



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS

**Análisis dendrocronológico para ajustar técnicas de estudios
alométricos de *Pinus arizonica* Engelm y *Pinus cembroides*
Zucc en Riva Palacio, Chihuahua**

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN
RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA:

EMILIA RAQUEL PÉREZ EVANGELISTA

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. JOSÉ VILLANUEVA DÍAZ



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Mayo, 2018
Bermejillo, Durango, México



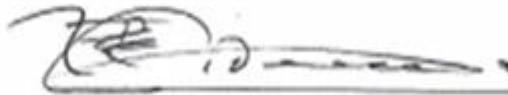
ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO PARA AJUSTAR TÉCNICAS DE ESTUDIOS ALOMÉTRICOS DE *Pinus arizonica* Engelm Y *Pinus cembroides* Zucc EN RIVA PALACIO, CHIHUAHUA

Tesis realizada por Emilia Raquel Pérez Evangelista bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y
Medio Ambiente en Zonas Áridas**

COMITÉ ASESOR

DIRECTOR:



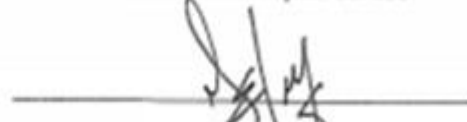
Dr. José Villanueva Díaz

CO-DIRECTOR:



Dr. Armando López Santos

ASESOR:



Dr. Francisco G. Echavarría Cháirez

ASESOR:



Dr. Julián Cerano Paredes

Se otorga un agradecimiento al *Programa de Becas Nacionales de CONACyT 2016-2017*. Por el financiamiento para la realización de ésta investigación.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) CENID–RASPA, por permitirme hacer uso de las instalaciones del Laboratorio de Dendrocronología en Gómez Palacio, Durango.

Al Programa de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas 2016-2017, de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo.

A la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo.

El presente estudio fue apoyado a través del proyecto con fondos fiscales INIFAP, “Reconstrucción de caudales e influencia de fenómenos de circulación general en cuencas de la Sierra Madre Occidental”. SIGI

DEDICATORIA

A mi mamá ***Julia Evangelista Paulín*** sé que para usted es muy importante el hecho de que avance en mi camino profesional.

A mis hermanos, ***Teresa Pérez Evangelista, Ma. De los Ángeles Pérez Evangelista, Ramiro Pérez Evangelista, Cándido Pérez Evangelista, Oscar Pérez Evangelista, Jaime Pérez Evangelista y Karina Pérez Evangelista***, éste es un logro más no solo para mí sino para todos como familia.

En memoria de mi papá ***Fidel Pérez Hernández*** y mi hermano ***Felipe Pérez Evangelista***, siempre fueron un ejemplo a seguir por sus ganas de salir adelante. Los llevo siempre en mi mente y mi corazón.

A ***Carlos Miguel Ramos Cruz*** por estar en todo momento a mi lado, coincidimos en ésta vida y mientras el tiempo ha transcurrido me has enseñado aprendizajes valiosos. Eres una gran persona y ahora formas parte de mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por promover el trabajo entre instituciones de educación e investigación.

A la Universidad Autónoma de Chapingo, en especial a la **Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas** por darme la oportunidad de realizar mis estudios de postgrado.

Al **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias CENID-RASPA**, por permitirme hacer uso del Laboratorio de Dendrocronología para realizar el trabajo de laboratorio y gabinete.

A **Dios** por darme vida para llegar hasta donde me encuentro y por darme fuerza en los momentos difíciles.

Al **Dr. José Villanueva Díaz**, muchas gracias por darme una vez más su confianza para dirigirme y brindarme las herramientas para realizar el trabajo de Tesis. Así mismo, por compartirme sus conocimientos y permitirme ser parte de su equipo de trabajo.

A mi comité de asesores, **Dr. Armando López Santos, Dr. Francisco G. Echavarría Cháirez y Dr. Julián Cerano Paredes**. Por aportarme las observaciones correctas para realizar este trabajo de investigación.

A mis compañeros del laboratorio **Fátima y Aldo** gracias por sus aportes en éste trabajo. Y al personal que ahí labora por el apoyo para realizar mi trabajo.

A mis compañeros **Carlos, Arnoldo, Iván, Fátima y Mayela**, gracias por su amistad y por brindarme su apoyo tanto en lo académico como en lo personal.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre	Emilia Raquel Pérez Evangelista
Fecha de nacimiento	19 de junio de 1990
Lugar de nacimiento	Sta. María del Río, San Luis Potosí.
CURP	PEEE900619MSPRVM08
Profesión	Ing. en Agroecología
Cédula profesional	9546481

Desarrollo académico

La C. Ingeniero Emilia Raquel es egresada de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad-Laguna. Realizó sus prácticas profesionales en el laboratorio de Dendrocronología ubicado en el INIFAP CENID-RASPA. Derivado de su tesis de licenciatura. Cuenta con una participación en el artículo publicado en la Revista Mexicana de Ciencias Forestales que lleva por nombre: Crecimiento radial anual del fresno *Fraxinus udhei* (Wenz Lingelsh) en dos parques de la Comarca Lagunera.

Trabajó durante 2 años como asistente de investigador para el laboratorio de Dendrocronología, a cargo del Dr. José Villanueva Díaz, realizando el análisis de muestras de diferentes especies de árboles mediante técnicas dendrocronológicas estándar. Participó como instructora en el 8°, 9°, 10°, 11° curso Nacional de Dendrocronología y como ponente en el 12° curso.

En el 2016 ingresó a la Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas en URUZA – UACH. Realizó una estancia en el Instituto Nacional de Ecología en Xalapa, Veracruz, en el departamento de Ecología a cargo del Dr. Guillermo Ángeles Álvarez, con la finalidad de dominar la técnica de cortes anatómicos de la madera y su interpretación.

Participó como instructor en el curso denominado “Curso-taller aplicaciones de la dendrocronología” en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Autónoma de México en Morelia, Michoacán.

Asistió al XIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales como parte del stand de Dendrocronología, en Linares, Nuevo León.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN GENERAL	xii
GENERAL ABSTRACT	xiii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS E HIPOTESIS	4
2.1 General	4
2.2 Específicos.....	4
Hipótesis	4
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1 Importancia de la Sierra Madre Occidental en México.....	5
3.2 Importancia forestal del estado de Chihuahua.....	6
3.3 Aprovechamiento forestal	6
3.4 Crecimiento de los árboles.....	8
3.5 Análisis Troncales	8
3.6 Tiempo de paso	9
3.7 Descripción de las coníferas involucradas en el estudio.....	10
3.7.1 <i>P. arizonica</i>	10
3.7.2 <i>Pinus cembroides</i>	10
3.8 Dendrocronología	11
3.9 Influencia del clima en el incremento radial	12
IV. MATERIALES Y METODOS	14
4.1 Ubicación del área de estudio.....	14
4.2 Muestreo en campo	15
4.3 Toma de muestras y determinación de edad en campo	15
4.4 Conteo de tiempo de paso en campo	16
4.6 Estimación del Incremento Corriente Anual en altura	18
4.7 Análisis diamétrico	19

4.8	Análisis dendrocronológico	19
4.9	Preparación de secciones.....	20
4.10	Fechado.....	20
4.11	Medición de anillos	20
4.12	Análisis de datos y generación de cronologías	21
4.13	Reconstrucción climática	21
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
5.1	Diferencias de conteos.....	23
5.1.1	<i>P. arizonica</i>	23
5.1.2	<i>P. cembroides</i>	24
5.2	Evaluación del tiempo de paso	25
5.2.1	<i>P. arizonica</i>	25
5.2.2	<i>P. cembroides</i>	26
5.3	Determinación de edad a diferentes alturas del fuste	27
5.3.1	<i>P. arizonica</i>	27
5.3.2	<i>P. cembroides</i>	30
5.4	Incremento Corriente Anual en altura (ICA).....	32
5.4.1	<i>P. arizonica</i>	32
5.4.2	<i>P. cembroides</i>	34
5.5	Análisis diamétrico	35
5.5.1	<i>P. arizonica</i>	35
5.5.2	<i>P. cembroides</i>	37
5.6	Análisis estadístico del incremento en diámetro	38
5.7	Cronologías o series de crecimiento.....	39
5.7.1	<i>P. arizónica</i>	39
5.7.2	<i>P. cembroides</i>	41
5.8	Reconstrucción de la precipitación estacional Octubre-Mayo con series dendrocronológicas de <i>Pinus cembroides</i> en Riva Palacio, Chihuahua	42
5.9	Calibración y Verificación.....	43
5.10	Reconstrucción de la precipitación <i>P. cembroides</i> periodo (1620-2014)	46
5.11	Variabilidad climática detectada en la reconstrucción.....	47

5.11.1 Periodos secos	47
5.11.2 Periodos húmedos	48
VI. CONCLUSIONES	49
VII. LITERATURA CITADA.....	50

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tiempo de paso (últimos 5 cm) estimado en clases diamétricas de 5 cm para <i>P. arizonica</i>	25
Cuadro 2. Tiempo de paso determinado para <i>P. cembroides</i>	26
Cuadro 3. Diferencias en el conteo de anillos de crecimiento en altura.	27
Cuadro 4. Diferencias en el conteo de anillos de crecimiento entre ambos métodos.	30
Cuadro 5. Valores determinados de ICA para <i>P. arizonica</i>	32
Cuadro 6. Valores determinados de ICA para <i>P. cembroides</i> , en periodos de 20 años.	34
Cuadro 7.. Análisis de edad por clases diamétricas para <i>P. arizónica</i>	36
Cuadro 8. Análisis diamétrico para <i>P. cembroides</i>	37
Cuadro 9. Diferencias de estadísticos descriptivos entre ambos métodos de conteo para las dos especies en estudio.	38
Cuadro 10. Estadísticos de prueba de “t” aplicada en ambas especies.	38
Cuadro 11. Parámetros dendrocronológicos para <i>P. arizonica</i>	39
Cuadro 12. Parámetros estadísticos de valoración de la calidad de fecha para <i>P. cembroides</i>	41
Cuadro 13. Estadísticos del proceso de calibración y verificación para la reconstrucción de precipitación octubre-mayo.	44
Cuadro 14. Modelo de regresión para la variable dependiente (precipitación estacional Invierno – primavera).	44
Cuadro 15. Análisis de la varianza para el modelo de reconstrucción estacional de precipitación.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio (García-Romero et al, 2009).	14
Figura 2. Secciones de <i>P. arizonica</i> a diferentes distancias del fuste principal del árbol.....	16
Figura 3. Análisis del tiempo de paso en 2.5 cm, (línea roja).....	17
Figura 4. Análisis de tiempos de paso mediante conteos dendrocronológicos, A) tiempo de paso en <i>P. cembroides</i> y B) tiempo de paso en <i>P. arizonica</i>	17
Figura 5. Sección 008 de <i>P. arizonica</i> , sección tomada a 0.30m de altura. Lado izquierdo muestra con conteos de campo, lado derecho muestra analizada dendrocronológicamente.	23
Figura 6. Sección transversal número 131 de <i>P. cembroides</i> cortada a 0.30m del suelo. Al lado izquierdo se indica el conteo en campo y al lado derecho al conteo con base en técnicas dendrocronológicas.	24
Figura 8. Número de años transcurridos promedio para que especímenes de <i>P. arizonica</i> alcancen determinada altura.	28
Figura 9. Diferencia de edad estimada con ambos métodos, para los 25 individuos a la altura de 1.30m.	29
Figura 10. Relación entre altura y la edad para <i>P. cembroides</i> , al comparar el conteo directo en campo y el método dendrocronológico.....	31
Figura 11. Diferencias en la estimación de edades en <i>P. cembroides</i> a una altura de 1.30m.....	32
Figura 12. Representación del ICA para <i>P. arizonica</i> , en el municipio de Riva Palacio Chihuahua.	33
Figura 13. Representación del incremento corriente anual para <i>P. cembroides</i> , en el municipio de Riva Palacio, Chihuahua.....	35
Figura 14. Índice de ancho de anillo de <i>P. arizonica</i> para el periodo de 1852 a 2014.....	40
Figura 15. Los índices dendrocronológicos para <i>P. cembroides</i> se extienden de 1627 a 2014.....	42
Figura 16. Relación entre el índice de ancho de anillo y precipitación acumulada octubre-mayo del periodo de 1971-2014.	43
Figura 17. Calibración y verificación entre precipitación observada y precipitación reconstruida para el periodo estacional octubre-mayo.	45
Figura 18. Reconstrucción de la precipitación estacional octubre-mayo en el municipio de Riva Palacio, Chihuahua.....	46

RESUMEN GENERAL
ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO PARA AJUSTAR TÉCNICAS DE
ESTUDIOS ALOMÉTRICOS DE *Pinus arizonica* Engelm y *Pinus*
***cembroides* Zucc EN RIVA PALACIO, CHIHUAHUA**

Los bosques son evaluados a través de la biometría forestal, donde la estimación de la edad mediante técnicas de campo es una de las variables de mayor uso. Para determinar la edad exacta del arbolado, la dendrocronología constituye una herramienta eficaz para este propósito y de ésta forma, facilitar la toma de decisiones en el manejo forestal. Por lo anterior, esta investigación tiene como objetivo contrastar la estimación de la edad mediante técnicas biométricas y dendrocronológicas en *P. arizonica* Engelm y *P. cembroides* Zucc. Se realizó un muestreo sistemático estratificado, el muestreo fue destructivo, por lo tanto, se derribaron 25 árboles de *P. arizonica* y 17 de *P. cembroides*. Para determinar la edad en campo, en cada sección del árbol, se marcaron dos radios por sección y se contaron los anillos del centro a la corteza. El datado exacto y la medición de los crecimientos, se realizó a través del método dendrocronológico convencional. El error promedio del conteo biométrico en comparación con la técnica dendrocronológica fue de 16 años para *P. arizonica* y de 100 años para *P. cembroides*. La diferencia del tiempo de paso para *P. arizonica* entre ambas técnicas demostró que el incremento en volumen no es de 0.5 cm/año como se ha reportado, sino de 0.25 cm/año; mientras que para *P. cembroides* el incremento en volumen es de 0.12 cm/año y no de 0.31 cm/año. El punto máximo de inflexión del Incremento Corriente Anual para *P. arizonica* fue de 0.7 m a la edad de 40 años y para *P. cembroides* fue de 0.24 m a la edad de 140 años. Se realizó una prueba de "t" para constatar si la diferencia fue significativa. Los estadísticos de conteo indican una $t = 0.00029$ para *P. arizonica* y una $t = 0.00048$ en *P. cembroides*. Por lo tanto, se puede afirmar, que las diferencias entre dichos métodos afectan estadísticamente los resultados en cuanto a la descripción del inventario de los recursos forestales y que el método en uso actual promueve la sobreexplotación del recurso.

Palabras clave: Biometría, dendrocronología, *Pinus arizonica*, *Pinus cembroides*, tiempo de paso, incremento en volumen.

Tesis de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas URUZA-UACH

Autor: Pérez Evangelista Emilia Raquel

Director de tesis: Villanueva Díaz José

GENERAL ABSTRACT
DENDROCHRONOLOGICAL ANALYSIS TO ADJUST ALLOMETRIC STUDY
TECHNIQUES OF *Pinus arizonica* Engelm AND *Pinus cembroides* Zucc IN
RIVA PALACIO, CHIHUAHUA

Forest biomass yield is evaluated by biometric techniques, where the estimation of age in the field is a common practice. To perform a better estimation of tree age, dendrochronology is an effective technique that helps to improve forest management strategies. For this reason, the aim of this research was to contrast the estimation of age of *P. arizonica* Engelm and *P. cembroides* Zucc by a biometric technique in contrast to the use of standard dendrochronological techniques. A stratified systematic sampling was carried out, the sampling procedure was destructive, and 25 *P. arizonica* trees and 17 *P. cembroides* trees were felled. In the field age determination of each cross-section, two radii were marked and the rings counted from pith to bark. Exact dating and ring measurement were done by dendrochronological techniques. The mean error difference between the field technique and dendrochronology procedure was 16 years and 100 years for *P. arizonica* and *P. cembroides*, respectively. The time of passage in *P. arizonica* using both techniques indicated that instead of the known 0.5 cm/year it is 0.25 cm/year and for *P. cembroides* it is 0.12 cm/year in comparison to 0.31 cm/year. The maximum inflexion point of the Annual Current Increase for *P. arizonica* was 0.7 m/year at the age of 40 years and 0.24 m/year for *P. cembroides* at the age of 140 years. A statistical “t” test was performed to verify significant differences. The *t*-statistic value was $t = 0.00029$ for *P. arizonica* and $t = 0.00048$ for *P. cembroides*. Therefore, it could be stated that both methods for estimation of age produce statistical differences affecting inventory of forest resources. The biometric method of age estimation as is currently done promotes an overuse of forest resources in the region.

Keywords: Biometry, dendrochronology, *Pinus arizonica*, *Pinus cembroides*, time of passage, increase in volume.

Thesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas,
URUZA-UACH

Author: Pérez Evangelista Emilia Raquel

Advisor: Villanueva Díaz José

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques son vegetaciones arbóreas que se encuentran en regiones montañosas. En ellos se desarrollan las coníferas y tienen escasa variación entre especies, cubren el 29% de la superficie del estado de Chihuahua, en las partes más altas de la región montañosa, al poniente y suroeste se encuentran los bosques de pino. En dichos bosques *Pinus arizonica* Engelm y *Pinus cembroides* Zucc son dos de las especies dominantes (INEGI, 2017).

Los bosques se valoran en función de lo que producen; por ésta razón, el uso de la biometría forestal es una de las metodologías más comunes para la estimación del volumen y producción madera. Sin embargo, los recursos forestales no se han evaluado de manera confiable, debido al alto costo económico y el tiempo que representa hacer un inventario forestal (Cruz, *et al.*, 2010).

En la biometría forestal se utilizan los análisis troncales para evaluar el crecimiento pasado de una comunidad arbórea y con ello, hacer inferencia en el futuro del bosque. Mediante dicho análisis, se pueden evaluar las diferentes fases de crecimiento en diámetro y altura para estimar los tiempos de paso (Imaña y Encinas, 2008).

La medición del tiempo de paso, tiene como finalidad calcular el período en años, que tarda una categoría diamétrica en pasar a la siguiente, por ello, esta determinación es relevante para la toma de decisiones en el manejo forestal. Calcular la edad exacta, aumenta la precisión en este tipo de determinación, por lo que, al involucrarla en el análisis, genera estimaciones más exactas, en comparación al período promedio que resulta de conteos directos, donde generalmente se subestima el número de años, ya que estos se comprimen en la parte externa donde se realiza la obtención de la muestra (Roldán Cortés *et al.*, 2013). En la determinación de la edad exacta del arbolado, la dendrocronología facilita la toma de decisiones en el manejo forestal, a través de la determinación del incremento radial anual en especies arbóreas. Esta ciencia incluye el estudio de la información registrada anualmente en las bandas de crecimiento, denominada

sensibilidad a la variabilidad climática (Tomazello y Zevallos, 2009). Dicha sensibilidad, es definida, como la capacidad que adquieren los árboles en un rodal para reflejar patrones de crecimiento similares en respuesta a las condiciones ambientales dominantes. Ésta similitud, puede observarse en ejemplares que viven en una misma área, que no necesariamente tienen que tener un grosor similar, pero sí una tendencia parecida; cuando esto sucede, se les considera especies con potencial dendrocronológico (Fritts, 1976).

En los ecosistemas de bosques de coníferas en México, se presentan especies con excelente potencial dendrocronológico y con las que es factible generar series dendrocronológicas de anillo total, madera temprana y tardía; series que al relacionarse con datos hidroclimáticos, permiten desarrollar reconstrucciones de precipitación, temperatura, caudales en ríos y de otras variables climáticas; así como analizar el impacto de fenómenos atmosféricos de circulación general (Stahle *et al.*, 1998).

Entre las especies con mayor potencial dendrocronológico en México se encuentra *P. cembroides*, especie representativa de las partes bajas de las cadenas montañosas en el norte de México con climas semiáridos (Constante *et al.*, 2010). Es una de las especies de coníferas con mayor sensibilidad climática en el norte y centro de México, de lento crecimiento que puede superar los 400 años. Estas características y su amplia distribución en el país, le hacen una de las especies idóneas para reconstruir el clima, donde su respuesta ha sido a la precipitación estacional y anual (Constante *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2009; Cardoza *et al.*, 2013).

Otra especie con potencial dendrocronológico es *P. arizonica*, además de poseer alto valor comercial por su alta demanda, situación que se ve favorecida por su rápido crecimiento, características anatómicas que facilitan su procesamiento industrial, constitución química y precio de su madera (Flores, 2001). Los cambios en las condiciones del clima han afectado el ciclo hidrológico e incrementado la presencia de eventos hidroclimáticos extremos; situación con efectos marcados en

la disponibilidad hídrica e impacto en el hábitat de especies vegetales y en la cantidad, calidad y disponibilidad de los recursos hídricos (Rangel *et al.*, 2017).

La variabilidad climática es un tema muy relevante para la investigación, debido a las consecuencias que tiene para el medio natural y para los seres humanos. Para descartar de una mejor manera cuales son los límites de normalidad climática, se han desarrollado diferentes técnicas dada la limitada disponibilidad y calidad de registros climáticos (Guirado, 2013). Una de las técnicas más precisas para extender la información hidroclimática en el tiempo es la dendrocronología, con la cual se puede extender la información climática por cientos o miles de años (Bradley, 1999).

Las series dendrocronológicas tienen relación con la influencia climática y ecológica ocurrida durante la formación de cada anillo de crecimiento; el proceso de muestreo y de estandarización de las series elimina el ruido biológico y de otro tipo de perturbaciones, y magnifica la señal climática; de tal forma que, al establecer una relación entre series dendrocronológicas y los registros climáticos instrumentales disponibles, se genera una relación entre ambas variables, la cual puede ser utilizada para extender la información climática en el tiempo en una longitud, que puede extenderse tanto como la longitud de la cronología (Fritts, 1976). De esta manera, el trabajar con especies que producen anillos de crecimiento anual bien definidos y muestran alta sensibilidad a la variación del clima, facilita realizar reconstrucciones climáticas, donde se analice la variabilidad de alta y baja frecuencia por siglos en el pasado, tendencias observadas en los mismos y los mecanismos atmosféricos que generan esta variabilidad (Villalba *et al.*, 2000).

II. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1 General

Determinar la diferencia para las especies *P. arizonica* y *P. cembroides* con respecto a los métodos de conteo directo en campo y el método dendrocronológico, así como las implicaciones generadas en torno al manejo forestal.

2.2 Específicos

- Analizar las tasas exactas de incremento radial anual de las especies *P. cembroides* y *P. arizonica* en el municipio de Riva Palacio, Chihuahua.
- Analizar el tiempo de paso en los últimos 5 cm del fuste determinados mediante técnicas dendrocronológicas y conteos visuales en campo.
- Generar series de crecimiento de anillo total para *P. cembroides* y de anillo total, madera temprana y tardía para *P. arizonica*.
- Determinar la influencia climática en el incremento radial de *P. cembroides* y desarrollar la reconstrucción dendroclimática.

2.3 Hipótesis

Existe diferencia significativa en la determinación exacta de la edad del arbolado mediante técnicas dendrocronológicas en comparación con el conteo biométrico realizado por prestadores de servicio forestal con fines de inventarios forestales y para aprovechamiento.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Importancia de la Sierra Madre Occidental en México

En México se ubica la Sierra Madre Occidental (SMO), la serie de sistemas montañosos más largo a nivel nacional, con cerca de 1160 km de longitud y más de 200 km de anchura. El total de la superficie es de 251,648 km², aproximadamente 1/8 del territorio nacional. Dentro de la SMO se encuentra el bosque abierto, el cual cubre poco más de 13% de la superficie. Se distribuye entre los 1450 y los 2500 msnm. El clima es semiseco templado en su mayoría. Las comunidades arbóreas son de pino-encino, donde los dominantes fisionómicos son *P. cembroides* y varias especies de *Quercus*. Son comunidades de transición de pino-encino con pastizales y matorrales xerófilos al oriente y al norte de la SMO; en dichas comunidades es frecuente encontrar elementos xerófilos como *Opuntia*, *Agave* y *Yucca*. Particularmente en Chihuahua, estas comunidades presentan encinos y coníferas de similitud xerófila, entre los que destacan piñoneros (*Pinus spp*) y táscate (*Juniperus spp.*) (González *et al.*, 2012).

De la superficie arbolada en México, se estima que 8.6 millones de ha (15.1%) está bajo manejo técnico, de las que alrededor de 21.6 millones de ha (38%) tienen potencial comercial. De este total, los estados con mayor producción forestal son Chihuahua, Durango, Jalisco, Michoacán y Oaxaca, pero hay poca regulación en éstos estados aunado a ello está la deficiente información de los inventarios, que ha contribuido a fomentar su deforestación y sobreexplotación (Torres, 2006).

Las Unidades de Manejo Forestal (UMAFORES) contempladas en la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) y el Programa de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de Chihuahua, se definen como aquel territorio cuyas condiciones físicas, ambientales, sociales y económicas guardan cierta similitud, lo que es de utilidad para fines de ordenación, manejo forestal sustentable y conservación de los recursos (García, *et al.*, 2009).

3.2 Importancia forestal del estado de Chihuahua

En Chihuahua, se ubican 14 UMAFORES, las cuales abarcan 24,727.755 ha. Entre ellas, se encuentra la UMAFOR Centro Norte, en el centro del estado de Chihuahua, su extensión es de 1,482309 ha y abarca los municipios de Chihuahua, Riva Palacio, San Francisco de Borja, Namiquipa, Cuauhtémoc, Cusihuirichi, Belisario Domínguez, Buenaventura, Satevo, General Trias, Gran Morelos, Nonoava y Carichí. Dicha UMAFOR cuenta con una cobertura de 154,734 ha de bosque abierto, donde destacan las especies *P. cembroides* y *P.arizonica*. (Núñez, *et al.*, 2013).

El total de la superficie arbolada de la UMAFOR es de 684,745 ha, de éste total, el municipio de Riva Palacio tiene 115,362 ha de bosques, de éste total, el volumen de pino es de 736,029 m³ de bosque abierto. En cuanto a zonas de restauración el municipio Riva Palacio presenta la mayor área con un total de 2,477 ha. La degradación y deforestación en ésta UMAFOR, se clasificó como fuerte a muy fuerte por encima del 1.07%. Por lo cual, es crucial asegurar que la tasa de sobrevivencia del arbolado sea mayor al promedio; así como fortalecer los métodos de manejo con indicadores que ayuden a la planeación de las áreas de manejo estratégicas, para aprovechar los servicios ambientales que en ella se generan (García *et al.*, 2009).

3.3 Aprovechamiento forestal

El aprovechamiento forestal se determina de acuerdo a los objetivos y condiciones básicas de la actividad forestal. Por lo tanto, representa una base para la producción del recurso forestal bajo condiciones determinadas. En el manejo, se definen las actividades necesarias para la toma de decisiones por medio de la información obtenida de diversas formas (Hynynen, 2017).

Un bosque que se encuentra bajo manejo, constituye un sistema biológico dinámico, sometido a continuos cambios originados tanto por procesos naturales, como por actividades silvícolas. Por lo que, los modelos de crecimiento y rendimiento, se utilizan para planear el manejo de bosques, dejando una base para el seguimiento del manejo forestal (Falcao, 2005).

Sin embargo, los modelos de crecimiento forestal se han manejado de manera similar desde 1970, para los cálculos de las tablas de volumen. Algunos estudios en México se han enfatizado en el cálculo de la producción forestal, la altura dominante y a partir de 1980, se intensificó el estudio de los índices de sitio. Actualmente se encuentra disponible el Sistema Biométrico Forestal “SiBiFor”, que es una plataforma de consulta digital, donde se pueden consultar 6414 nuevas ecuaciones de volumen, crecimiento en diámetro, índice de sitio y distribución de productos para 97 especies de bosques templados y tropicales de México. Además, las ecuaciones y los manuales se pueden consultar por estado, UMAFOR, especie y tipo de ecuación (Cieszewski y Bailey, 2000; Vargas *et al.*, 2017).

Se han realizado estudios sobre índice de sitio para definir productividad forestal respecto a variables físicas, como profundidad del suelo, pendiente, temperaturas máximas y mínimas, donde se propone el uso de un taladro plessler para determinar edades del arbolado en pie (Martínez *et al.*, 2013).

De lo anterior, se hace evidente que existe una gran necesidad de realizar análisis biométricos más precisos para los inventarios de sitios puntuales y de ésta forma, desarrollar proyectos que ayuden a manejar el capital natural para su conservación en el mediano y largo plazo, como lo plantean las políticas de manejo sustentable. Por lo tanto, el uso de la dendrocronología como herramienta para conocer de manera exacta la edad, puede mejorar los resultados de los estudios forestales debido a que representa una de las variables más importantes incluidas en los modelos biométricos.

3.4 Crecimiento de los árboles

El crecimiento de un árbol está en función de su genética y de las condiciones ambientales donde se desarrolla; este crecimiento se representa en altura, diámetro y volumen con base a un periodo de tiempo; por lo tanto, se puede describir, como el efecto de desarrollo a lo largo de la vida de un árbol (Vargas, 2010).

Los anillos de crecimiento son el resultado de una acumulación de tejidos leñosos como producto de la actividad del cambium, donde las células se dividen para formar traqueidas. Éstos crecimientos tienden a ser más grandes en árboles jóvenes y conforme se tornan de mayor edad se reducen, este comportamiento biológico es efecto de un diámetro cada vez mayor (Fritts, 1976). El incremento en altura es acelerado durante las tres primeras semanas y se puede producir un menor incremento durante un verano seco o aumentar durante un verano húmedo, el comportamiento de la altura es casi lineal durante la madurez.

El incremento en diámetro ocurre durante toda la vida del árbol y depende de las reservas acumuladas y de la altura; se reduce mientras exista competencia por la luz en su entorno y por ende, se incrementa en sitios de espacios abiertos. El crecimiento diamétrico se refleja en los anillos de crecimiento y su comportamiento por lo regular, muestra una tendencia homogénea (Klepac, 1983).

3.5 Análisis Troncales

EL análisis de los árboles a nivel individual o bien del bosque en su conjunto, permite determinar con precisión la producción forestal, por intervalos de tiempo determinados. Éste análisis, se realiza tomando secciones a diferentes distancias de un mismo fuste; con la finalidad de conocer el crecimiento y desarrollo en diferentes etapas de la vida del árbol a través de los anillos de crecimiento. El conocimiento de la edad es útil para conocer el comportamiento en la respuesta a otros factores, como: cambios de estacionalidad, precipitación, tasas de crecimiento y es una herramienta importante para el ordenamiento y aprovechamiento forestal (Imaña y Encinas, 2008).

Para éste análisis es necesario el conteo y la medición de los anillos de crecimiento a través de núcleos de crecimiento o de secciones transversales, con la ayuda de lupas se mide la anchura de los anillos en determinados años. Para poder predecir el crecimiento y rendimiento de los recursos forestales, se utilizan modelos cuantitativos que pueden aportar información en la planificación ambiental. Un manejo forestal de carácter efectivo, involucra tratamientos para el control, de tal forma que, el aumento de su valor económico y social, sea más rápido que el interés acumulado (Klepac, 1983; FAO, 1980). El modelo para estimar el Incremento Corriente Anual (ICA), se basa en las “leyes de crecimiento de la población”, en la que la tasa de crecimiento de la población, varía con el tiempo y es una alternativa al modelo de crecimiento exponencial, en el cual, la tasa de crecimiento es constante (Quiñonez y Lecompte, 2007).

3.6 Tiempo de paso

El tiempo de paso se define como: el tiempo necesario para que un individuo pase del límite inferior de una clase diamétrica, al límite superior de la misma clase, o el tiempo necesario para pasar de una clase a las clases superiores; un ejemplo muy claro sería determinar cuántos años tarda un árbol de 30 cm de diámetro en alcanzar 40 cm de diámetro a la altura del pecho (Contreras, 1998).

Este método se utiliza para determinar la relación que existe entre el diámetro de un árbol y su edad. Por lo tanto, para llevar a cabo ésta técnica, se utiliza el conteo de anillos de crecimiento y cálculo del tiempo que requiere un árbol para pasar del límite inferior, al límite superior de una clase diamétrica (Del valle Arango, 1979).

El análisis del tiempo de paso consiste en medir 2.5 cm próximos a la corteza de la muestra; al número de anillos que se ubica dentro de éste rango, se le conoce como “tiempo de paso” e indica el número de años que requiere un árbol para obtener un incremento de 2.5 cm, o lo que se hace la analogía de pasar de una categoría diamétrica a otra y con ello, determinar los tiempos de corta. Es por esto, que el tiempo de paso, tiene una amplia aplicación no sólo en el campo de la determinación del incremento, sino en general en el manejo y evaluación de los bosques,

especialmente en los bosques manejados mediante técnicas de selección (Klepac, 1983).

3.7 Descripción de las coníferas involucradas en el estudio

3.7.1 *P. arizonica*

Ésta especie fué descrita por George Engelmann en 1878, se distribuye en México en la Sierra Madre Occidental. En Coahuila y en el oeste de Chihuahua es muy común y crece principalmente en las laderas secas y montañas elevadas, es una de las especies más abundantes. Su rango altitudinal en México comprende de 1800 a 2700 msnm. Requiere suelos profundos y con buen drenaje (Perry, 1991).

Son árboles de 25 a 30 m de altura de copa larga, redondeada y densa; de corteza rugosa y de tonalidad café grisácea; ramas delgadas; ramillas oscuras y ásperas; acículas en grupos de 3 a 5 con una longitud de 20 a 30cm. El diámetro promedio del fuste es de 1.20 m, el grosor de la corteza es de 3 a 5 cm, con ramas gruesas, los conos son ovoides simétrico color moreno oscuro, la semilla mide 4 a 7 mm de largo (Olvera, 2017).

La madera es blanda o algo quebradiza, es apreciada por tener pocos nudos, la albura presenta color que va de blanco a amarillo pálido, mientras que el duramen tiene un color castaño rojizo, lo que la hace una madera de colores llamativos. Se pretende rescatar su calidad genética y devolverla a los bosques, reduciendo los turnos de podas en plantaciones comerciales. En el estado de Chihuahua representa el 38% de la cobertura forestal. Dada su amplia distribución en éste estado, se han seleccionado árboles superiores para su reproducción y conservación (Flores, 2001).

3.7.2 *Pinus cembroides*

Se distribuye desde Arizona, en el suroeste de Nuevo México, Texas, norte y centro de México hasta Puebla, en montañas de baja altura alrededor del altiplano árido de México. Predomina en el clima seco y cálido de la Sierra Madre Occidental y

Oriental, habita en suelos derivados de cualquier sustrato, con preferencia en suelos de origen ígneo (Romero *et al.*, 1996).

Es un árbol perennifolio, de 5 hasta 15 m de altura con un diámetro a la altura del pecho de 30 cm a 70 cm. Tiene copa redondeada y abierta en individuos maduros y piramidales en individuos jóvenes. Tiene hojas en grupos de 2 a 3, entre 2.5 y 10 cm de longitud; de tronco corto y con ramas ascendentes, delgadas y colocadas irregularmente en el tallo. Su corteza externa es color café rojizo a casi negra. Los conos son subglobosos de 5 a 6 cm de ancho, casi sin pedúnculo, aislados o en grupos de 5, caedizos con escamas grandes gruesas y carnosas cuando están verdes y de color verde café-anaranjadas o rojizo cuando el cono madura. Las semillas son: subcilíndricas, ligeramente triangulares, de 10 mm de largo, café o negruzcas, abultadas en la parte superior y adelgazadas hacia la base (CONABIO, 2007).

La especie *P. cembroides* se considera como uno de los árboles con mayor importancia en México, así como en una de las mejores opciones para reforestar las regiones áridas, semiáridas y erosionadas debido a su potencial adaptativo y su resistencia a condiciones climáticas, ya que se desarrolla en suelos pobres, pedregosos, calcáreos, delgados y en suelos profundos con pH de 4 hasta 8, tienen gran amplitud ambiental y resiste a sequías y heladas; sin embargo, los bosques de piñonero se han visto afectados durante años, debido a las actividades humanas como talas, incendios forestales, pastoreo, agricultura, recolección no moderada de piñones y sobre-explotación; situación que hace inminente promover su conservación (Granados *et al.*, 2015).

3.8 Dendrocronología

La dendrocronología es la ciencia que se utiliza para el estudio de los anillos de crecimiento anual y generar cronologías o series de crecimiento a través de la identificación y el datado correcto de las bandas de crecimiento anual y asociar este

crecimiento con eventos históricos, los cuales pudieran haber influido en dicho comportamiento; ya que el crecimiento, se puede ver afectado por factores bióticos y abióticos tanto extrínsecos como intrínsecos. La estacionalidad del clima determina la formación de anillos de crecimiento y el grosor de los mismos dependerá de lo favorable o desfavorable que fueron dichas condiciones, afectado también por las características biológicas de las especies. La estacionalidad en las condiciones climáticas origina la formación de anillos de crecimiento, que son anuales para muchas de las coníferas mexicanas; este comportamiento da origen a patrones de crecimiento que se repiten entre las especies de un sitio y si las condiciones climáticas impactan grandes áreas, este patrón se repite, lo que facilita su datado (Gutiérrez, 2009).

Los patrones de crecimiento se relacionan con otras variables del tipo fisiológicas, esto las convierte en excelentes indicadores de respuestas a los constantes periodos de estrés y permiten conocer con mayor exactitud los procesos que afectan su crecimiento, por lo que se han utilizado para ello, estudios de contaminación atmosférica, calentamiento global, captura de carbono, entre otras aplicaciones (Mundo *et al.*, 2010; Linares y Camarero, 2012).

3.9 Influencia del clima en el incremento radial

Las reconstrucciones climáticas representan una base idónea para conocer el clima del pasado, debido a la falta de datos de las estaciones climáticas, al poder reconstruir largas extensiones de años, se pueden representar como series “proxys” del clima (Manrique y Fernández, 1997). A nivel anual, los estudios dendroclimáticos representan la mejor herramienta para las reconstrucciones del clima para periodos extensos, en algunos casos de más de 3000 años, cronologías que se pueden extender aún más en el tiempo con la inclusión de material maderable presente en ruinas, edificios antiguos, enterrado en sedimentos o en el fondo de los lagos (Manrique y Fernández, 1995).

En México, los estudios a través de la especie *P. cembroides* han logrado reconstruir la precipitación del sureste de Coahuila con una extensión de 410 años; otros de los estudios se han realizado en la Sierra Madre Occidental con muestras de las zonas bajas con precipitaciones anuales menores a 500mm anuales (Constante *et al.*, 2009; Villanueva *et al.*, 2010; Cerano *et al.*, 2011). Otro estudio de *P. cembroides* se realizó en el noroeste de Guanajuato por Cortés *et al.* (2012), donde se generaron dos cronologías una de 208 años y otra de 158 años, donde dichas reconstrucciones coincidieron con eventos históricos documentados que se relacionaron con sequías e inundaciones para las zonas de estudio. Por otra parte, en la región Oriental de Tlaxcala, se reconstruyó la precipitación anual con una extensión de 159 años, en la que se detectó alta variación interanual y multianual, indicativa de la sensibilidad climática de la especie (Cardoza *et al.*, 2014).

IV. MATERIALES Y METODOS

4.1 Ubicación del área de estudio

En la Unidad de Manejo Forestal Centro Norte A. C., se ubica el municipio de Riva Palacio dentro de las coordenadas $28^{\circ}33'16.83''\text{N}$ $106^{\circ}31'27.46''\text{O}$ con un rango de altitud de 1,600 a 2,393 msnm (figura 1). La temperatura media anual oscila de 12°C a 39°C . Predominan principalmente los climas semiáridos con lluvias de verano y lluvias de invierno, que representan del 5 al 10% del total anual, clima que cubre aproximadamente el 82.70% de la superficie total de la UMAFOR.

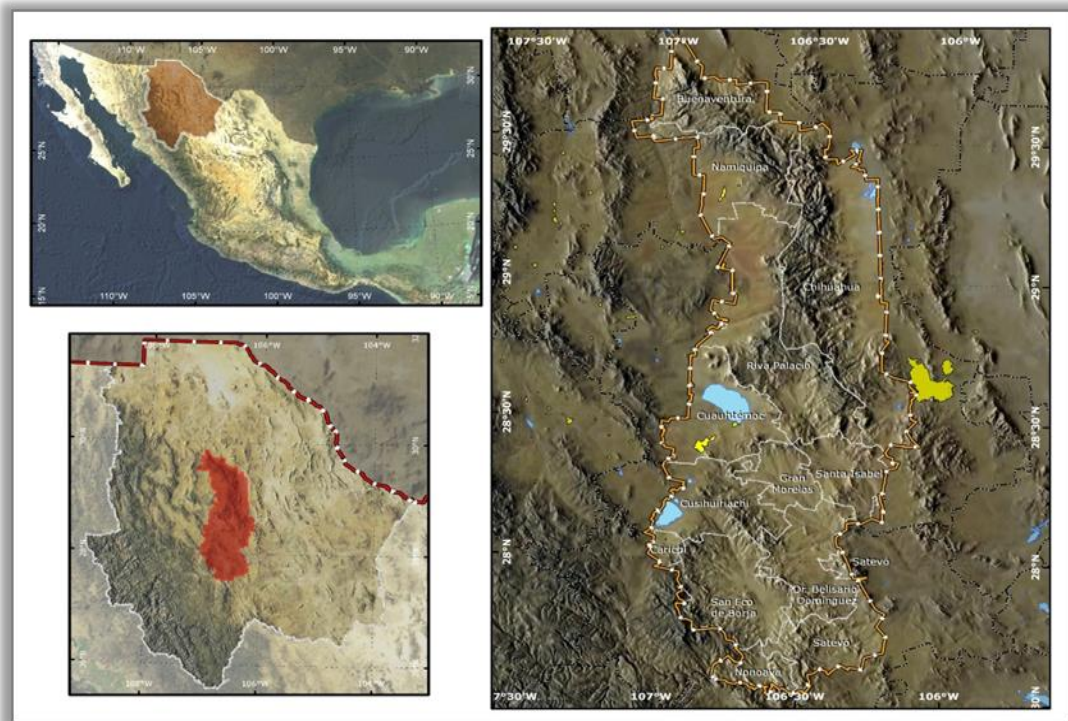


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio (García-Romero et al, 2009).

El presente trabajo se realizó en tres etapas. La primera fue el trabajo de campo que consistió en la selección del arbolado, el muestreo y el conteo biométrico en campo. La segunda fue la preparación, el fechado y medición de las secciones de acuerdo a métodos dendrocronológicos estándar. La tercera etapa, consistió en el análisis de datos a través de la determinación de la diferencia de conteos, el análisis

de edad de acuerdo a altura, el tiempo de paso, el ICA en altura, la generación de series dendrocronológicas y finalmente la reconstrucción de la precipitación.

4.2 Muestreo en campo

El muestreo se realizó por personal de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) mediante el procedimiento propuesto por la FAO (1980). El muestreo fue sistemático estratificado, con un área de muestreo en diseño cuadrado de 1 Km². Cada cuadro se dividió en cuatro parcelas en forma de rectángulo de 20 m de ancho y 250 m de longitud. Posteriormente, se enumeraron en el sentido de las agujas del reloj del 1 al 4. El equipo de campo utilizado consistió en la utilización de cintas metálica, de señalización de colores y tubo de material galvanizado para delimitar la parcela de muestreo; brújula y geoposicionador (gps) para ubicación geográfica del sitio; cinta diamétrica y clinómetro para mediciones diámetro y altura del arbolado, motosierra para derribo y obtención de secciones transversales. En una de las orillas de cada parcela, se ubicó un marcador permanente (tubo de metal galvanizado), se tomaron todos los datos de descripción de dicho punto para iniciar el muestreo. Dentro de cada parcela, se midieron los árboles y tocones con diámetro a la altura del pecho \geq 20 cm.

4.3 Toma de muestras y determinación de edad en campo

El muestreo fue destructivo, por lo tanto, se derribaron 17 árboles de *P. cembroides* y 25 de *P. arizónica*, de cada uno de los árboles se obtuvieron secciones transversales de 5 cm de espesor; la primera sección se obtuvo a los 0.30 m del suelo, la siguiente a 1.3 m y de ahí cada 2.60 m hasta donde el diámetro medía 0.20 m o menos para proseguir con el corte a distancias de 1.30 m. Para el caso de *P. cembroides*, los cortes se realizaron en su mayoría a una distancia de 1.30, por presentar un diámetro y altura menor que *P. arizónica*.

Las secciones, se ordenaron de mayor a menor diámetro, se rotularon al reverso anotando la clave y el total del conteo (figura 2). Para determinar la edad total en cada sección del árbol, se marcaron dos radios por sección y se contaron los anillos del centro a la corteza. Una vez realizado el conteo total del radio, se dividió en décadas para determinar la edad.



Figura 2. Secciones de *P. arizonica* a diferentes distancias del fuste principal del árbol.

4.4 Conteo de tiempo de paso en campo

A la sección tomada a la altura del pecho (1.30 cm, con relación al nivel del suelo), se le determinó el tiempo de paso en campo, el cual consistió en medir con una regla 2.5 cm próximos a la corteza y hacer un conteo visual de los anillos ubicados dentro de dicha medición (figura 3).



Figura 3. Análisis del tiempo de paso en 2.5 cm, (línea roja).

Con la finalidad de conocer la diferencia de la tasa de crecimiento de *P. arizonica* y *P. cembroides* derivada de ambos métodos, se analizó el tiempo de paso a través del mismo procedimiento realizado en campo; es decir, contando los anillos dentro de 2.5 cm próximos a la corteza (figura 4), pero utilizando para ello, técnicas dendrocronológicas.

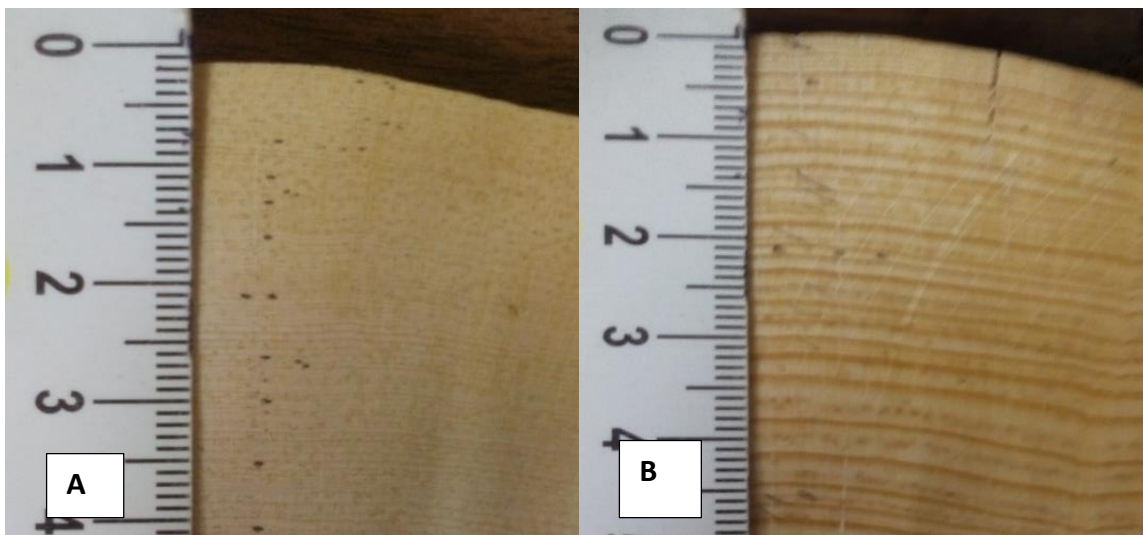


Figura 4. Análisis de tiempos de paso mediante conteos dendrocronológicos, A) tiempo de paso en *P. cembroides* y B) tiempo de paso en *P. arizonica*.

4.5 Análisis de edad a diferentes alturas

Para conocer el comportamiento de relación edad-altura se contrastó el conteo biométrico con el conteo dendrocronológico a diferente altura y se calculó la diferencia del número de anillos entre ambos métodos.

4.6 Estimación del Incremento Corriente Anual en altura

El ICA se estimó a través de la siguiente fórmula:

$$ICA = \frac{AN_2 - AN_1}{E_2 - E_1}$$

Donde:

AN1 = Valor del diámetro normal anterior o menor.

AN2 = Valor del diámetro normal superior o mayor.

E1 = edad anterior

E2 = edad superior

Se ordenaron los datos de edad de acuerdo a diferente altura y se separaron en periodos de 20 años por tratarse de árboles longevos. El incremento corriente anual se calculó obteniendo la diferencia de la altura máxima y la altura mínima y se dividió entre la diferencia de la edad anterior y superior. Posteriormente se construyó la curva de crecimiento en altura, de acuerdo a la edad. Éste procedimiento se realizó de la misma forma para ambas especies.

4.7 Análisis diamétrico

Se ordenaron las clases diamétricas y se agregaron las frecuencias (número de muestras dentro del rango de las clases diamétricas). De ésta forma se contrastó la diferencia de conteo entre ambos métodos, adicionalmente se realizó una prueba de “t” para conocer si la diferencia entre el conteo mostró significancia.

4.8 Análisis dendrocronológico

Éste análisis se realizó en el laboratorio de Dendrocronología ubicado en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA), localizado en el municipio de Gómez Palacio, Durango.

La dificultad para observar claramente la delimitación de los anillos de crecimiento en estas especies, se resolvió mediante la preparación y lijado de cada una de las secciones en el lado opuesto al conteo biométrico. Dicho procedimiento es importante en los análisis dendrocronológicos y tiene la finalidad de permitir la visualización de los anillos para discernir los problemas de anillos falsos, anillos perdidos y microanillos.

Una vez finalizada la preparación de las muestras, se fecharon los anillos de crecimiento y se midieron mediante el procedimiento dendrocronológico convencional.

4.9 Preparación de secciones

La preparación de las muestras consistió en el lijado y pulido, el cual se realizó acorde a técnicas dendrocronológicas convencionales, metodología que consiste en el uso de una secuencia de lijas de grano grueso al fino, procedimiento que resalta las estructuras de crecimiento y permite realizar su datado en microscopios de alta resolución (Stokes y Smilley, 1968).

4.10 Fechado

Para el fechado de las muestras, se realizó inicialmente un conteo de los anillos de crecimiento a partir de la corteza hacia la médula, proceso ejecutado bajo un estereoscopio con resolución 10X, marca Olympus Corporation. El proceso consistió en marcar con un punto cada década, dos puntos alineados para cada cincuenta años y tres puntos alineados cada cien años. En caso de anillos pequeños (micro-anillos), se señalaron mediante dos puntos de forma horizontal. Los anillos perdidos se señalaron con dos puntos alternos alineados en ángulo. Para el caso de anillos falsos se señalaron con una línea diagonal (Stokes y Smiley, 1968).

4.11 Medición de anillos

Posterior al fechado, se midió de manera individual cada anillo. Lo anterior se realizó a través de un sistema de medición Velmex, el cual consta de un micrómetro de precisión de 0.001 mm, acoplado a una platina de fase deslizable, conectada a una computadora personal, usando el software de medición Measure J2X para Windows (Robinson y Evans, 1980).

4.12 Análisis de datos y generación de cronologías

El archivo de la medición de anillo total, se ingresó al programa COFECHA. Dicho programa genera información que valoró la calidad del fechado en términos estadísticos, al correlacionar cada una de las series individuales con una serie maestra, la cual se basa en la medida registrada de la anchura de cada anillo del total de series individuales en periodos de 50 años, con traslapes de 25 años (Holmes, 1983). Así mismo, el programa indicó si los datos obtenidos de las mediciones fueron correctos y al mismo tiempo, permitió identificar problemas de fechado. Una vez realizadas las correcciones de fechado, se utilizó el programa ARSTAN que generó tres archivos: cronología Estándar, Residual y Arstan (Cook, 1984). El programa ARSTAN estandarizó las series individuales de cada núcleo de crecimiento, al aislar la varianza debida a factores biológicos como edad, crecimiento radial, diferente productividad entre micro sitios y cambios en el ambiente de los árboles no relacionados con el clima (Fritts, 1976). Al mismo tiempo, ARSTAN maximizó la varianza asociada a factores ambientales que afectaron a la población en su conjunto, con la opción de ajustar diferentes curvas teóricas (recta, exponencial negativa, horizontal o una curva flexible (“spline”) de diferente rigidez, las cuales tratan de emular o reproducir las tendencias biológicas del crecimiento. Se llama cronologías a las series de valores que ajustan los promedios de los índices de crecimiento anual estandarizado y adecuadamente fechado (Fritts, 1976). La serie generada con una media de uno (1.0) y varianza uniforme, se graficaron para analizar su tendencia interanual y multianual.

4.13 Reconstrucción climática

Para la elaboración de la reconstrucción climática, se utilizó el total de secciones de 17 árboles de *P. cembroides* y se realizó la serie de crecimiento de anillo total. Los índices dendrocronológicos estandarizados se compararon con datos de precipitación de estaciones climáticas cercanas al sitio donde se generó la

cronología. El mejor período de asociación entre ambas variables, se utilizó para generar un modelo de reconstrucción. Los datos climáticos disponibles se dividieron en dos subperíodos, uno para calibración y otro para verificación; el procedimiento se revirtió con el fin de determinar si el modelo de reconstrucción de cierto período, simulaba significativamente los valores registrados del otro período; para este propósito, se utilizó la subrutina Verify de la Librería de Programas Dendrocronológicos e la Universidad de Arizona. Esta subrutina involucra diversas pruebas estadísticas con las que se corrobora la validez del modelo de reconstrucción. En dicho programa, se utilizaron los primeros 21 datos (1971-1992) para la calibración y los 22 restantes (1993-2014) para la verificación. Para generar la reconstrucción de precipitación, se analizaron los datos de precipitación acumulada octubre-mayo del periodo 1971-2014.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La diferencia entre ambos métodos de conteo puede parecer predecible, sin embargo, para conocerla con mayor exactitud, se realizaron los análisis de cada una de las especies por separado.

5.1 Diferencias de conteos

5.1.1 *P. arizonica*

Al comparar el conteo realizado por los prestadores de servicio y el conteo hecho mediante métodos dendrocronológicos, se encontró una diferencia entre ambos métodos. De acuerdo con Amoroso y Suarez (2015) el datado exacto de los anillos de crecimiento facilita el análisis de un gran número de procesos en extensiones de tiempo considerables, lo cual no sería posible con mediciones periódicas.

Los resultados demostraron que el método de conteo en campo, subestima el crecimiento de *P. arizonica* en un rango de 1 a 65 años y un promedio de 16 años por sección (figura 5).



Figura 5. Sección 008 de *P. arizonica*, sección tomada a 0.30m de altura. Lado izquierdo muestra con conteos de campo, lado derecho muestra analizada dendrocronológicamente.

5.1.2 *P. cembroides*

Para el caso de la especie *P. cembroides*, la diferencia obtenida entre el conteo de campo con fines biométricos y el método dendrocronológico, indicó una diferencia de 3 a 288 años y un promedio de 100 años. La correcta delimitación de los anillos de crecimiento, representan pronósticos confiables en análisis para la gestión forestal de una amplia variedad de condiciones de manejo y contribuyen a la toma de decisiones, donde se involucra la edad adecuada para la realizar la corta (Amoroso y Suarez, 2015).



Figura 6. Sección transversal número 131 de *P. cembroides* cortada a 0.30m del suelo. Al lado izquierdo se indica el conteo en campo y al lado derecho al conteo con base en técnicas dendrocronológicas.

La productividad del rodal se expresa en términos de la altura respecto a la edad, o bien el volumen respecto a la misma variable, así como el incremento en edad, altura, volumen y el incremento medio anual. Las diferencias osesgos en el conteo de los crecimientos anuales pueden jugar un papel importante para el adecuado manejo de los bosques, como lo menciona Arteaga (2000).

5.2 Evaluación del tiempo de paso

5.2.1 *P. arizonica*

Ambos conteos mostraron diferencias de edades de acuerdo a las clases diamétricas existentes (cuadro 1).

Cuadro 1. Tiempo de paso (últimos 5 cm) estimado en clases diamétricas de 5 cm para *P. arizonica*.

Clases diamétricas (cm)	Conteo campo (años)	Conteo dendrocronológico (años)
30.0-34.9	12	30
35.0-39.9	12	18
40.0-44.9	10	17
45.0-49.9	12	17
50.0-54.9	10	13
55.0-59.9	6	22
\bar{X}	10	20
S	5	35
S ²	2	6

Con el conteo de campo, se determinó que los árboles de *P. arizonica* en este municipio tardan en promedio 10 años para lograr un incremento en diámetro de 5.0 cm, lo que representa una tasa de crecimiento anual de 0.5 cm/año. En contraste, el conteo dendrocronológico indicó un promedio de 20 años, con un incremento anual de 0.25 cm/año. Éstos resultados difieren con lo reportado por Quiñones *et al.* (2015) en el estado de Durango, donde reporta un promedio de tiempo de paso de 14.2 años, lo cual es esperado, debido a que utilizó la metodología tradicional de conteo directo en campo de los últimos 2.5 cm y probablemente también a diferencias en calidades de sitio donde se realizó el estudio.

5.2.2 *P. cembroides*

El tiempo de paso estimado en campo para un incremento de 5.0 cm, se estimó en promedio de 16 años, con un incremento medio anual de 0.31 cm y una desviación estándar de 2 años (cuadro 2).

Cuadro 2. Tiempo de paso determinado para *P. cembroides*.

Clases diamétricas (cm)	Conteo campo (años)	Conteo dendrocronológico (años)
30.0-34.9	15	30
35.0-39.9	17	39
40.0-44.9	17	47
\bar{X}	16	39
S	2	68
S ²	2	8

El tiempo de paso determinado mediante conteos dendrocronológico tuvo en promedio 39 años para un incremento de 5 cm y una desviación estándar de 8 años; lo que representa una tasa de crecimiento de 0.12 cm/año.

De acuerdo con Álvarez *et al.* (2005) las trayectorias de crecimiento en altura provenientes de los análisis troncales indican falta de información en la representación de la estructura, debido a que no se considera información de edades. Éste aspecto, se debe tener en cuenta debido a la diferencia de la media entre ambos métodos, que indicó 16 años por categoría diamétrica mediante el método de campo, en contraposición a 68 años con el método dendrocronológico.

Si se toma en consideración el método dendrocronológico como una herramienta en el estudio actual de los sitios de producción, se mejoraría substancialmente los modelos alométricos, lo que contribuirá a lo señalado por Hernández (2015), donde destaca la aplicación de los modelos de índice de sitio, para que el técnico pueda

regionalizar el predio en función del potencial de crecimiento que tiene el bosque y se identifiquen correctamente los niveles de corta por rodal.

El uso de esta tecnología puede fortalecer los programas de manejo sustentable de los predios bajo aprovechamiento, lo cual permitiría incrementar la certeza sobre las futuras cosechas (Hernández, 2015). Por lo tanto, la precisión del conteo de los anillos de crecimiento debe ser fundamental en la toma de decisiones, por medio de la estimación del tiempo de paso. De manera que no se sobreestime o se subestime la tasa de crecimiento del arbolado.

5.3 Determinación de edad a diferentes alturas del fuste

5.3.1 *P. arizonica*

Se comparó el conteo promedio de edades determinadas con base en las dos técnicas para los cortes tomados a diferentes alturas del fuste (cuadro 3). Con lo anterior, se analizaron con mayor claridad las diferencias entre ambos métodos.

Cuadro 3. Diferencias en el conteo de anillos de crecimiento en altura.

Altura de sección (m)	0.3	1.3	3.9	6.5	9.1	11.7	14.3	16.9	19.5
Conteo dendrocronológico (años)	103	90	78	66	54	40	34	24	11
Años para alcanzar la altura ¹		13	12	12	12	14	6	10	13
Conteo de campo (años)	67	59	52	44	36	28	20	13	5
Años para alcanzar la altura ¹		8	7	8	8	8	8	7	8
Diferencia (años)	26	20	16	13	11	8	7	10	15

¹Los años para alcanzar la altura, se refiere a la diferencia en edad entre dos alturas (anterior – siguiente).

El análisis anterior indica, que en la sección basal (0.30 m de altura con respecto a la superficie del suelo) se tiene una diferencia de 36 años entre ambos métodos, esto se debe a que, a dicha altura, el fuste tiene una mayor acumulación de anillos de crecimiento próximos a la corteza y las menores diferencias se observan a la altura de 11.7 m y 14.3 m. En la figura 7 se ilustra la diferencia entre ambos métodos de conteo y se enfatiza la diferencia que es continua a lo largo del fuste, ya que los resultados para el estudio biométrico en todo momento, subestimaron la edad verdadera de cada sección.

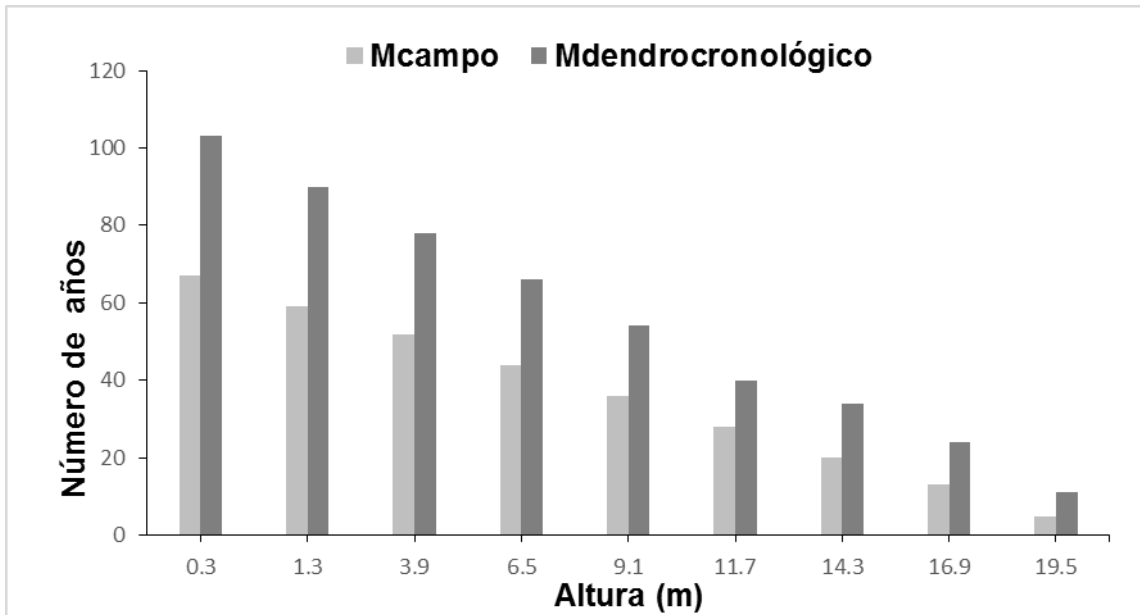


Figura 7. Número de años transcurridos promedio para que especímenes de *P. arizonica* alcancen determinada altura.

Se determinó que para la sección comprendida entre 11.7 m y 14.3 m de altura, los valores fueron muy similares, debido a que los anillos de crecimiento tienden a ser muy visibles en la mayoría de las muestras tomadas a éstas alturas; además de que los diámetros son menores.

La diferencia en los conteos, cobra especial relevancia en la toma de decisiones del manejo forestal, para determinar la capacidad productiva con mayor precisión y se convierte en una herramienta fundamental como lo señala Hernández *et al.* (2015).

El otro aspecto es que la estimación de mayores incrementos anuales con los conteos y mediciones en campo, conlleva a sobreestimar el crecimiento y los volúmenes de producción, así como a recortar los turnos de corta, lo que a largo plazo termina en una sobreexplotación del recurso. La determinación de las tasas de crecimiento con ambos métodos conforme el árbol se desarrolla en altura, se observa con mayor claridad en la figura 8.

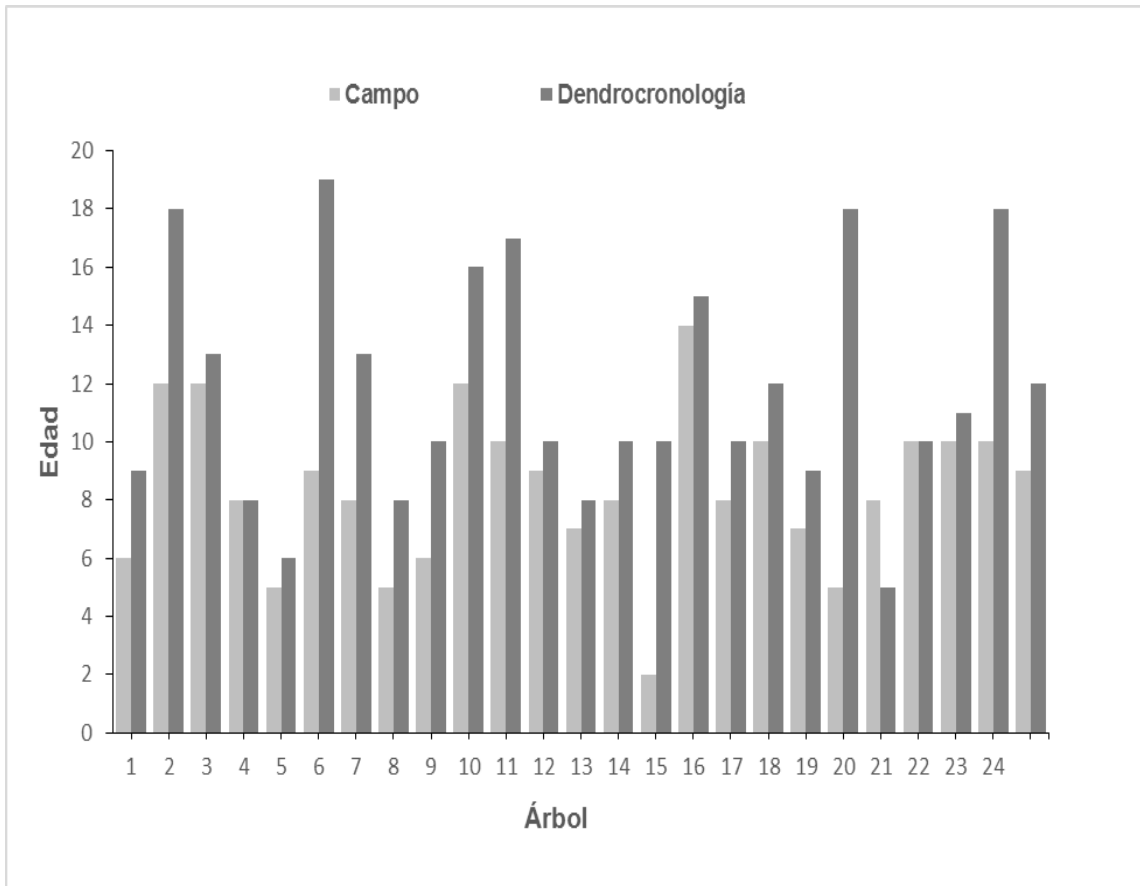


Figura 8. Diferencia de edad estimada con ambos métodos, para los 25 individuos a la altura de 1.30m.

5.3.2 *P. cembroides*

Para esta especie, los resultados comparativos se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Diferencias en el conteo de anillos de crecimiento entre ambos métodos.

Altura de la sección (m)	0.3	1.3	2.6	3.9	5.2	6.5	7.8	9.1	10.9	11.7	13
Conteo dendrocronológico	252	223	204	188	164	141	118	107	94	82	69
Años para alcanzar la altura ¹		29	19	16	24	23	23	11	13	12	13
Conteo campo	116	102	89	78	65	50	36	30	27	20	16
Años para alcanzar la altura ¹		14	13	11	13	15	14	6	3	7	4
Diferencia	136	121	115	110	99	91	82	77	67	62	53

¹Los años para alcanzar la altura, se refiere a la diferencia en edad entre dos alturas (anterior – siguiente).

La especie de pino piñonero tiene un promedio de 252 anillos en la sección a 0.30 cm del suelo, en comparación a 116 anillos determinados para el estudio biométrico y una diferencia promedio entre ambos métodos de 136 años.

La diferencia promedio para todas las secciones fue superior a 30 años, lo que es indicativo de los errores que se pueden cometer con esta especie, cuando se trata de estimar su edad mediante conteo directo en campo; esta discrepancia entre métodos, se origina por el lento crecimiento de la especie, que produce problemas de compresión de los anillos en la porción externa del fuste, lo cual sólo puede ser detectado mediante un excelente pulido y conteo en estereoscopio; posteriormente se tiene que comparar patrones de crecimiento, determinar problemas de anillos ausentes y ocasionalmente de anillos falsos para un correcto datado.

Estos análisis ayudan a reconstruir la vida del árbol, así como la edad a la altura de corta (Navarro *et al.*, 2002). La diferencia promedio en edades a diferentes alturas

se esquematiza para *P. cembroides* en la figura 9, donde se observa que la edad obtenida con ambos métodos fue más cercana a partir de 7.8 m de altura.

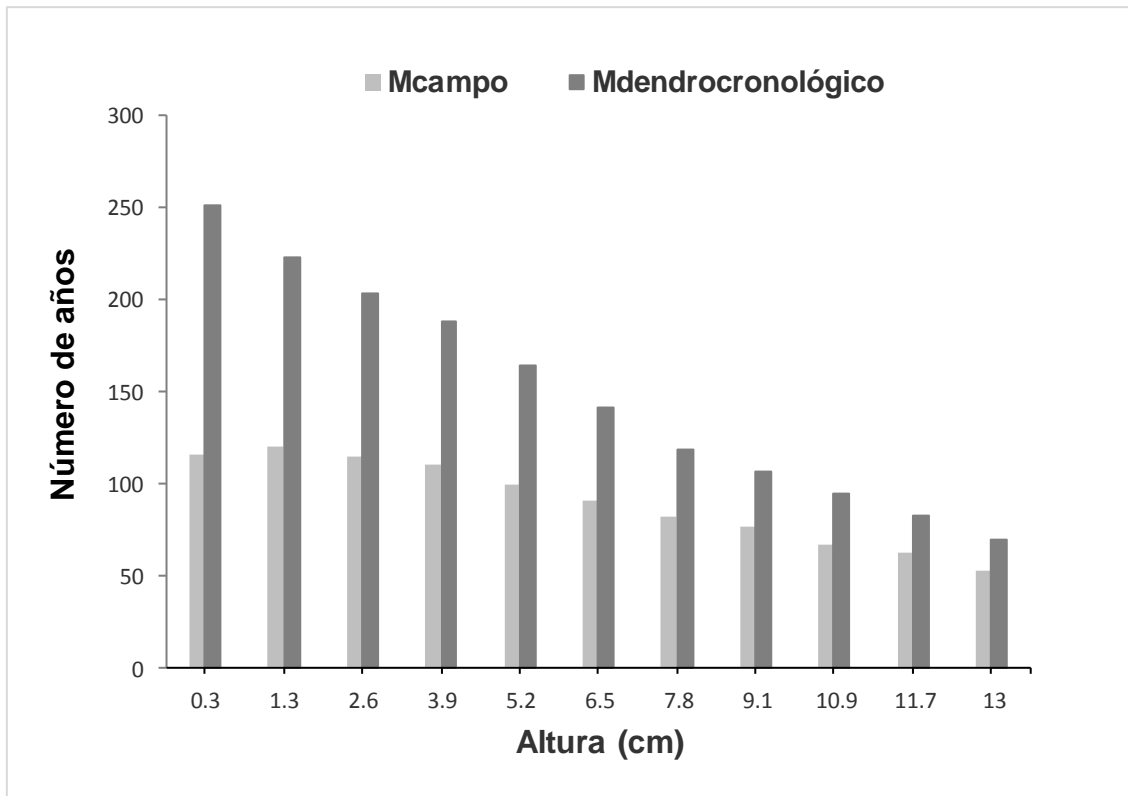


Figura 9. Relación entre altura y la edad para *P. cembroides*, al comparar el conteo directo en campo y el método dendrocronológico.

Las diferencias de estimación de edad real se aprecian con mayor claridad en la figura 10, donde se esquematiza la diferencia de la estimación de la edad entre ambos métodos.

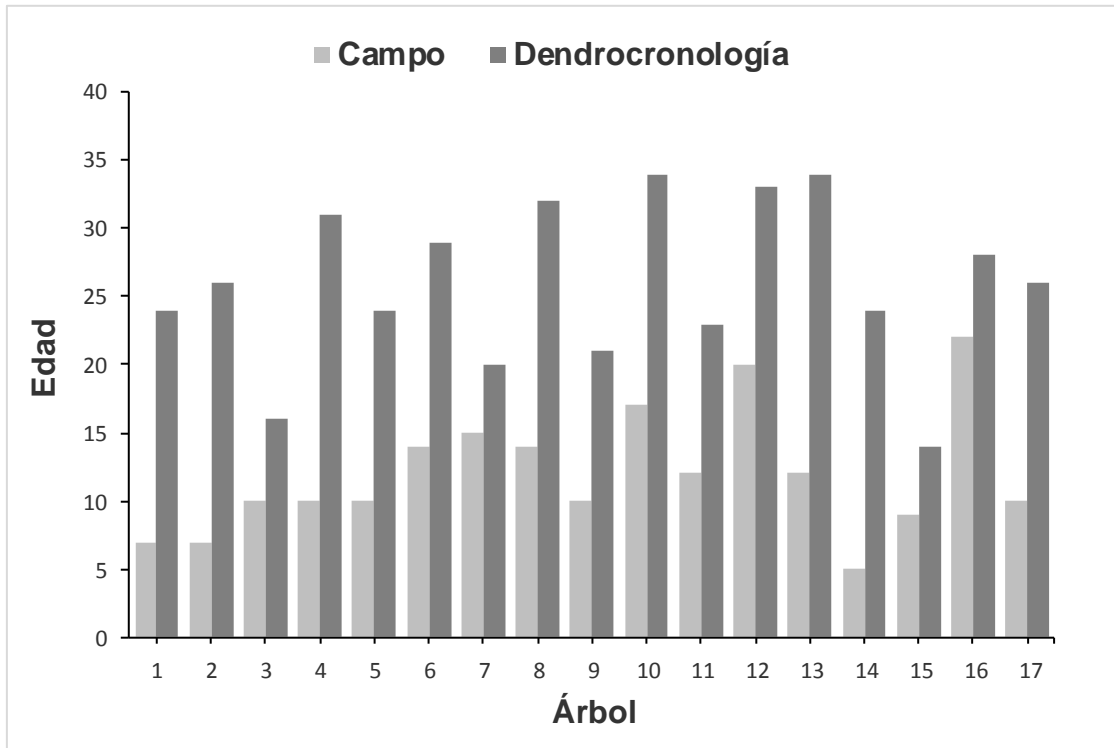


Figura 10. Diferencias en la estimación de edades en *P. cembroides* a una altura de 1.30m.

5.4 Incremento Corriente Anual en altura (ICA)

5.4.1 *P. arizonica*

El valor del ICA de acuerdo a la altura, se estimó en categorías de 20 años para árboles longevos. El mayor incremento en crecimiento se obtuvo a los 40 años y 4.30 m de altura, con un incremento anual de 0.73 m (cuadro 5).

Cuadro 5. Valores determinados de ICA para *P. arizonica*, en periodos de 20 años.

Edad (Años)	Altura (m)	ICA
20	1.83	0.25
40	4.30	0.73
60	11.59	0.28
80	14.43	0.31

La curva del ICA en altura de acuerdo a la edad, señala valores de 0.25 m por año durante los primeros 20 años, el punto de inflexión es a los 40 años con un incremento de 0.73 m por año (figura 11); 10 años más que lo reportado en la evaluación de la UMAFOR San Juanito (2013), donde se indica que el incremento anual máximo en altura para *P. arizonica* es a los 30 años, con un incremento de 0.20 m por año. El punto de inflexión decrece hasta los 60 años, posteriormente se aprecia un leve aumento del ICA, sin embargo, se encuentra muy por debajo del punto de inflexión. Lo anterior cumple con lo descrito por Espina (1984), donde los puntos de inflexión y la tasa máxima de crecimiento del modelo logístico, se expresa con un grado máximo que decrece consecutivamente.

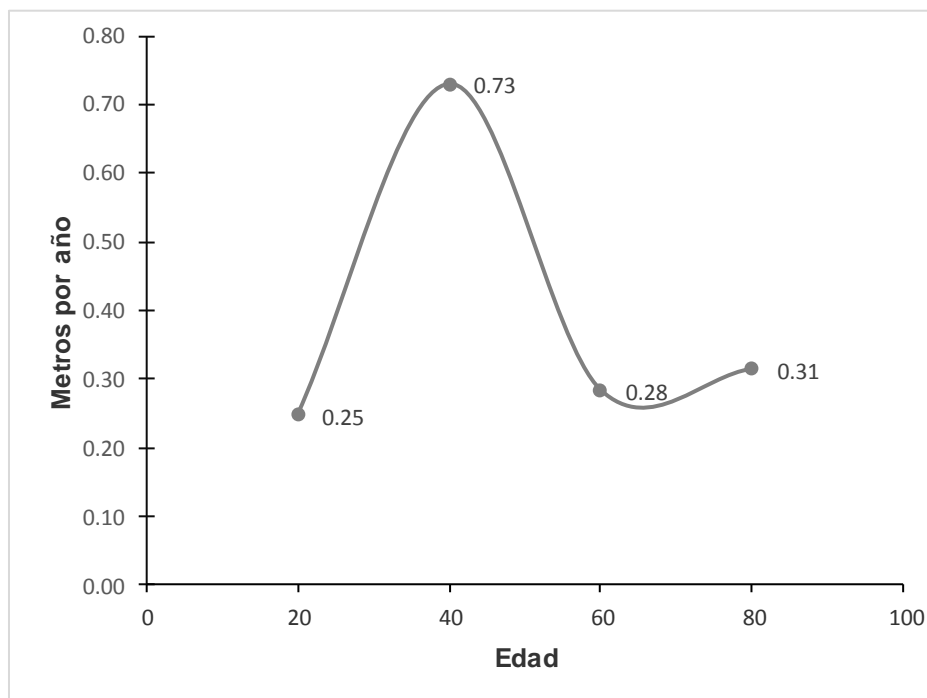


Figura 11. Representación del ICA para *P. arizonica*, en el municipio de Riva Palacio Chihuahua.

5.4.2 *P. cembroides*

El valor del ICA de acuerdo a la altura, se muestra en el cuadro 6. Se estimó con categorías de 20 años, por tratarse de árboles longevos. El incremento mayor se presenta a la edad de 140 años a los 9.1 m de altura con un incremento corriente anual de 0.24 m.

Cuadro 6. Valores determinados de ICA para *P. cembroides*, en periodos de 20 años.

Edad (años)	Altura (m)	ICA
20	0.76	0.12
40	1.96	0.143
60	3.39	0.108
80	4.47	0.113
100	5.6	0.113
120	6.73	0.237
140	9.1	0.24
160	11.5	0.162
180	13.12	0.031

A través de la curva del incremento anual en altura en función a la edad, se observa un incremento de 0.143 m a los 40 años, similar a *P. arizonica*, pero posteriormente el crecimiento disminuye entre 60 y 100 años, donde este se mantiene por debajo de 0.113 m por año, pero a los 140 años se observa el punto de inflexión, con 0.24m; posteriormente disminuye a hasta la edad de 180 años con un incremento anual de apenas 0.03 m por año (figura 12).

Se observa que el arbolado tiene incremento a mayor edad, en comparación con especies como *Pinus duranguensis* Martínez evaluada en el Salto, Durango por Corral y Návar, (2005) donde la especie alcanza su máximo crecimiento en altura, después de 75 años, con un incremento anual de 0.012 m por año.

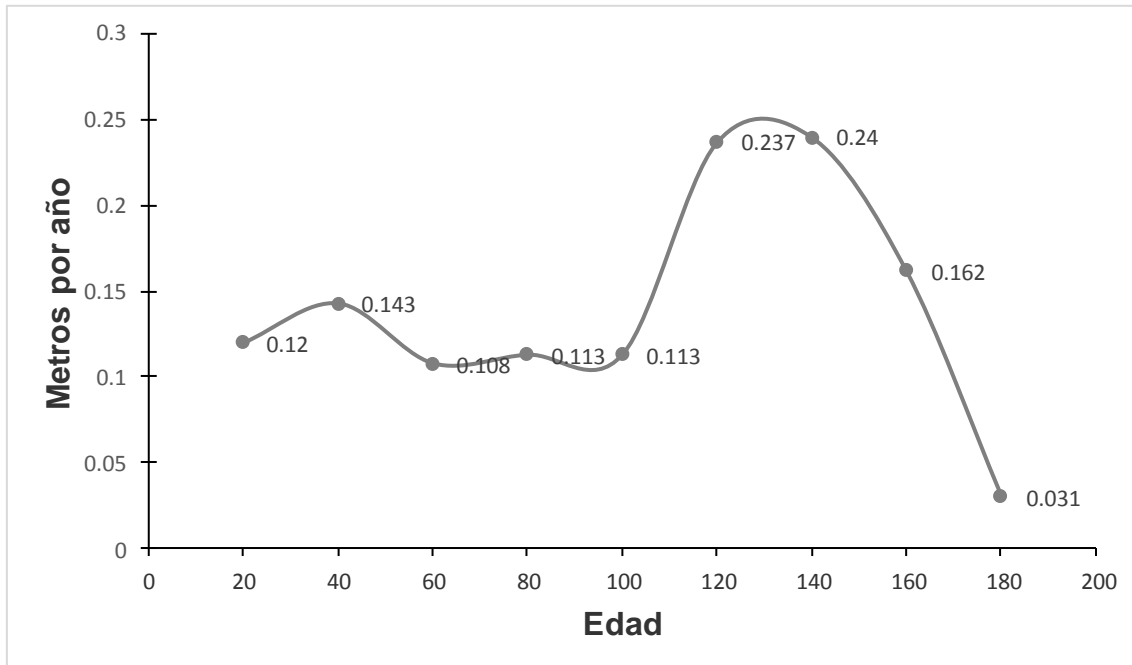


Figura 12. Representación del incremento corriente anual para *P. cembroides*, en el municipio de Riva Palacio, Chihuahua.

Es importante enfatizar que los valores estimados de ICA, son exclusivos del municipio de Riva Palacio, Chihuahua y de las especies estudiadas, debido a que integran la respuesta a diferentes factores (genotipo, calidad del arbolado, medio ambiente), los cuales pueden variar entre localidades aun cercanas; no obstante que este patrón de comportamiento puede ser similar en áreas con condiciones ecológicas similares al sitio de estudio.

5.5 Análisis diamétrico

5.5.1 *P. arizonica*

Conocer el incremento en diámetro es importante debido a que generalmente un árbol crece primero en altura y después en diámetro. El diámetro se ve influenciado de acuerdo a las condiciones ambientales y distribución espacial.

Mollinedo (2016) resalta que para obtener resultados que describan mejor las condiciones actuales en las que se desarrolla un arbolado, se debe analizar con mayor detalle las variables que lo afectan tales como: las condiciones del suelo o bien el clima a nivel del sitio y tomando en consideración los parámetros de crecimiento anual de los árboles.

Las secciones se clasificaron de acuerdo a clases diamétricas (cuadro 7). En este análisis, se agregaron las frecuencias que se refiere al número de secciones según la clase diamétrica y se contrastan ambos métodos de conteo.

Cuadro 7. Análisis de edad por clases diamétricas para *P. arizónica*.

Clase diamétrica	Frecuencia	Conteo campo (años)	Conteo dendrocronológico (años)
10.1 – 15.0	2	21	26
15.1 – 20.0	3	34	42
20.1 – 25.0	8	39	47
25.1 – 30.0	19	32	43
30.1 – 35.0	34	43	56
35.1 – 40.0	41	57	72
40.1 – 45.0	34	68	86
45.1 – 50.0	19	82	99
50.1 – 55.0	6	82	109

En éste caso, la estimación de la edad no representa diferencia elevada entre ambos métodos, sin embargo, si se registra diferencia por encima de 10 años y aumenta conforme los árboles son más longevos. Por otra parte, si la finalidad es el aprovechamiento, no se cometerá errores tan grandes debido a que en árboles jóvenes las secciones de entre 30 y 40 cm, presentan diferencias aceptables con ambos métodos de análisis.

Éste análisis permite sugerir que el aprovechamiento del arbolado se pudiera realizar a partir de los 30 cm, cuando a la altura del pecho el árbol tiene aproximadamente 46 años y requerirá 16 años adicionales para lograr un fuste de 40 cm.

5.5.2 *P. cembroides*

El análisis de *P. cembroides* sugiere que a partir de los 20 cm de diámetro (144 años). Se puede realizar el aprovechamiento, ya que como se trata de un árbol de lento crecimiento, el tiempo requerido para pasar a la siguiente categoría es (30 cm) es de 58 años y el volumen ganado no es significativo. Cabe mencionar que las diferencias de edad entre ambos métodos son hasta de 100 años.

La información del incremento radial puede explicar el desarrollo del diámetro y de ésta forma analizar la producción de madera en categorías diamétricas a través del tiempo (Worbes, 1995).

Cuadro 8. Análisis diamétrico para *P. cembroides*.

Clase diamétrica	Frecuencia	Conteo campo (años)	Conteo dendrocronológico (años)
5.0 – 10.0	14	24	82
10.1 – 15.0	26	34	115
15.1 – 20.0	19	52	144
20.1 – 25.0	23	75	177
25.1 – 30.0	22	93	202
30.1 – 35.0	21	98	228
35.1 – 40.0	9	113	286
40.1 – 45.0	2	107	319
45.1 – 50.0	1	100	388

Santiago *et al.* (2015) consideraron el uso del diámetro promedio como la variable más sensible de la densidad tomando en cuenta la edad, el número de árboles y la altura dominante para expresar las funciones de su crecimiento, propone evaluar dicha densidad para determinar la capacidad de sitio. Por lo tanto, la diferencia de la estimación de la edad entre ambos métodos representa una parte importante del análisis del arbolado.

5.6 Análisis estadístico del incremento en diámetro

Con la finalidad de saber existe diferencia significativa se realizó una prueba de “t”, la cual expresa los siguientes resultados.

Cuadro 9. Diferencias de estadísticos descriptivos entre ambos métodos de conteo para las dos especies en estudio.

Diferencia de conteos	Media Ccampo	Media Cdendro	Varianza Ccampo	Varianza Cdendro
<i>P. arizónica</i>	50.888	64.444	500.611	814.777
<i>P.cembroides</i>	77.333	215.666	1088.5	10036.75

Dado que tanto la media y la varianza es mayor en el conteo mediante el método dendrocronológico con respecto al conteo en campo, se acepta la hipótesis de que existe diferencia significativa entre ambos métodos.

Cuadro 10. Estadísticos de prueba de “t” aplicada en ambas especies.

Diferencia de conteos	Correlación	grados de libertad	Estadístico t	P(T<=t) dos colas
<i>P. arizónica</i>	0.9949	8	-6.0942	0.00029
<i>P.cembroides</i>	0.8667	8	-5.6496	0.00048

Los resultados estadísticos sugieren una diferencia significativa entre ambos métodos de conteo. Por lo tanto, se puede afirmar que las diferencias entre dichos métodos de estimación de la edad del arbolado afectan estadísticamente los resultados en cuanto a la descripción del inventario de los recursos forestales.

5.7 Cronologías o series de crecimiento

5.7.1 *P. arizonica*

Se fecharon 25 árboles con un total de 168 muestras; la correlación entre series fue de 0.691, la extensión de la serie dendrocronológica fue de 163 años (1852 al 2014) (cuadro 11). La especie mostró un mismo patrón de crecimiento tanto de manera individual como integrada. El análisis de fechado con base en el programa COFECHA indicó que cumplen con el mínimo de significancia $r > 0.3281$, $p < 0.01$ (Holmes (1983)).

Cuadro 11. Parámetros dendrocronológicos para *P. arizonica*.

Parámetro	Resultado
Número de series fechadas	168
Serie maestra	1852-2014
Total de anillos en toda la serie	11770
Anillos fechados a comprobar	11765
Intercorrelación entre series	0.691
Sensibilidad media	0.402

De los datos obtenidos, resalta la alta capacidad de *P. arizonica* para responder a la señal climática, la cual se observa por la alta variabilidad interanual y multianual presente en la serie de crecimiento (figura 13).

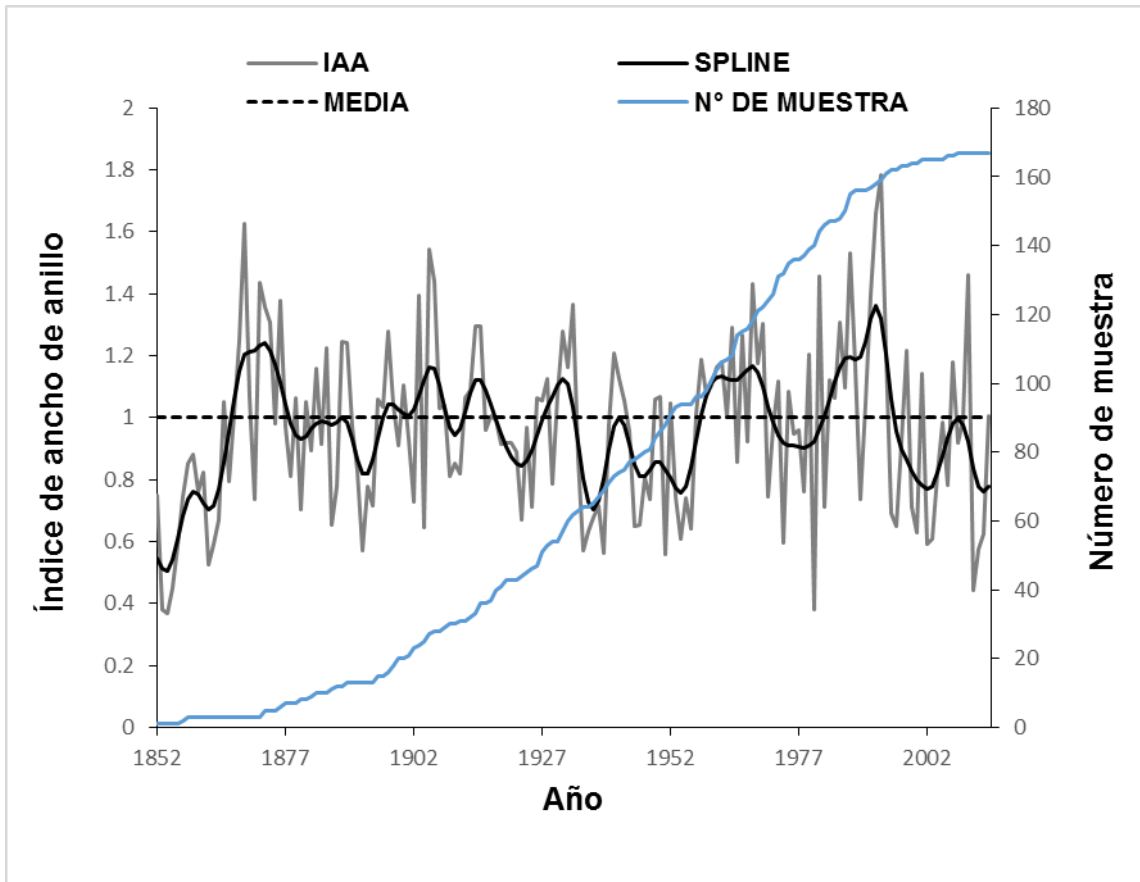


Figura 13. Índice de ancho de anillo de *P. arizonica* para el periodo de 1852 a 2014.

Los valores por debajo de la media para los años 1902, 1904 y el periodo de 1931 al 1934, son consistentes con reconstrucciones de precipitación (invierno-primavera) y reconstrucciones de flujo en la cuenca del río Nazas (Villanueva *et al.*, 2005). Lo anterior, es indicativo de que la variabilidad climática interanual y multianual en esta región tiene influencia marcada en los crecimientos de rodales naturales.

5.7.2 *P. cembroides*

Para el caso de *P. cembroides* se fecharon 17 árboles con un total de 138 muestras (secciones), la intercorrelación entre series es de 0.629 y la serie se extiende de 1627 a 2014 (388 años). Los estadísticos de la cronología se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 12. Parámetros estadísticos de valoración de la calidad de fechado para *P. cembroides*.

Parámetro	Resultado
Número de series fechadas	138
Serie maestra	1627-2014
Total de anillos en toda la serie	23989
Anillos fechados a comprobar	23963
Intercorrelación entre series	0.629
Sensibilidad media	0.442
Segmentos con posibles problemas	18
Longitud media de las series	173.8

De acuerdo con Constante *et al.* (2009) el valor de intercorrelación entre series para *P. cembroides* oscila entre 0.61 y 0.74 en estudios realizados en Sierra de Zapalinamé, Coahuila. El análisis realizado dentro la UMAFOR Centro-Norte de Chihuahua, indicó una intercorrelación entre series de 0.62, por lo que este valor se encuentra en un rango aceptable. En la figura 14 se aprecian los valores del índice de ancho de anillo.

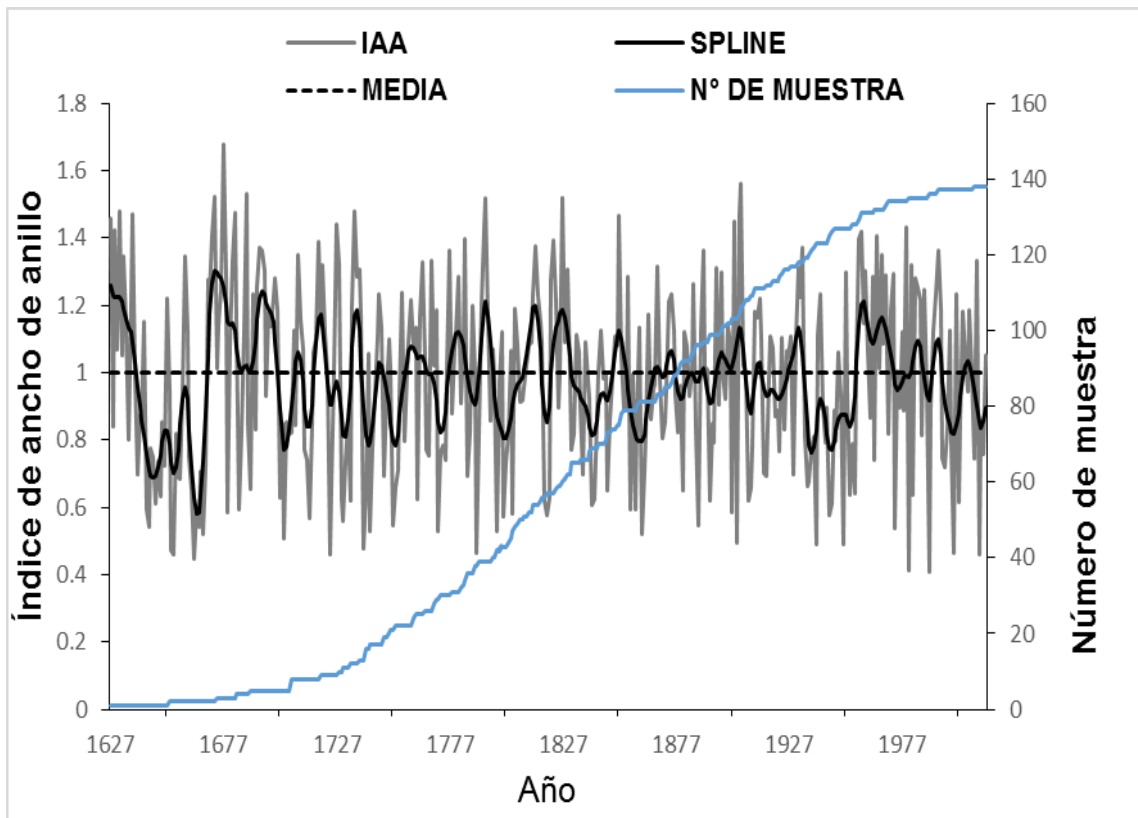


Figura 14. Los índices dendrocronológicos para *P. cembroides* se extienden de 1627 a 2014.

5.8 Reconstrucción de la precipitación estacional Octubre-Mayo con series dendrocronológicas de *Pinus cembroides* en Riva Palacio, Chihuahua

La cronología de *P. cembroides* se asoció con los datos de la precipitación disponibles para el estado de Chihuahua (figura 15). El periodo de precipitación acumulada octubre-mayo (invierno-primavera), registró la mayor correlación entre el índice de ancho de anillo total y la precipitación observada ($r= 0.67$, $p<0.005$).

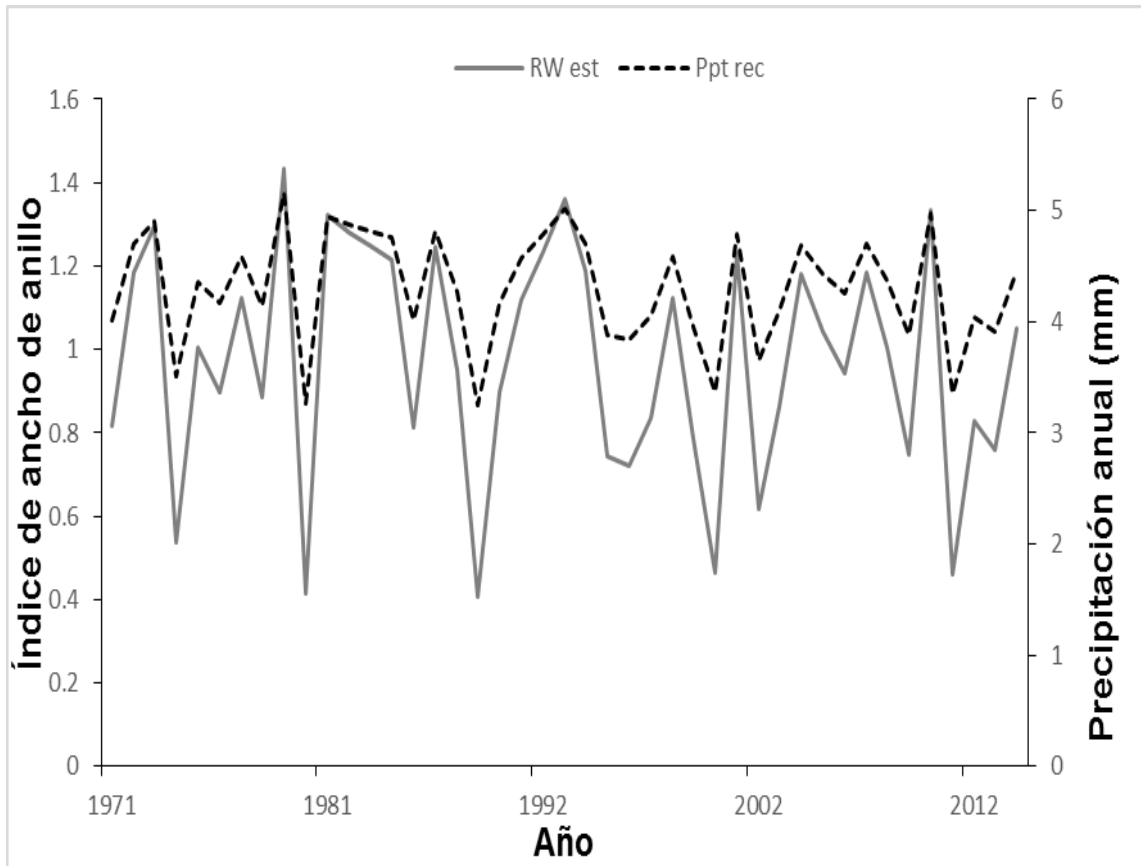


Figura 15. Relación entre el índice de ancho de anillo y precipitación acumulada octubre-mayo del periodo de 1971-2014.

5.9 Calibración y Verificación

Con la finalidad de validar el modelo de reconstrucción, se llevó a cabo el proceso de calibración y verificación. La calibración analiza la relación entre ambas variables, mientras que la verificación, determina la significancia de los datos reconstruidos en comparación a los registrados y que no se utilizaron durante el proceso de calibración (cuadro 13).

Cuadro 13. Estadísticos del proceso de calibración y verificación para la reconstrucción de precipitación octubre-mayo.

Análisis	Periodo	Correlación	Reducción del error	Prueba de T ²	Prueba de signos	Primera diferencia negativa	R ²
Calibración	1971-1992	0.6169*	0.3533*	3.2765*	6*	6*	0.3805
Verificación	1993-2014	0.6970*	0.5582*	3.2231*	4*	4*	0.4858

*Valor significativo - con valor de confianza 95% (P<0.05)

El análisis de calibración se realizó para el periodo de 1971 – 1992 y la verificación para el periodo de 1993 – 2014. En ambos subperiodos, los resultados fueron significativos (cuadro 14). El periodo de datos climáticos utilizados para la reconstrucción fue de 1971-2014, mostró un coeficiente de determinación de $r^2=0.44$ (P<0.05).

Cuadro 14. Modelo de regresión para la variable dependiente (precipitación estacional Invierno – primavera).

Periodo	R ²	Coeficientes	Error estándar	Prueba de T	Probabilidad
1971-2014	0.446	-33.271	22.686	-1.466	0.150
		129.034	22.459	5.745	9.959

Cuadro 15. Análisis de la varianza para el modelo de reconstrucción estacional de precipitación.

	Grados de libertad	suma de cuadrados	promedio de los cuadrados	F
Regresión	1	54124.670	54124.670	33.008
Residuos	41	67228.614	1639.7223	
total	42	121353.284		

El modelo de regresión que se utilizó fue el siguiente:

$$Y_t = -33.27127421 + 129.034171 * X_t$$

Donde:

Y_t = Valor de la precipitación reconstruida para el periodo octubre – mayo de un año en particular.

X_t = Índice de ancho de anillo para el mismo año.

Los datos de la calibración y verificación fueron significativos ($p < 0.05$), por lo tanto, el modelo para el periodo 1971- 2014 se consideró estadísticamente válido con fines de reconstrucción (figura 16).

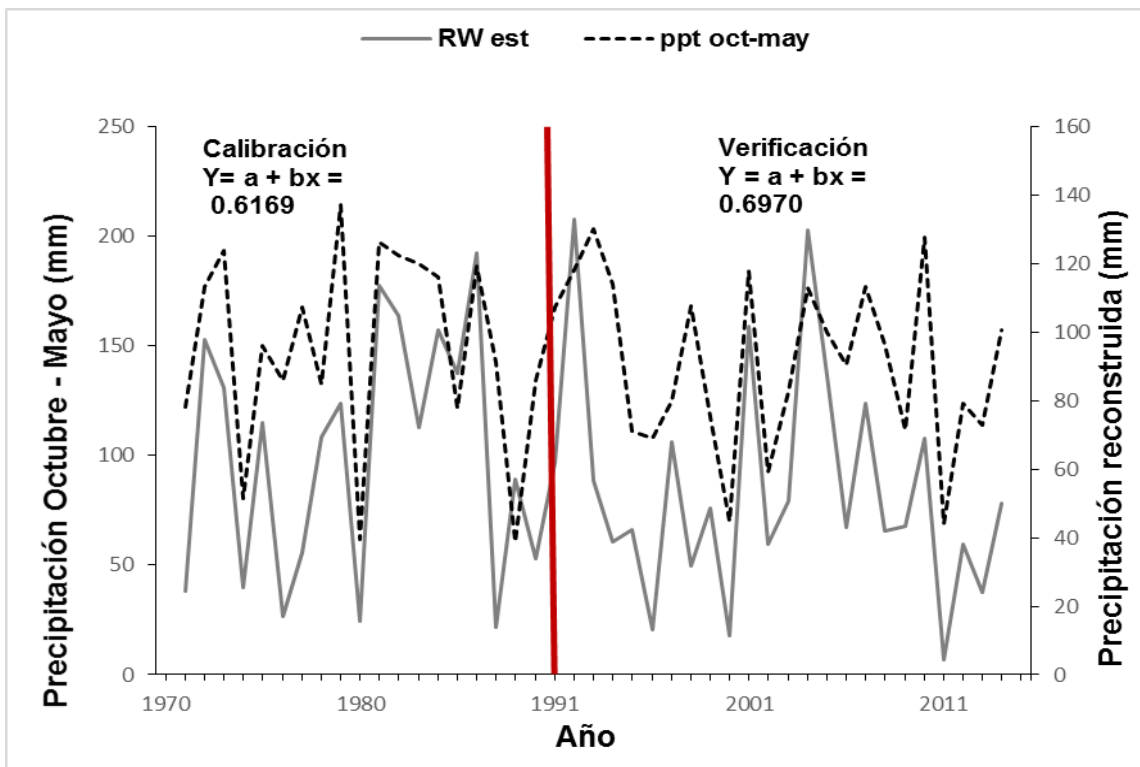


Figura 16. Calibración y verificación entre precipitación observada y precipitación reconstruida para el periodo estacional octubre-mayo.

5.10 Reconstrucción de la precipitación *P. cembroides* periodo (1620-2014)

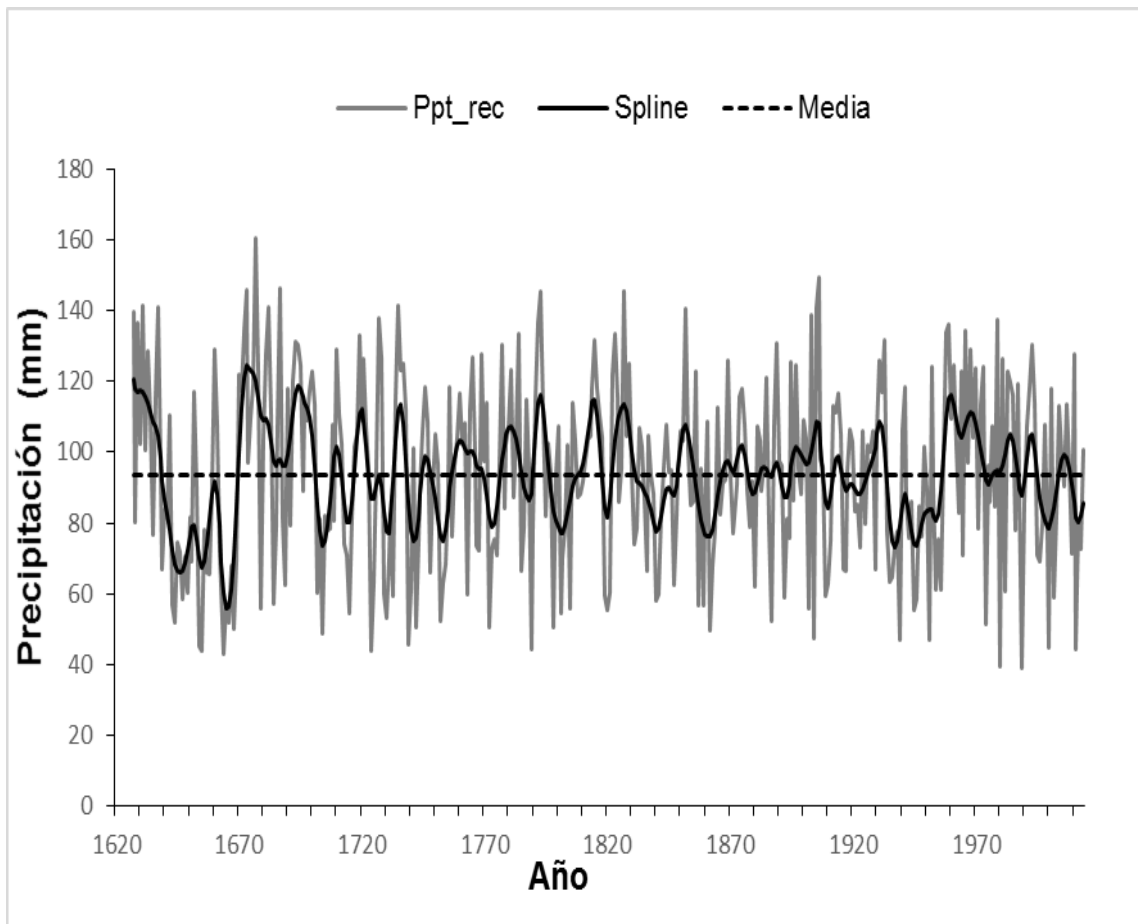


Figura 17. Reconstrucción de la precipitación estacional octubre-mayo en el municipio de Riva Palacio, Chihuahua.

El presente estudio constituye una gran contribución a incrementar la red de reconstrucciones dendroclimáticas existentes en el norte de México y aporta también a ampliar la red existente de cronologías de *P. cembroides* en el país. Esta reconstrucción climática con una extensión de 387 años (1627-2014) es similar en extensión a reconstrucciones climáticas existentes en el sureste de Coahuila, noreste de Guanajuato y la región Oriental de Tlaxcala (Constante *et al.*, 2009; Cortés *et al.*, 2012; Cardoza *et al.*, 2014).

5.11 Variabilidad climática detectada en la reconstrucción

5.11.1 Periodos secos

En la reconstrucción de la precipitación se presentaron 13 periodos de sequías con duración de 4 o más años. Algunos de los periodos de sequías 1770-1773, 1785-1786, 1988-1989 y el año 2011 coinciden con lo reportado por Montes (2014). Estos periodos se presentan de forma recurrente en el estado de Chihuahua. Así mismo, los años 1902, 1904, 1982, 1798, 1887 y 2000, coinciden con los descritos en la reconstrucción del Parque Nacional Basaseachi (Irby *et al.*, 2013).

Uno de los periodos de sequías característico en el estado de Chihuahua es el del periodo de 1909-1911, aunque en el municipio Riva Palacio se registra con menor intensidad. Cabe mencionar los años 1742, 1820, 1954, 1974 y 1980, coinciden perfectamente con lo reconstruido por Díaz (2002), en ambos estudios, estos años son reportados como años secos. Así mismo, los periodos 1702-1705, 1752-1756 y 1944-1951 coinciden con los reconstruidos para el noreste de Chihuahua (Villanueva *et al.*, 2016).

Otro de los trabajos reportados es la reconstrucción del Rio Conchos por Woodhouse *et al.* (2012), quienes destacan los periodos de sequía de 1772-1776, 1892-1894, 1950-1951 y 1953-1956; periodos iguales a los reconstruidos en el presente trabajo. Así mismo, los registros de 1690 y 1890 coinciden con lo reconstruido para la Sierra Madre Oriental y con menor intensidad para los años de 1990 y 1947 (Villanueva *et al.*, 2009).

En la cuenca alta del Rio Nazas se han descrito sequías para los periodos 1890-1896, 1954-1956, 1974-1975 y 1988-1989. Los años 1820, 1859, 1867, 1887, 1894 y 2012 para el Rio Mezquital (Villanueva *et al.*, 2014). Ambos sitios pertenecen al estado de Durango, sin embargo, estos efectos de sequía también se registran en el estado de Chihuahua, lo cual representa que fenómenos de circulación general afectan al mismo tiempo superficies extensas en el norte de México.

5.11.2 Periodos húmedos

En la reconstrucción de la precipitación, se presentaron 18 periodos con precipitación por arriba de la media, con duración de 4 o más años. Los periodos húmedos más sobresalientes fueron 1761-1766 excepto el año 1763. Estos eventos sincronizan con estudios climáticos realizados para el estado de Chihuahua (Montes, 2014).

Otros de los periodos destacados con precipitaciones constantes arriba de la media registrados para la parte alta de la cuenca del río Nazas y que sincronizan con la variabilidad climática reconstruida son 1627-1635, 1733-1740, 1766-1773, 1814-1818 y 1931 (Cerano *et al.*, 2012). Para el norte de México los años 1830, 1900, 1970, 2010 y 2012 (Villanueva *et al.*, 2014).

VI. CONCLUSIONES

Las diferencias determinadas en edad para *P. arizonica*, mediante el conteo directo en campo realizado por prestadores de servicio forestal y a través de técnicas dendrocronológicas fue de 16 años en promedio. Para muestras tomadas a diferentes alturas esta diferencia fluctuó entre 15 y 26 años. Los tiempos de paso estimados para *P. arizonica* con los conteos realizados en campo, determinaron que el rodal incrementa 5 cm cada 10 años. Mientras tanto el tiempo de paso estimado con los conteos realizados mediante técnicas dendrocronológicas sugiere que para que el rodal incremente 5 cm deben pasar al menos 20 años. Para *P. cembroides* los resultados con base en la estimación de la técnica de campo, determinó que para que un rodal incremente 5 cm, deben transcurrir 16 años y la estimación con técnicas dendrocronológicas determinó que para el mismo incremento deben pasar 36 años.

El ICA estimado es de gran utilidad para conocer el comportamiento de la altura de acuerdo a una edad determinada; en el caso de *P. arizonica*, se señala que, a la edad de 40 años, el árbol alcanza un ritmo de crecimiento óptimo en altura. Para el caso de *P. cembroides* el arbolado alcanza un ritmo de crecimiento óptimo en altura a los 140 años. Ésta información será de gran utilidad para la toma de decisiones en el manejo de los bosques del municipio de Riva Palacio, Chihuahua en la UMAFOR Centro Norte.

Las cronologías generadas con el método dendrocronológico representan la base del análisis de las diferencias de ambos métodos de conteo. Se generó la reconstrucción de precipitación octubre – mayo que comprende el periodo 1627-2014 (387 años) con base en los crecimientos anuales de *P. cembroides* para el municipio de Riva Palacio, Durango. Las series de crecimiento de *P. arizonica* y *P. cembroides* muestran una misma respuesta a la señal climática, aún bajo condiciones de manejo, especialmente para los años considerados de extrema sequía como 1902, 1904, 1931, 1934, 1980 y 1982.

VII. LITERATURA CITADA

- Alimentación, O. d. (Agosto de 2004). *Inventario forestal nacional manual de campo modelo*. Obtenido de <http://www.fao.org>: <http://www.fao.org/3/a-ae578s.pdf>
- Álvarez-González, J. G., Barrio, F. M., U. Diéguez-Aranda, C., & Ruíz González, A. D. (2005). Modelos para la gestión forestal: una revisión de las metodologías de construcción de modelos de masa. *EDP Sciences*, 13.
- Amoroso, M., & Suarez, M. L. (2015). La aplicación de los análisis de los anillos de crecimiento a interrogantes ecológicos: Un breve repaso de la Dencroecología en Hispanoamérica. *Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente*, 24(2), 1-6. doi:10.7818/ECOS.2015.24-2.01
- Arteaga martínez, B. (2000). Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayototla, Guerrero. *División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo*, 6(2), 151-157.
- Bradley, R.S. 1999. Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary. Second Edition. Volumen 68. Elsevier Academic Press. Amsterdam. 614 p.
- Cardoza - Martínez, G. F., Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Cervantes Martínez, R., Guerra de la Cruz, V., & y J Estrada Ávalos, J. (2013). Reconstrucción de la precipitación anual para la región oriental del estado de Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 110-127.
- Cardoza Martínez, G. F., Cerano Paredes, J., Cervantes Martínez, R., Guerra de la Cruz, V., & Estrada Ávalos, J. (2014). Reconstrucción de la precipitación anual para la región oriental del Estado de Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 110-127.
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda, R. D., Constante García, V., González Barrios, J. L., & Juan, E. Á. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del Río Nazas, Durango. *Revista mexicana de Ciencia Forestal*, 3(10), 7-23.
- Cerano Paredes, J., Villanueva Díaz, J., Valdez Cepeda, R. D., Méndez González, J., & Constante García, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (2), 235-249.
- Cieszewski, C., & Bailey, R. (2000). Generalized Algebraic Difference Approach: Theory Based Derivation of Dynamic Site Equations with Polymorphism and Variable Asymptotes. *Forest Science*, 46(1), 116-126.
- CONABIO. (2007). *Pinus cembroides*. México: comisión nacional de la biodiversidad.
- Constante- García, V., Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Cornejo Oviedo, E. H., & Valencia Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides*

- Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia forestal en México*, 34(106), 17-39.
- Constante-García, V., Villanueva Díaz, J., Cerano paredes, J., & Estrada Ávalos, J. (2010). *Parámetros para definir el potencial dendrocronológico*. Gómez Palacio, Durango: SAGARPA, INIFAP CENI-RASPA.
- Contreras, F. (1998). *Proyecto de Manejo Forestal Sostenible*. Santa Cruz, Bolivia: BOLFOR.
- Cook, E. H. (1984). *Programa ARSTAN and users manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona*. . Tucson, AZ : 15p.
- Corral, S., & Návar C., J. (2005). Análisis del crecimiento e incremento de cinco pináceas de los bosques de Durango. *Madera y Bosques*, 11(1), 29-47.
- Cortés Barrera, E. N., Villanueva Díaz, J., Nieto de Pascual Pola, C., Estrada Ávalos, J., & Guerra de la Cruz, V. (2012). Reconstrucción de precipitación estacional para el noroeste de Guanajuato. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(9), 51-67.
- Cruz-Leiva, I. A., Valdéz Lazalde, J. R., Angeles Pérez, G., & De los Santos Posadas, H. M. (2010). Modelación espacial del área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques*, 16(3), 75-97.
- Cumplido, O. R. (2002). Tablas de volúmenes y de incrementos para tres especies del género *Pinus* de tres predios del estado de Chihuahua. *Universidad Autónoma Chapingo*, 114p.
- Del Valle Arango, I. G. (1979). Curva preliminar de crecimiento del cativo (*Prioria copaifera*) en bosque virgen empleando el metodo de los tiempos de paso . *Revista Facultad Nal. De Agronomía*, 19-26.
- Díaz, S. C., Therrell, M. D., Stahle, D. W., & Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647–1992. *Climate Research*, 22(4), 237-244.
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y Bosques*, 22(1), 111-123.
- Espina, L. (1984). *El modelo logístico. Serie de estudios económicos*. Santiago de Chile: Departamento de informaciones estadísticas y publicaciones de Banc.
- Falcao, O. A. (2005). Designing decision support tools for Mediterranean forest ecosystems management: a case study in Portugal. *Annals of Forest Science*, 62(7), 751–760.
- FAO, O. d. (1980). *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos*. Roma: FAO.

- Flores, L. C. (2001). Árboles selectos *Pinus arizonica* Engelm. en el estado de Chihuahua. *Revista Forestal Latinoamericana*, 16(30), 41-51.
- Fritts, H. (1976). *Tree-rings and Climate.*, . London - New York- San Francisco.
- García-Romero, M., Narvaez Flores, R., Castruita Esparza, L., L.G., A., Núñez López, D., I.H., G. J., . . . Vélez Máyne, S. F. (2009). *ESTUDIO REGIONAL FORESTAL. Unidad de Manejo Forestal Centro Norte A.C.* Chihuahua: Comisión Nacional Forestal, Comisión Nacional de la Biodiversidad, Gobierno del estado de C, Proárbohihuahua.
- Gil Guirado, S. (2013). Reconstrucción climática histórica y análisis evolutivo de la vulnerabilidad y adaptación a las sequías e inundaciones en la Cuenca del Segura (España) y en la Cuenca del Río Mendoza (Argentina). *Cuadernos Geográficos*, 52(2), 132-151. Obtenido de <http://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/1515/1722>
- González Elizondo, M. S., González Elizondo, M., Tena Flores, J., Ruacho González, L., & López Enrríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental: una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 351-403.
- González-Cásares, M., Pompa-García, M., & J. Camarero, J. (2016). Differences in climate–growth relationship indicate diverse drought tolerances among five pine species coexisting in Northwestern Mexico. *Trees* , 531-544.
- Granados Victorino, R. L., Granados Sánchez, D., & Sánchez González, A. (2015). Caracterización y ordenación de los bosque de pino piñonero (*Pinus cembroides subsp. rzedowskii*) de la cuenca oriental (Puebla, Tlaxcala y Veracruz). *Madera y Bosques*, 23-42.
- Gutiérrez, E. (2009). La Dendrocronología: métodos y aplicaciones. *Arqueología Náutica Mediterránea*, 309-322.
- Hernández Ramos, J., García Cuevas, X., Hernández Ramos, A., García Magaña, J. J., Muñoz Flores, H. J., Flores López, C., & García Espinoza, G. G. (2015). Ecuaciones altura-diámetro generalizadas para *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el estado Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(31), 8-21.
- Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and . *Tree-Ring Bulletin*, 69-78.
- Hynynen, J. (2017). Conceptos básicos para la modelación del crecimiento foresta. *Recursos Naturales y Ambiente*(64), 22-27.
- Imaña-E., J., & Encinas-B., O. (2008). *Epidometría forestal* (Primera ed.). Brazil: RELAFOR Y FINATEC.
- INEGI. (2017). *Instituto Nacional de Estadística y geografía*. Recuperado el 4 de 3 de 2016

- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & José, V. D. (2013). Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques*, 19(1), 93-105.
- Josza L., A., & Middleton, G. R. (1994). A discussion of wood quality attributes and their practical implications. *Forintek Canada Corp*, 42.
- Juanito, U. S. (2013). *Sistema Biométrico*. Chihuahua: Comisión Nacional Forestal.
- Klepac, D. (1983). *Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales* (segunda ed.). Edo. Mex.: Universidad Autónoma Chapingo .
- Linares, J. C., & Camarero, J. J. (2012). Growth patterns and sensitivity to climate predict silver fir decline in the Spanish Pyrenees. *European Journal of Forest Research*, 131, 1001-1012. doi:10.1007/s10342-011-0572-7
- Manrique Méndez, E., & Fernández Cancio, Á. (1995). El papel de la Dendroclimatología en el estudio del Cambio Climático actual. *Cuadernos de la S.E.C.P(2)*, 21-34.
- Manrique Méndez, E., & Fernández Cancio, A. (1997). El papel de la dendroclimatología en el estudio del cambio climático actual. *Cuadernos de la S.E.C.P(2)*, 21-34.
- Martínez- Salvador, M., Valdez-Cepeda, R. D., & Pompa-García, M. (2013). Influencia de las variables físicas en la productividad de Pinus arizonica y pinus engelmannii en el sur de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 19(3), 35-49.
- Mollinedo-García, M. S., Herrera-machuca, M. Á., & Muñoz-Záens, F. (2016). Caracterización del crecimiento de plantaciones jóvenes de teca (Tectona grandis Linn f.) y estimación de curvas de índice de sitio en el área septentrional de la Republica de Guatemala . *Madera y Bosques*, 22(2), 89-103.
- Montes Ontiveros, A. (2014). *Reconstrucción dendrocronológica de precipitación invierno –primavera para Bocoyna, Chihuahua*. Universidad Autonoma Chapingo . Durango: Unidad Regional de Zonas Áridas.
- Mundo, I. A., El Mujtar, V., Perdomo, M. H., Villalba, R., & Barrera, M. D. (2010). Austrocedrus chilensis growth decline in relation to drought events in northern Patagonia, Argentina. *Trees*, 24, 561-570. doi:10.1007/s00468-010-0427-8
- Navarro-Martínez, J., A., B.-d. I., Mausalem-Santiago, M., Ramíre-Maldonado, H., & Granados-Sánchez, D. (2002). Ecuaciones y tablas de volúmenes comerciales con y sin corteza para *Peltogyne mexicana* Martínez, una especie amenazada del estado de Guerrero, MÉXICO. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 133-139.
- Núñez, D., Martínez, M., Sáenz A., J., Quintana, G., Flores Zubiarte, G., Morales Chávez, M. C., . . . E.A., R. b. (2013). *Cartografía de uso de suelo y*

vegetación del Estado de Chihuahua. Chihuahua: Secretaría de Desarrollo Rural, Dirección de Desarrollo Forestal.

- Olvera Coronel, L. P. (2017). *Descripción anatómica de la madera de siete especies del género Pinus* (Primera ed.). México; D.F.: Intituto Nacional de Ecología.
- Perry, J. (1991). *The pines of México and Central America*. Portland, Oregon.
- Quiñones - Barraza, G., De los Santos - Posadas, H. M., & Alvarez - Gonzáles, J. G. (2015). Crecimiento en diámetro normal para Pinus en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 108-125.
- Rangel - Blanco, L., Tello - Iturbide, A., & Gómez - Issasi, J. A. (2017). Externalidades ambientales derivadas del cambio climático en la zona sur de Tamulipas. *Revista de la alta tecnología y sociedad*, 9(3), 1-9.
- Robinson, w. R. (1980). *Amicomputer-based tree-ring measuring system*. (40:59-64 ed.). Tree ring bulletin.
- Roldán Cortés, M. A., De Los Santos Posadas, H. M., Ramírez Maldonado, H., Valdez Lazalde, J. R., Ángeles Pérez, G., & Velázquez Martínez, A. (2013). Estimadores de muestreo para inventario de plantaciones forestales comerciales de eucalipto en el sureste mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(26), 39-57.
- Rosas-Chavoya, M., Granados Sánchez, D., Granados Victorino, R. L., & Esparza Govea, S. (2015). Clasificación y ordenación de bosques de pino piñonero del estado de Querétaro. *Revista Mexicana de ciencias forestales*, 7(33), 52-73.
- Santiago García, W., De los Santos Posadas, H. M., Ángeles Pérez, G., Valdéz Lazade, j. R., Corral Rivas, J. J., Rodríguez Ortiz, G., & Santiago García, E. (2015). Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para Pinus patula. *Madera y Bosques*, 21(3), 95-110.
- Stahle, D. W., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., . Villanueva D., J. (1998). Experimental Dendroclimatic Reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137-2152.
- Stokes, M. A. (1968). *An Introducción to Tree-Ring Dating* (73p. ed.). Chicago: University of Chicago Press.
- Tomazello, M., Roig, F. A., & Zevallos-Portillo, P. A. (2009). Dendrocronología y dendroecología tropical: Marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina. *Marco histórico y experi*, 2(44), 73-82.
- Torres- Rojo, J. M. (2006). *Tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina y el Caribe*. Roma, Italia: Dirección de Información de la FAO, Viale delle Terme di Caracalla.

- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., De los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., . . . Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.06.040
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J., Aguirre-Calderón, O., & Naguel, J. (2010). Modelos de crecimiento de árbol individual: Aplicación del Simulador BWINPro7. *madera y Bosques*, 16(4), 81-104.
- Villalba, R., Villagra, P. E., Boninsegna, J. A., Morales, M. S., & Moyano, V. (2000). Dendroecología y dendroclimatología con especies del género prosopis en Argentina. *MULTEQUINA*, 9(2), 1-18.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés Montaña, C., Vázquez Selem, L., Yocom, L. L., & Ruíz Corral, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(87), 141-153. doi:10.14350/rig.44485
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Rosales Mata, S., Arrocena López, J. C., Stahle, D. W., Ruíz Corral, J. A., & Martínez Sifuentes, A. R. (2014). Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca alta del Río Mezquital, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*(10), 1897-1912.
- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Stahle, D., Constante García, V., Vázquez Salem, L., Estrada Ávalos, J., & Benavides Solorio, J. d. (2010). Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 7-29.
- Villanueva Díaz, J., Fulé, P. Z., Cerano Paredes, J., Estrada Ávalos, J., & Sánchez Cohen, I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el Barlovento de la Sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista de Ciencia Forestal en México*, 34(105), 37-69.
- Villanueva-Diaz, J., Luckman, B., Stahle, D., I., M. T., Cleaveland, M., Cerano Paredes, J., . . . R., J. I. (2005). Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrochronologia*, 22(3), 215-223.
- Woodhouse, C. A., Stahle, D. W., & Villanueva Díaz, J. (2012). Rio Grande and Rio Conchos water supply variability over the past 500 years. *Climate Research*, 51, 125-136. doi:10.3354/cr01059
- Worbes, M. (1995). How to measure growth dynamics in tropical trees a review. *IAWA*, 16(4), 337-351.