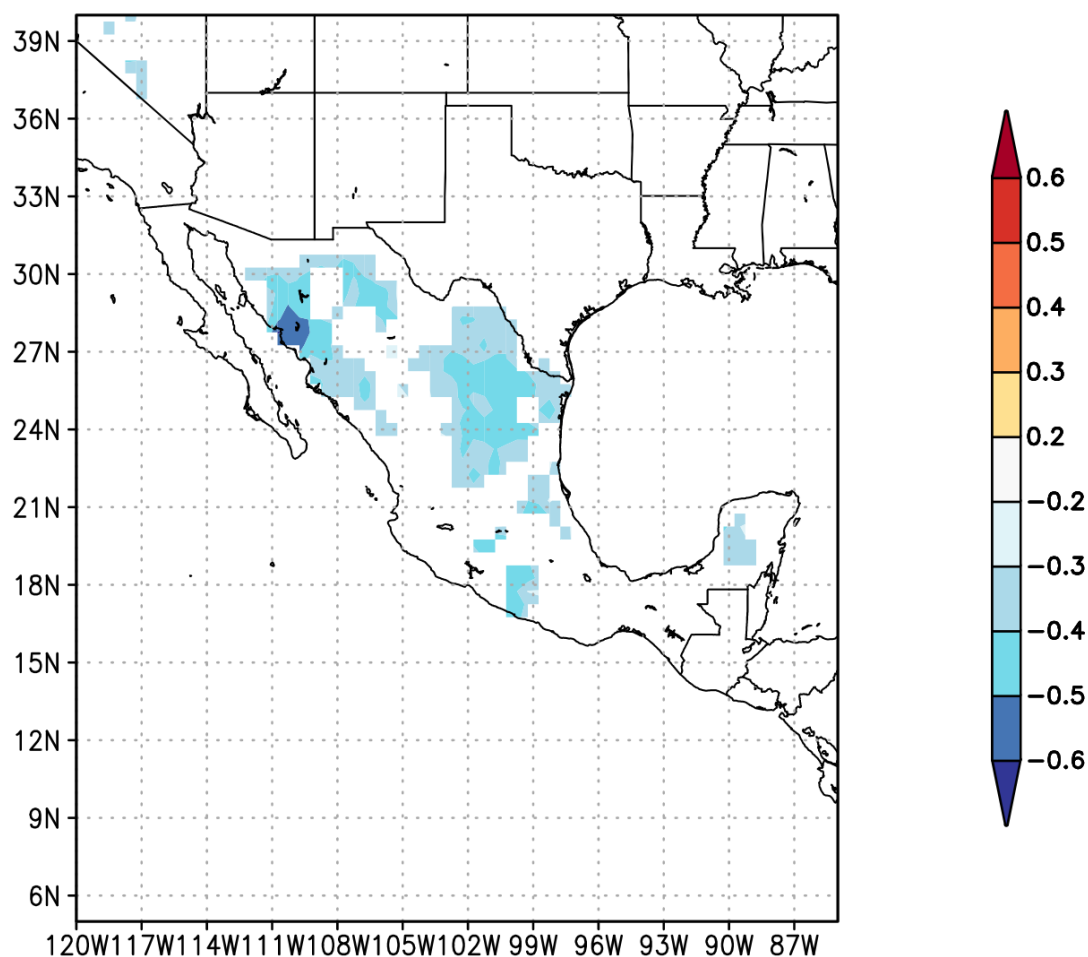


Figura 19. Correlación espacial de la cronología de Bethania entre el índice scPDSI, para el mes de abril, en el periodo de 1990-2023.

Los océanos desempeñan un papel fundamental en la modificación del clima a nivel mundial. La figura 20 presenta las relaciones negativas entre la cronología residual de Tzalam del sitio BET y las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico occidental entre 1972 a 2024. Esta correlación sugiere que las condiciones de sequía en la zona de estudio podrían estar relacionadas con sistemas circulatorios oceánicos y terrestres a gran escala.

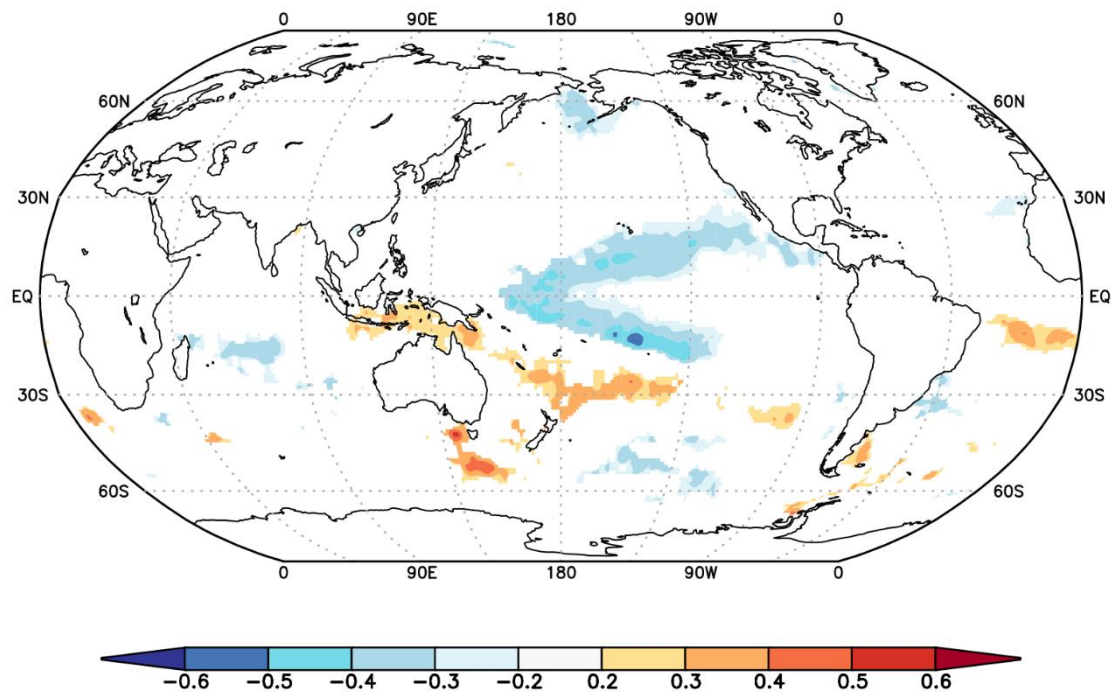


Figura 20. Correlación espacial entre la cronología residual de Tzalam y la temperatura promedio de los meses de septiembre-octubre del año previo, de la superficie del mar HadISST1 del conjunto de datos del Centro Hadley (HadISST1) durante el periodo de 1972-2024 con una resolución espacial de 1°. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.

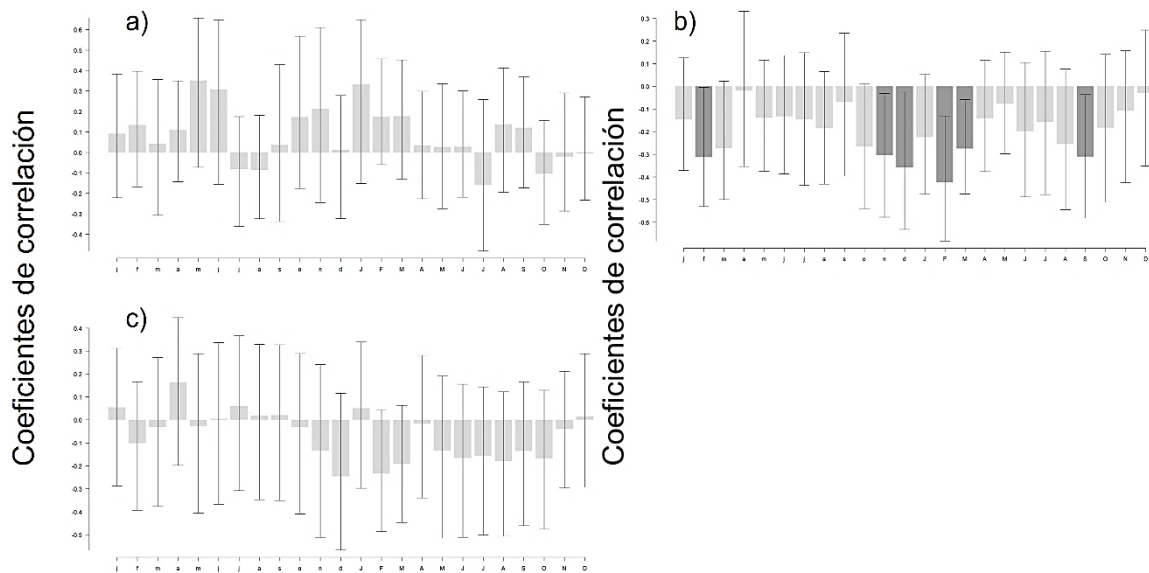


Figura 21. Correlaciones mensuales entre la cronología residual del sitio Sudzal Chico, Yucatán con variables climáticas: a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.

La temperatura máxima del mes de febrero del año actual es la variable climática que se relacionó fuertemente con los índices de ancho de anillo en el sitio SUD con un valor de coeficiente de Pearson de $r = -0.436$ ($p < 0.05$). La variable de precipitación y temperatura mínima mensual, no presentaron una correlación significativa con el radial en este sitio de estudio (Figura 22).

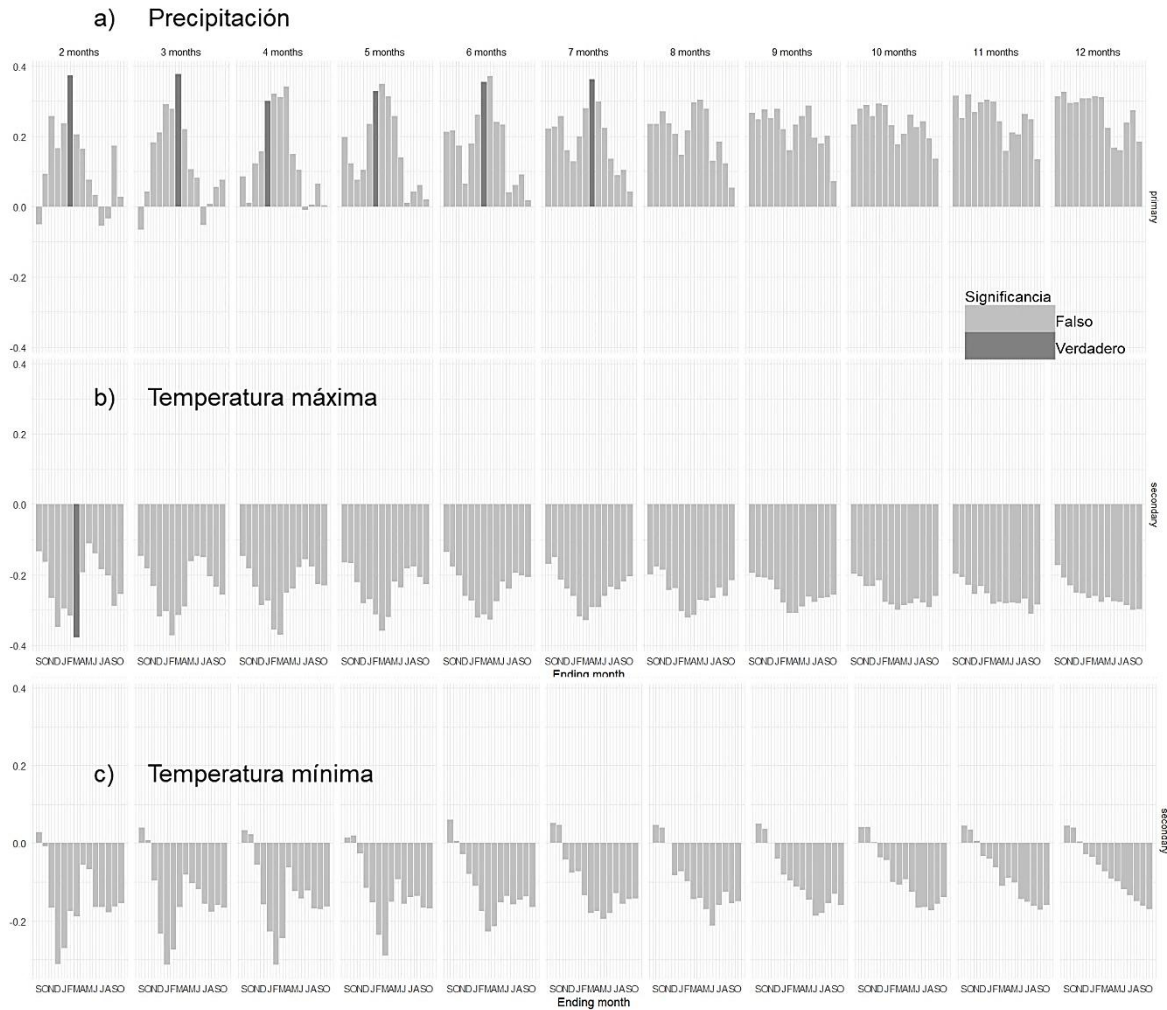


Figura 22. Análisis de correlación estacional de la a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima, para el sitio de Sudzal Chico, Yucatán.

El análisis de correlación dinámica sobre precipitación en el sitio Sudzal Chico reveló que la variable de temperatura máxima de los meses de febrero-marzo del año actual tienen una correlación negativa con el crecimiento radial de *L. latisiliquum* a través del tiempo (1985-2024). Los periodos que mostraron mayor correlación fueron 2000-2017, 2002-2019 y 2003-2020 (Figura 17).

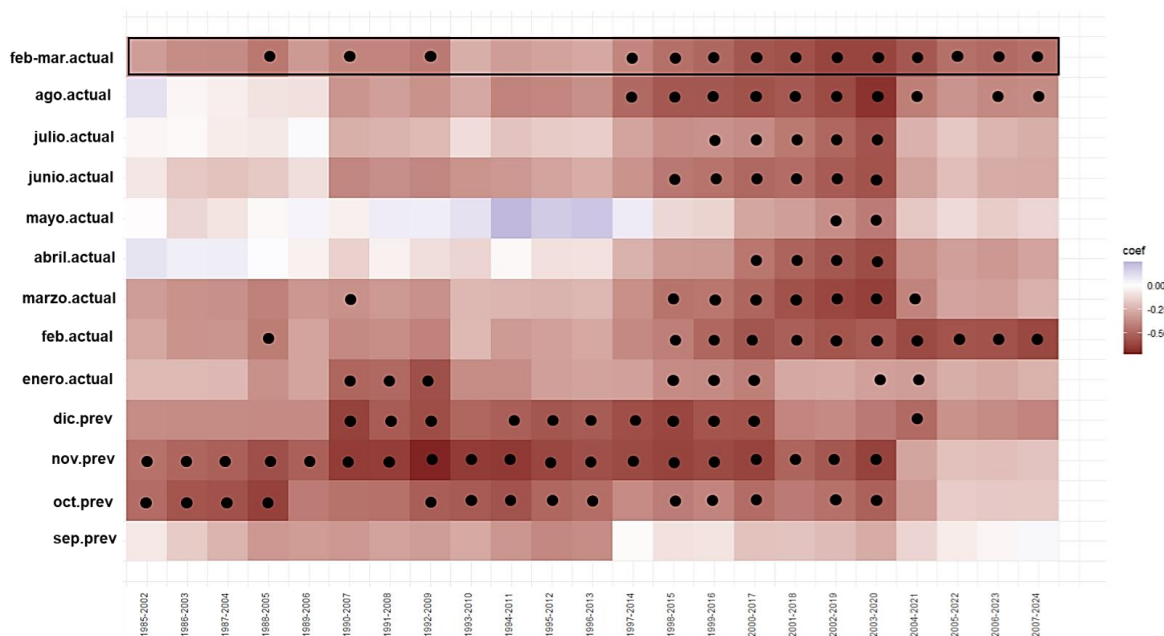


Figura 23. Correlación dinámica entre la cronología residual de *L. latifolium* con la temperatura máxima en el sitio Sudzal Chico. Los puntos negros representan periodos significativos ($p < 0.05$).

El análisis de correlación espacial indicó que la cronología residual de ancho de anillo de en el sitio SUD muestra una señal regional significativa ($p < 0.10$) con el índice SPEI resolución mensual para el mes de diciembre del año previo a mayo del año actual (Figura 21 y Figura 22). Y el scPDSI en gran parte de la región norte y sureste de México (Figura 23).

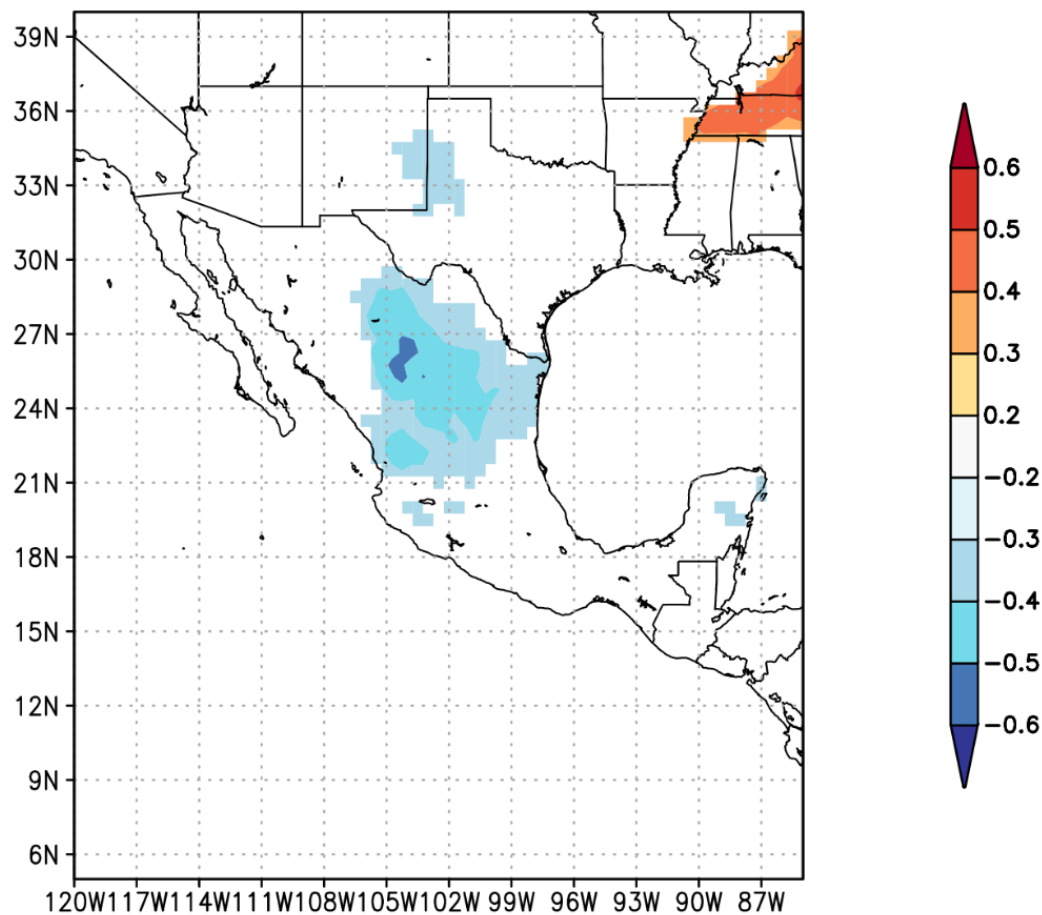


Figura 24. Correlación espacial de la cronología residual del sitio Sudzal Chico y el índice de sequía SPEI1, para los meses diciembre-mayo, en el periodo de 1960-1990. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.

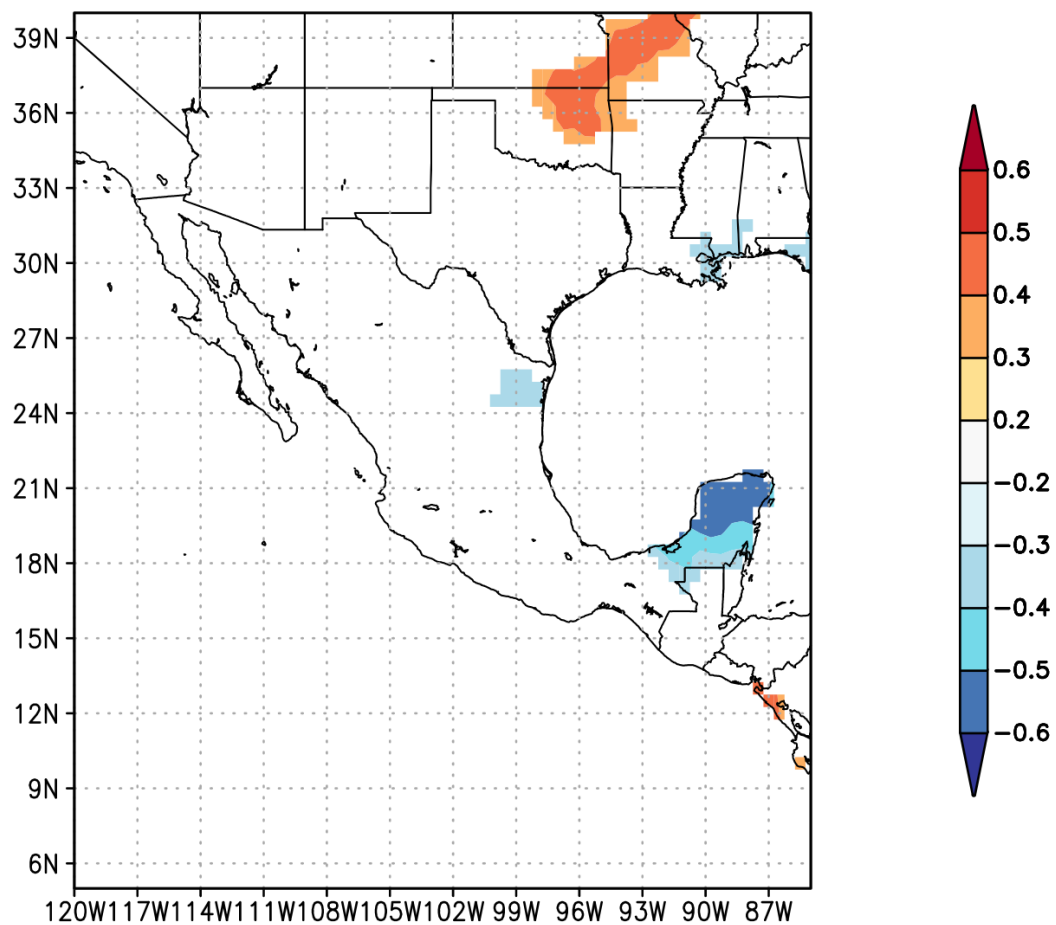


Figura 25. Correlación espacial de la cronología residual del sitio Sudzal Chico y el índice de sequía SPEI1, para los meses diciembre-mayo, en el periodo de 1990-2017. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.

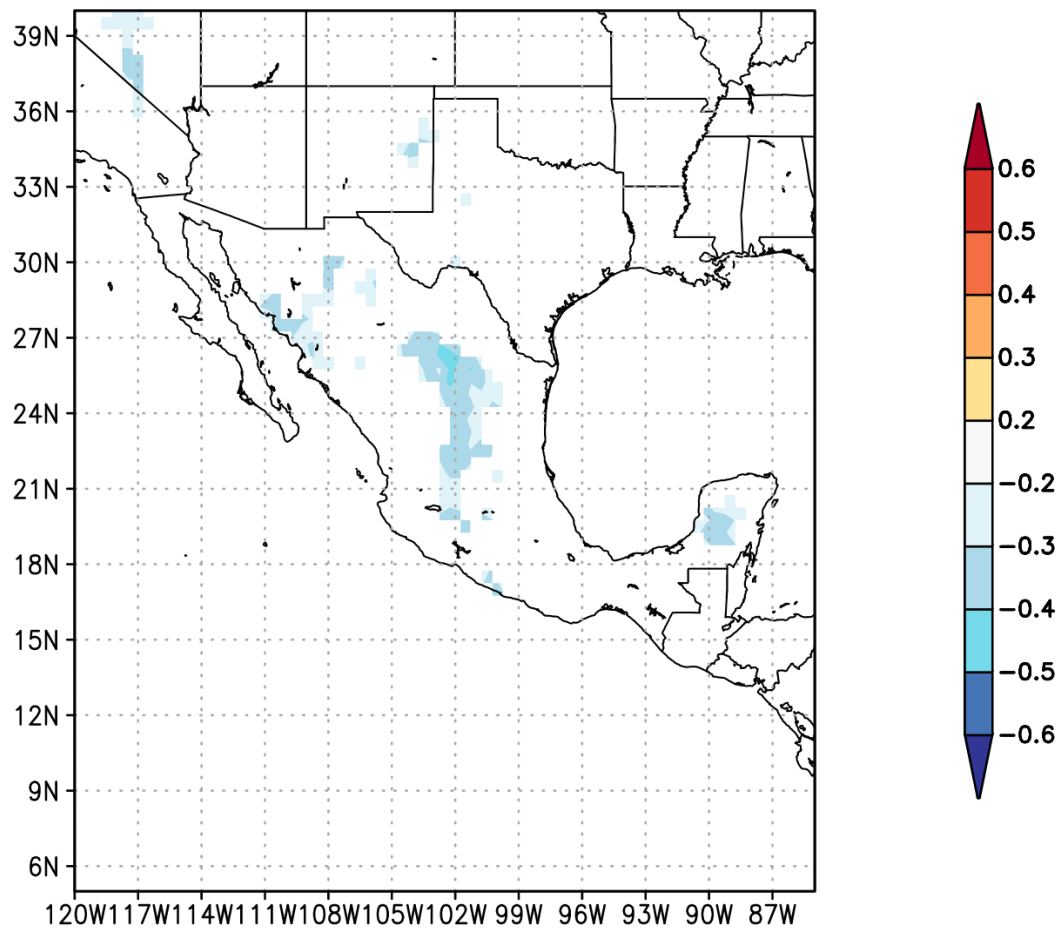


Figura 26. Correlación espacial entre la cronología residual del sitio Sudzal Chico y el índice scPDSI, para el mes de mayo, en el periodo de 1970-2023. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.

En la figura 24 se muestra las relaciones negativas entre la cronología residual de Tzalam del sitio SUD y las temperaturas superficiales del mar en el Pacifico occidental entre 1970 a 2024.

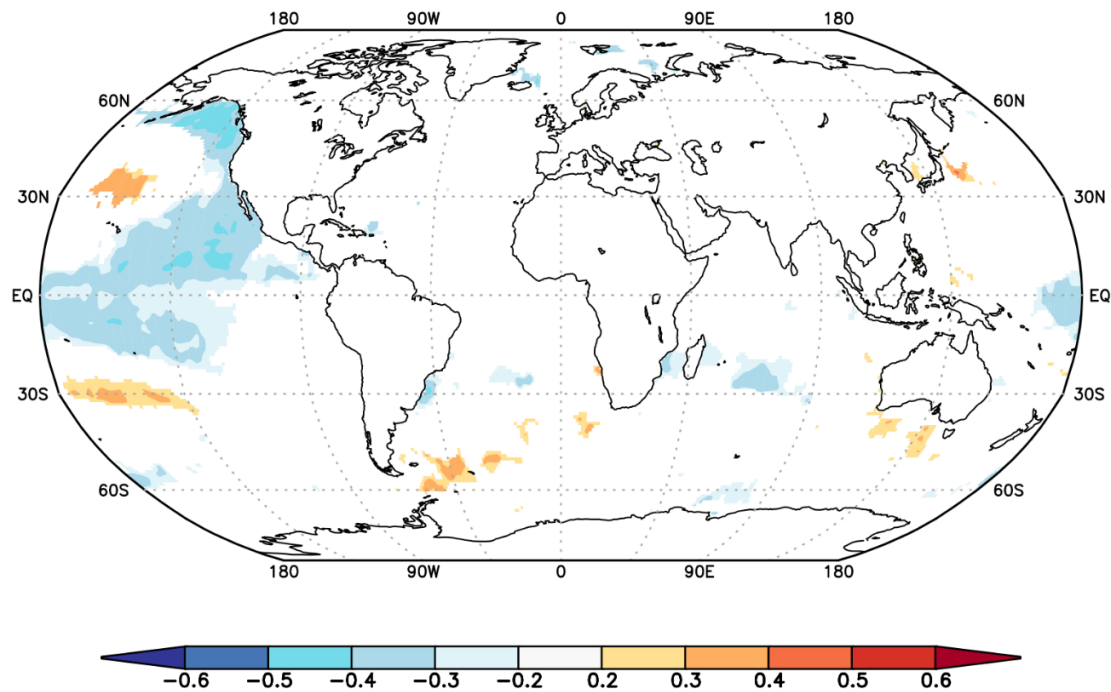


Figura 27. Correlación espacial entre la cronología residual de Tzalam y la temperatura promedio de los meses de febrero-marzo del año actual de la superficie del mar HadISST1 del conjunto de datos del Centro Hadley (HadISST1) durante el período de 1970 a 2024 con una resolución espacial de 1°. Las áreas coloreadas son estadísticamente significativas al 90%.

VII. DISCUSIÓN

El valor obtenido de inter-correlación entre series para los dos sitios de estudio se encuentra dentro de los valores aceptables sugeridos por Holmes (1983), donde se considera un valor mínimo aceptable de 0.33 ($p < 0.05$).

Para el sitio de Betania el valor de inter-correlación fue mayor (0.53), en comparación al registrado en el sitio de Sudzal Chico (0.46), ambos valores son similares a los valores de inter-correlación (0.469), para el estudio de *Cocainera langsdorffii* (fabácea) realizado en Paraná, Brasil por Miranda *et al.*, (2019). Por el contrario, estos valores son distintos al obtenido por Castruita-Esparza *et al.*, (2016), para la especie *Pseudotsuga menziessi* en Chihuahua, México con un valor de inter-correlación entre series (0.67) y a los registrados por Herrera-soto *et al.*, (2018) en *Pinus cembroides* con un valor de inter-correlación promedio de 0.68 en cuatro sitios diferentes: Arizona, California Sur, Nuevo León y Puebla, donde estas especies son consideradas con alto potencial dendrocronológico.

Los anillos de crecimiento en Tzalam son distinguibles a nivel macroscópico y lo confirma el trabajo realizado por Roig *et al.*, (2005), donde se considera al Tzalam como una especie con potencial para estudios dendrocronológicos en la Península de Yucatán.

En el sitio de Bethania la precipitación del mes de octubre del año previo, fue el factor más limitante en crecimiento radial, mientras en el sitio de Sudzal chico la temperatura máxima del mes de febrero del año actual limita el crecimiento de los anillos de Tzalam.

La precipitación en *L. latisiliquum* demostró tener una mayor intensidad de respuesta o intercambio en el sitio BET, evidenciando que el potencial hídrico del suelo y la facilidad para absorber agua del árbol permite un mayor crecimiento (Kozlowski, 1996; Arco-Molina, 2018). Por otro lado, para el sitio SUD la variable de temperatura máxima afecta de forma negativa el crecimiento de los árboles y se dan las condiciones para que las estomas permanezcan cerradas, en consecuencia, se reduce el crecimiento.

VIII. CONCLUSIÓN

Los resultados indican que existe una señal climática común entre los anillos de crecimiento para los árboles de ambos sitios estudiados, afirmando que son anuales y dependen de los factores climáticos y de la variabilidad del sitio.

L. latisiliquum es sensible a los cambios inter-anuales demostrando una mayor intensidad, en las variables de precipitación y temperatura máxima, en los meses iniciales y de invierno para los años previos.

La información generada ayudará a proponer estrategias de conservación de la especie y a mejorar las predicciones sobre la respuesta bajo los diferentes escenarios de cambio climático.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajmal, S., e Iqbal, M. (1987). Ritmo anual de la actividad cambial en *Streblus asper*. *IAWA Journal* , 8 (3), 275-283.
- Alfaro-Sánchez, R., Muller-Landau, H. C., Wright, S. J., & Camarero, J. J. (2017). Growth and reproduction respond differently to climate in three Neotropical tree species. *Oecologia*, 184(2), 531-541.
- Alvim, P., and R. Alvim. 1978. Relation of climate to growth periodicity in tropical trees. In: *Tropical Trees as Living Systems*. Tomlinson, P. B., and M. H. Zimmermann (eds). Cambridge University Press. New York, USA. pp: 445-464.
- Arco Molina, J. G. (2018). Intensidad de la señal climática y eficiencia del uso del agua expresada por los anillos de crecimiento de *Araucaria araucana* en relación con la edad de los árboles en bosques mésicos del norte de Patagonia.
- Bartens, J., Grissino-Mayer, HD, Day, SD y Wiseman, PE (2012). Evaluación del potencial para el análisis dendrocronológico del encino (*Quercus virginiana* Mill.) del entorno urbano y rural: Un estudio exploratorio. *Dendrochronologia* , 30 (1), 15-21.
- Beltrán Gutiérrez, LA y Valencia Ramos, gerente general (2013). Anatomía de anillos de crecimiento de 80 especies arbóreas potenciales para estudios

dendrocronológicos en la Selva Central, Perú. *Revista de Biología Tropical* , 61 (3), 1025-1037.

Bernabei, M., & Macchioni, N. (2012). La datación dendrocronológica en el estudio de los edificios históricos. *Loggia, Arquitectura & Restauración*, (24-25), 104-111.

Betancourt, V. M., & Cofrep, D. P. (2024). Dinámica de Crecimiento de *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.) SO Grose al sur de Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 14(2), 73-81.

Borchert, R. (1999). Periodicidad climática, fenología y actividad del cambium en árboles de bosque seco tropical. *Revista IAWA* , 20 (3), 239-247.

Bradley, R. S., Briffa, K. R., Cole, J., Hughes, M. K., & Osborn, T. J. (2003). The climate of the last millennium. In *Paleoclimate, global change and the future* (pp. 105-141). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Cerano P, J. 2004. Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Forestal, Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”. Coahuila, México. Disponible en:
<http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/874/58436s.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2017). *La importancia que tienen los Bosques Tropicales*. gob.mx. Recuperado el 3 de octubre de 2025,

de <https://www.gob.mx/conanp/articulos/la-importancia-que-tienen-los-bosques-tropicales>

Conde, C. (2006). *México y el cambio climático global*. Universidad Nacional Autónoma de México, Dirección General de Divulgación de la Ciencia.

Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., & Estrada-Ávalos, J. (2010). Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto técnico, (19).

Cordero, J. J., Boshier, D. H., Barrance, A., Beer, J. W., Boshier, D. H., Chamberlain, J. y Pennington, T. D. 2003. Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. Orton IICA/CATIE, Turrialba, Costa Rica.

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.

CUENTAN, O. (2000). DENDROCRONOLOGÍA Y DENDROCLIMATOLOGÍA. *La reconstrucción del clima de época preinstrumental*, 81.

De Estadística y Geografía. (INEGI). (2024). Espacio y datos de México. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?ag=040020070>.

Delgado, S. C. (2000). Aplicaciones estadísticas en estudios dendrocronológicos. roig, fa (comp.). *Dendrocronología en América Latina*. Mendoza: *Editorial de la universidad nacional de cuyo*, 79-102.

- Duno, R. S. (2013). Anatomía de maderas en comunidades rurales de Yucatán. Desde El Herbario CICY, 5, 95-96, 2023.
- Escalante, E., López, L., & Villalba, R. (2020). Anillos de crecimiento de *Machaerium acutifolium* (Fabaceae): Historia de crecimiento y capacidad productiva en bosques secos tropicales (E Bolivia). *Ecología en Bolivia*, 55(2), 85-93.
- Flores, J. S. (1990). The flowering periods of Leguminosae in the Yucatan Peninsula in relation to honey flows. *Journal of Apicultural Research*, 29(2), 82-88.
- Flores, J. S., Canto-Aviles, G. C., & Flores-Serrano, A. G. (2001). Plantas de la flora yucatanense que provocan alguna toxicidad en el humano. *Revista Biomédica*, 12(2), 86-96.
- FRITTS, H. 1996. Some Principles of Dendrochronology Illustrated with Graphics. Disponible en <http://www.ltrr.arizona.edu/people/Hal/princ.htm>. Consultado el 15 de Mayo del 2008.
- FRITTS, H. C. Tree rings and climate. London: Academic Press, 1976, 567 p.
- Fritts, HC (1963). Programas informáticos para la investigación de anillos de árboles.
- García Gil, G., & Graniel Castro, E. (2006). Geología. En S. I. L. G. A. Comisión Nacional Forestal, Estudio Regional Forestal Unidad de Manejo Forestal 3106 (pp. 1-2)

- García, J., Mizrahi, A., & Bautista, F. (2005). Manejo campesino de la selva baja y selección de especies arbóreas para barbechos mejorados en Hocabá, Yucatán. *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*, 195-208.
- GATES. 1999. Fisiografía, geología e hidrología. En: W Folan, M.; Sánchez, C. y Ortega, J.M.(Eds.). *Naturaleza y cultura en Calakmul, Campeche*. Campeche. CIHS, Universidad Autónoma de Campeche. pp. 31-39.
- Génova, M., & Díez Herrero, A. (2022). Dendrocronología: datación de materiales, formas y eventos a través de los anillos de los árboles. *Cuaternario y Geomorfología*, 36.
- Gourlay, I. D. 1995. Growth ring characteristics of some African Acacia species. *J. Trop. Ecol.* 11: 121-140.
- Grissino-Mayer, 1996: A 2129-year reconstruction of precipitation for northwestern New Mexico, USA. In Dean, J.S., Meko, D.M. and Swetnam, T.W., editors, *Tree rings, environment, and humanity* Tucson: The University of Arizona, 191-204.
- Grissino-Mayer, HD 2001. Evaluación de la precisión de la datación cruzada: Manual y tutorial para el programa informático COFECHA. *Tree-Ring Research* 57(2):205-221.
- Grissino-Mayer, HD, y Fritts, HC (1997). El Banco Internacional de Datos de Anillos de Árboles: una base de datos global mejorada al servicio de la comunidad científica mundial. *El Holoceno* , 7 (2), 235-238.

Gutiérrez Báez, Celso; Ortiz Díaz, Juan Javier; Flores Guido, José Salvador; Zamora-Crescencio, Pedro; Domínguez Carrasco, Ma. Rosario; Villegas, Pascale Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia de Nohalal-Sudzal Chico, Tekax, Yucatán, México Foresta Veracruzana, vol. 13, núm. 1, marzo-agosto, 2011, pp. 7-14

Gutiérrez, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones: En Arqueologia Nàutica Mediterrània. *Universitat de Barcelona*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/228769173_La_dendrocronologia_metodos_y_aplicaciones.

Hernández-Ramos, J., Valdez-Hernández, JI, García-Cuevas, X., Quiñonez-Barraza, G., Reyes-Hernández, VJ, & Hernández-Ramos, A. (2020). Modelos altura-diámetro con efectos mixtos para *Lysiloma latisiliquum* (L) Benth. en Quintana Roo, México. *Madera y bosques* , 26 (2).

Herrera-Soto, G., González-Cásares, M., Pompa-García, M., Camarero, J. J., & Solís-Moreno, R. (2018). Growth of *Pinus cembroides* Zucc. in response to hydroclimatic variability in four sites forming the species latitudinal and longitudinal distribution limits. *Forests*, 9(7), 440.

Holmes, R. L., Adams, R. K., & Fritts, H. C. (1986). Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN.

Holmes, RL (1983). Control de calidad asistido por computadora en la datación y medición de anillos de árboles.

INEGI. (1985a). Carta edafológica. Calkiní F 15-9-12. Escala 1:250 000. Retrieved April27,2017,from http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_seriei.aspx

INEGI. (1985b). Carta geológica. Calkiní F 15-9-12. Escala 1:250 000. Retrieved April27,2017,from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/Topografia/Carta250000.aspx>

INEGI. 1984a. Carta geológica. Hoja Felipe Carrillo Puerto. E16-1. escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Informática.

INEGI. 1984b. Carta edafológica. Hoja Mérida. F16-10. escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Sudzal, Yucatán*. México: INEGI. Recuperado https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/31/31071.pdf

Kaennel, M., & Schweingruber, F. H. (1995). Multilingual glossary of dendrochronology. WSL FNP, Haupt, 133, 162-184.

Kozlowski, T. T., & Pallardy, S. G. (1996). *Physiology of woody plants*. Elsevier.

Ladera Sur. (2022, 6 de octubre). *Dendrocronología, descubriendo la historia secreta que guardan los árboles.*

<https://laderasur.com/articulo/dendrocronologia-descubriendo-la-historia-secreta-que-guardan-los-arboles/>

Lara, A.; Villalba, R.; Aravena, J.; Wolodarsky, F. y Neira, E. 2000. Desarrollo de una red de cronologías de *Fitzroya cupressoides* (Alerce) para Chile y Argentina. En: *Dendrocronología en América Latina*. Roig F. (comp); EDIENC. Mendoza, Argentina. 215-218 p.

Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. Springer Science & Business Media.

Larsson, L. A. Cybis Elektronik & Data AB, Saltsjöbaden, Sweden. 2010. *CooRecorder Program of the CDendro Package Version, 7*.

LEÓN, W. y ESPINOZA DE PERNÍA, N. 2001. Anatomía de la madera. Universidad de los Andes. Consejo de Publicaciones. Merida – Venezuela. 397 p.

Lim, DO, y Soh, WY (1997). Desarrollo del cambium y longitud de las traqueidas en pinos enanos (*Pinus densiflora* y *P. thunbergii*). *IAWA Journal* , 18 (3), 301-310.

Lipatkin, V., Rumyantsev, D., Vorobyeva, N. y Sirotova, A. (2023). Estudios dendroclimáticos del crecimiento del álamo temblón en Moscú. En *E3S Web of Conferences* (Vol. 411, p. 02046). EDP Sciences.

- Lo, YH, Blanco, JA, Seely, B., Welham, C. y Kimmins, JH (2010). Relaciones entre el clima y el crecimiento radial de los árboles en el interior de la Columbia Británica, Canadá. *Ecología y Gestión Forestal*, 259 (5), 932-942.
- López, L. C., Zamora, P., & Solís, A. (2017). Estructura y composición florística de la selva mediana subperennifolia en Bethania, Campeche, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(1), 67-79.
- López, L., y Villalba, R. (2020). Relaciones clima-crecimiento de *Aspidosperma tomentosum* Mart. en bosques secos tropicales sudamericanos. *Anales de Ciencias Forestales*, 77 (4), 96.
- López-Torres, JL y Tamarit-Urías, JC (2005). Crecimiento e incremento en diámetro de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. en bosques secundarios en Escárcega, Campeche, México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* , 11 (2), 117-123.
- MacSwiney G, MC, Bolívar-Cimé, B., Alfaro-Bates, R., Ortiz-Díaz, JJ, Clarke, FM y Racey, PA (2017). Movimiento de polen del murciélago *Artibeus jamaicensis* (Chiroptera) en un paisaje agrícola de la Península de Yucatán, México. *Investigación sobre mamíferos* , 62 (2), 189-193.
- Magaña-Rueda, V. O., & Quintanar, A. I. (1997, September). to Study Regional Climate. In *Numerical Simulations in the Environmental and Earth Sciences: Proceedings of the Second UNAM-CRAY Supercomputing Conference* (p. 39). Cambridge University Press.

- Malatesta Siani, K. I. (2020). Dendrocronología de *Schizolobium parahyba* (vell.) SF Blake de bosques secundarios del Fundo el Bosque de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Tambopata-Madre de Dios.
- Marcelo-Peña, L. J., Roig, FA, Goodwin, ZA, y Tomazello-Filho, M. (2020). Caracterización de los anillos de crecimiento en los árboles del Perú: Una revisión anatómica de la madera para posibles aplicaciones en campos relacionados con la dendroecología. *DENDROCHRONOLOGIA* , 62 .
- MARTÍNEZ, L. (1996). A Guide to Dendrochronology for Educators. Consultado el 25 de Junio del 2013.
- McCARTHY, B. 1998. Dendrochronology Seminar. PBIO-69 Dendrochronology Seminar 500 Server. Ohio University.
- Medicina Tradicional Mexicana, 2009. UNAM, México (www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx).
- Merino, E. G. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. X. Nieto & MA. Cau, *Arqueología náutica mediterránea*, 309-322.
- Miranda, B. P., Andrade, V. H. F., Botosso, P. C., Santos, T. L., Milani, J. D. F., & Roderjan, C. V. (2019). *Copaifera langsdorffii* Desf.(Fabaceae) potential as an indicator of climate change by tree ring analysis, Parana, Brazil.
- Molina, J. J. C. (2008). El niño y el calentamiento térmico global: efectos medioambientales y climáticos. *Boletín de la Academia Malagueña de Ciencias*, (10), 93-109.

- Negreros-Castillo, P., & Martínez Salazar, I. (2011). Crecimiento y regeneración avanzada de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth en una selva de Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5), 15-27.
- Ortega, D. 2014. Evaluación de la influencia del raleo en el crecimiento de *Pinus patula* Schl. et Cham. Aplicando técnicas dendrocronológicas en plantaciones de Cajamarca – Perú. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE. UNALM. 91 p.
- Ortega-Arroyo, EJ, Jiménez-Pérez, J., Villanueva-Díaz, J., Yarena-Yamallel, JI, Alanís-Rodríguez, E., & Aguirre-Calderón, OA (2021). Potencial dendroclimático del encino rojo, *Quercus sideroxyla* (Fagaceae) en México. *Revista de Biología Tropical*, 69 (3), 888-897.
- Pennington, T. D., & Sarukhán, J. (2005). Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies. UNAM.
- Record, S. J., & Hess, R. W. (1943). Timbers of the. *New World*, 98-103.
- Rico-Gray, V., Chemás, A., & Mandujano, S. (1991). Uses of tropical deciduous forest species by the Yucatecan Maya. *Agroforestry systems*, 14(2), 149-161.
- Roig, F. A., & Zevallos Pollito, P. A. (2009). Dendrocronología y dendroecología tropical: Marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina. *Ecología en Bolivia*, 44(2), 73-82.

- Roig, F.A., J. J. Jimenez O., J. Villanueva D., B. Luckman , H. Tiessen, A. Medina & E. J. Noellemeier. 2005. Anatomy of growth rings at the Yucatan Peninsula. *Dendrochronology* 22: 187-193.
- Roig, FA, Osornio, JJJ, Díaz, JV, Luckman, B., Tiessen, H., Medina, A. y Noellemeier, EJ (2005). Anatomía de los anillos de crecimiento en la Península de Yucatán. *Dendrocronología* , 22 (3), 187-193.
- Roig, J., & Díaz, V. (2012). Anatomía de maderas en comunidades rurales de Yucatán.
- Sánchez, J. Á. L., González, J. M., González, A. Z., Paredes, J. C., & Aranda, M. A. G. (2017). Impacto de descortezadores en el incremento radial de *Pinus teocote* Schiede. ex Schltdl. & Cham. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(41).
- Sandí, D. A. (2019). ¿Qué es un árbol?. *Revista de Biología Tropical*, Blog-Blog.
- Schulman, E. 1944. Dendrochronology in Mexico. *Tree Ring Bulletin* 10: 18-24.
- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson. 142 p.
- Schweingruber, FH, & la neige et le paysage (Birmensdorf) Institut fédéral de recherches sur la forêt. (1996). Anillos de árboles y dendroecología ambiental (Vol. 609). Berna: Haupt.
- Scott, S.D.1966. Dendrochronology in Mexico. Report of the Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona Press, Tucson. 80 p.

Semarnat-Sinat. (2025). Ejido Betania. Obtenido de:
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/groo/estudios/2012/23QR2012FD065.pdf>

Tomazello Filho, M., & Cardoso, N. S. (1999). Seasonal variations of the vascular cambium of *Tectona grandis* in Brazil. Tree- ring Analysis: Biological Methodological and Environmental Application. *CABI Publishing*, Oxford, 45-67.

Tomazello Filho, M., Botosso, P. C., & Lisi, C. S. (2001). Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. Indicadores ambientais: conceitos e aplicações. São Paulo: EDUC, 117-143.

Van der Schrier, G., Briffa, K. R., Osborn, T. J., & Cook, E. R. (2006). Summer moisture availability across North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D11).

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.

Villanueva-Diaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B. H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83(1), 117-131.

- Worbes, M. 1989. Growth rings, increment and age of trees in inundation forest, savannas and a mountain forest in the neotropics. *IAWA Bulletin new series* 10: 109-122.
- Worbes, M. 1999. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of a tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *J. Ecol.* 87: 391-403.
- Zamora-Crescencio, P., Rico-Gray, V., Ramírez-Medina, LNG, Barrientos-Medina, RC, Plasencia-Vázquez, AH, Villegas, P., Domínguez-Carrasco, MR, & Gutiérrez-Báez, C. (2017). Estructura y composición florística de la selva mediana subperennifolia en Bethania, Campeche, México. *Polibotánica* , (43), 67-85. <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/6273311.pdf>
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431-436.
- Zanni, E. (2004). *Patología de la madera*. Editorial Brujas.

X. ANEXOS



Anexo 1. Representación del proceso dendrocronológico de *L. latisiliquum*.



Anexo 2. Procesamiento de muestras.



Anexo 3. Área de trabajo para el procesamiento de muestras, INIFAP Campus Experimental Edzná.