

DENDROCRONOLOGÍA DE *Pinus cembroides* Zucc. Y RECONSTRUCCIÓN DE PRECIPITACIÓN ESTACIONAL PARA EL SURESTE DE COAHUILA

Vicenta Constante García¹, José Villanueva Díaz¹,
Julián Cerano Paredes¹, Eladio H. Cornejo Oviedo² y
Salvador Valencia Manzo²

RESUMEN

Los anillos de crecimiento anual del pino piñonero se utilizaron para desarrollar una reconstrucción de precipitación invierno - primavera (enero - julio) de 410 años (1595 a 2004) en un sitio ubicado en el sureste de Coahuila. Los objetivos de este trabajo consistieron en examinar el potencial dendrocronológico de la especie; desarrollar una reconstrucción de la precipitación estacional; analizar las fluctuaciones hidroclimáticas y su frecuencia en el tiempo y determinar el impacto de patrones atmosféricos circulatorios como El Niño. La correlación entre series fue de 0.72, considerada excelente; alta sensibilidad climática (0.3090), adecuada relación señal - ruido (22.94), desviación estándar de 0.3009 y una autocorrelación de primer orden de 0.2646. La serie de ancho de anillo explicó 58% de la precipitación regional. Los períodos secos detectados en la reconstrucción, que se respaldaron con archivos históricos y con reconstrucciones previas de precipitación, fueron: 1784 a 1794, 1850 a 1857, 1860 a 1884 y 1945 a 1962. Se detectaron sequías recurrentes con frecuencia de 50 a 60 años. Los períodos húmedos observados en este estudio ocurrieron de 1620 a 1639, de 1647 a 1661, de 1672 a 1685, de 1766 a 1780, de 1900 a 1916 y de 1966 a 1994. Muchos de estos episodios húmedos estuvieron presentes de manera simultánea en otras reconstrucciones de precipitación para el norte de México. El fenómeno El Niño en su fase cálida no indicó una asociación significativa con la precipitación de la región sureste de Coahuila, aunque sí se obtuvo una correlación significativa con el Índice de Precipitación Total para Todo México.

Palabras clave: Dendrocronología, El Niño Oscilación del Sur, *Pinus cembroides*, precipitación reconstruida, sensibilidad media, Sierra de Zapalinamé.

Fecha de recepción: 09 de septiembre de 2008.

Fecha de aceptación: 05 de noviembre de 2009.

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria - Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), INIFAP. Correo-e: constante.garcia@inifap.gob.mx

²Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro".

ABSTRACT

Ring width indices of pinyon pine were used to develop a seasonal Winter - Spring (January - June) precipitation reconstruction on the last 410 years (1595 – 2004) for southeastern Coahuila. The objectives of this study were to analyze the dendrochronological potential of *Pinus cembroides*, to develop a seasonal precipitation reconstruction, to determine hydroclimatic fluctuations in time, and to analyze the influence of atmospheric circulatory patterns like El Niño. Some statistical parameters of the chronology such as series intercorrelation with a value of 0.72, climate sensitivity with 0.31, signal - to - noise ratio of 22.94, standard deviation of 0.30, and first order autocorrelation of 0.26 had values considered excellent for dendroclimatic reconstruction purposes. The ring - width chronology explained 52% of the seasonal precipitation variance. The reconstructed drought periods supported by historical archives and tree - ring reconstructions for this and northern Mexico regions were: 1784 to 1794, 1850 to 1857, 1860 to 1884, and 1945 to 1962. Droughts were detected at frequencies of 50 to 60 years. Wet episodes were present in the reconstruction at the periods of 1620 to 1639, 1647 to 1661, 1672 to 1685, 1766 to 1780, 1900 to 1916, and 1966 to 1994. The seasonal precipitation reconstructions did not show a significant association with the warm phase of El Niño phase but was significantly correlated with the All Mexico Precipitation Index.

Key words: Dendrochronology, El Niño Southern Oscillation, *Pinus cembroides*, reconstructed precipitation, mean sensitivity, Sierra de Zapalinamé.

INTRODUCCIÓN

La Sierra Zapalinamé (SZA) constituye la principal fuente de agua para la ciudad de Saltillo, Coahuila y poblaciones aledañas. En la actualidad hay una gran presión social sobre esta área natural protegida, debido al crecimiento poblacional desmedido de la citada zona urbana, que demanda más espacios para crecer, así como recursos hídricos adicionales, situación que ha alterado significativamente los procesos hidrológicos en la reserva, con efectos en su calidad y disponibilidad para fines de consumo humano, industrial y agropecuario.

En el conocimiento de la variabilidad climática histórica de SZA existe la limitante de la escasa información instrumental procedente de estaciones meteorológicas y que en el mejor de los casos, no sobrepasan los 70 años de extensión. Por lo anterior, para entender el comportamiento de las variaciones hidroclimáticas a través del tiempo es menester el uso de fuentes “*proxy*” o fuentes indirectas; una de ellas son los anillos de crecimiento anual de especies climáticamente sensitivas como *Pinus cembroides* Zucc., pino piñonero, que al

fecharse al año de su formación, permiten inferir las condiciones dominantes previo o durante ella.

Estudios dendroclimáticos en la Sierra de Arteaga desarrollados con anterioridad señalan la necesidad de ampliar la red dendrocronológica con especies sensibles en la zona, para tener un mejor conocimiento de las fluctuaciones hidroclimáticas que han afectado tanto las partes altas, como bajas de las cuencas hidrológicas que conforman la región (Pohl *et al.*, 2003; Cerano, 2004; Villanueva *et al.*, 2007).

Se plantea la hipótesis de que el pino piñonero por habitar en sitios semiáridos, posee mayor sensibilidad climática y es factible de captar la variabilidad hidroclimática que ha caracterizado a la SZA y áreas contiguas en los últimos siglos.

De esta manera, los objetivos del estudio que se describe a continuación fueron: examinar el potencial dendrocronológico del pino piñonero en la parte baja del Área Natural Protegida SZA; analizar su sensibilidad climática y generar una reconstrucción de precipitación estacional de *Pinus cembroides* para los últimos 400 años, así como cuantificar las fluctuaciones hidroclimáticas en el tiempo, frecuencia de sequías, períodos húmedos, documentar su efecto social y económico y el impacto de patrones atmosféricos circulatorios.

Descripción de la especie

Pinus cembroides pertenece al grupo de pinos “piñoneros”, los cuales son muy parecidos entre ellos (Farjon *et al.*, 1997). Su área de distribución abarca desde el oeste de Estados Unidos de América hasta México, donde está presente en Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro e Hidalgo (Perry, 1991), entre los 18° y los 32° de latitud norte. En estos territorios la precipitación media anual oscila de 350 a 700 mm (Rzedowski, 1978). Crece sobre laderas de montañas, lomeríos, al pie de cerros, con pendientes secas y rocosas; se advierte preferencia en climas de templado seco a templado subhúmedo y tolerancia a sequía de siete a ocho meses. Los suelos donde se desarrolla, por lo general, son pobres en fertilidad, secos, pedregosos y calizos, de color grisáceo a negro, calcáreos, con pH de neutro a alcalino (Figura 1).

Es parte de la vegetación de transición entre las formaciones xerofíticas del Altiplano Mexicano y las vertientes internas de las Sierras Madre Oriental y Occidental. El pino piñonero se asocia con bosques de *Quercus*, *Pinus*, *Pinus Quercus*, así como con especies de matorral arbustivo, encinares y pinares de climas semidesérticos (Madrigal, 1977; Robert, 1977; Rzedowski, 1978).



Figura 1. Ejemplar longevo de pino piñonero en la parte baja de la Sierra de Zapalinamé, Coahuila.

El bosque de *Pinus cembroides* desempeña una función importante en el ecosistema y en el ciclo hidrológico, al evitar la erosión, favorecer la infiltración del agua y restablecer los mantos acuíferos subterráneos. Al mismo tiempo es hábitat natural de la fauna silvestre, dado que 90% del volumen de su semilla producida, constituye el alimento básico de muchas aves y mamíferos.

La importancia maderera de *Pinus cembroides* es mínima, pero el piñón (semilla comestible) es de alto valor económico, al constituir 90% de la cosecha de piñones en la República Mexicana (Martínez, 1948; Robert, 1977; Eguiluz, 1978).

Dentro de la SZA, *Pinus cembroides* es dominante, en particular, para el ejido Cuauhtémoc, donde su hábitat es utilizado para ganadería extensiva, extracción de tierra de monte, recolecta de leña, tala de arbolado para construcción y venta de semilla o piñón, así como con fines de recreación y producción de agua (De la Cruz, 1984; Portes, 1996).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio

El área de estudio se localiza en el ejido Cuauhtémoc al sureste de Coahuila dentro de la Sierra de Zapalinamé, que forma parte de la región hidrológica Bravo - Conchos No. 24, en la cuenca Río Bravo - San Juan (B), entre las coordenadas 101°03'23" y 100°54'49" de longitud oeste y 24°18'56" a 25°15'16" de latitud norte.

En términos geológicos es un área plegada y fracturada con topografía accidentada y rocas sedimentarias marinas del Jurásico y Cretácico. Los suelos dominantes son castañozem cálcico, feozem calcáreo y rendzina; con una vegetación constituida por *Pinus cembroides*, la cual en ocasiones se asocia con matorral desértico rosetófilo y con manzanita *Arctostaphylos* sp. El clima se caracteriza por un régimen de lluvias de verano y presencia ocasional de precipitación invernal (INEGI, 1983; García, 1978; Marroquín y Arce, 1985; INEGI 2000a; INEGI, 2000b) (Figura 2).

El área de estudio se dividió en cuatro rodales, dentro de los cuales se ubicaron 400 individuos de *P. cembroides*, mediante un muestreo sistemático y selectivo y a lo largo de un gradiente altitudinal (2,200 a 2,500 m), de ellos se obtuvieron de dos a tres núcleos de crecimiento con un taladro de Pressler, marca Forestry Suppliers. La selección de los árboles se realizó en función a sus características fenotípicas, es decir, individuos con apariencia longeva, localizados en sitios de pobre calidad de estación (suelos someros, pedregosos, de baja fertilidad). En este muestreo, también se incluyeron individuos jóvenes para facilitar el fechado

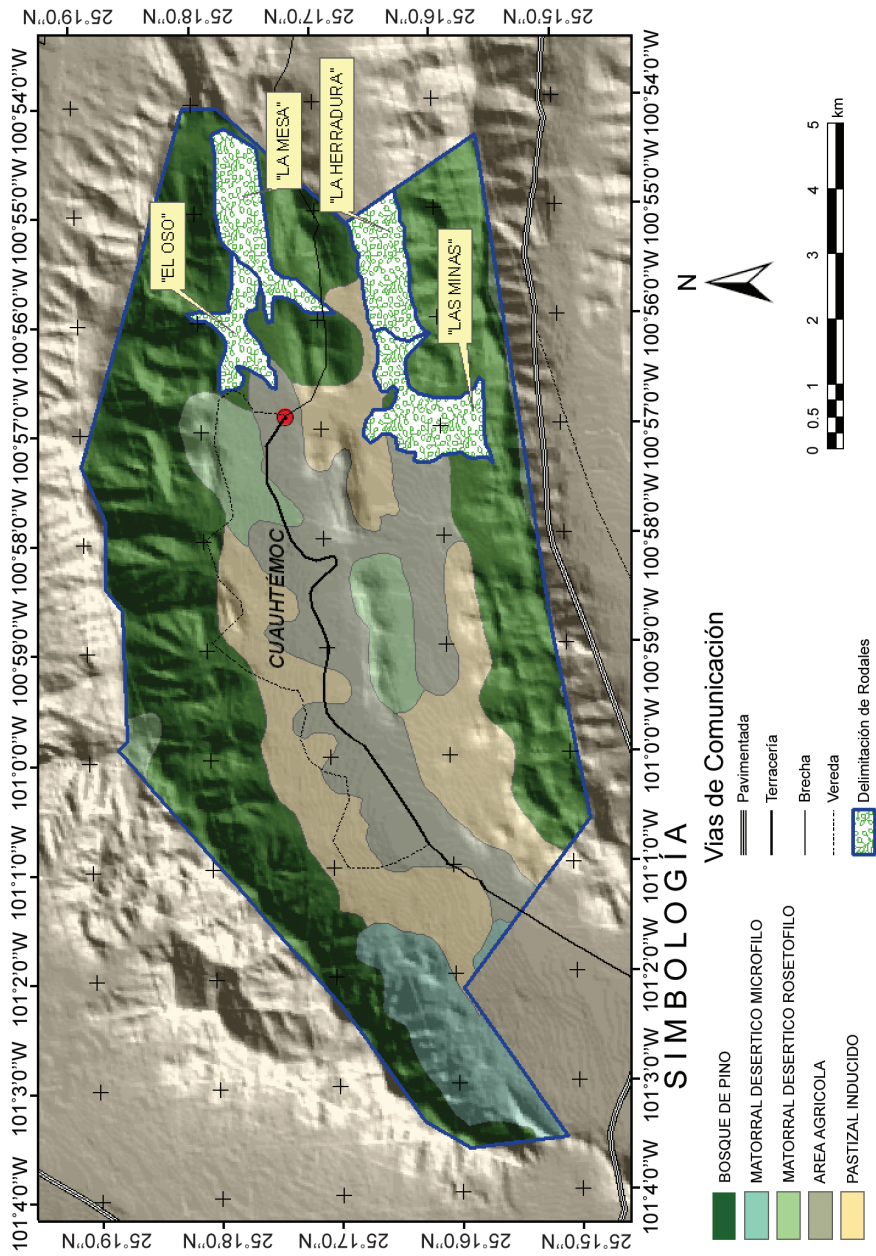


Figura 2. Polígono del ejido Cuauhtémoc, en Sierra Zapalinamé, Coahuila, uso del suelo y localización geográfica de sitios seleccionados de *Pinus cembroides*.

de los crecimientos más recientes. Dicho material se procesó mediante técnicas dendrocronológicas estándar, para asegurar el fechado exacto de cada crecimiento al año de su formación y producir series de tiempo o índices dendrocronológicos, de utilidad para reconstrucciones paleoclimáticas (Stokes y Smiley, 1968).

Con el programa COFECHA, que es parte del grupo de programas conocido como Dendrochronology Program Library (DPL, por sus siglas en inglés), se analizó la calidad del fechado, al traslapar períodos de 50 años y observar la correlación entre las series. El programa ARSTAN eliminó la varianza debido a factores biológicos y geométricos, mediante el ajuste a los valores de medición de ancho de anillo, de una curva exponencial negativa o línea recta, y de esta manera, producir índices derivados de la división entre los valores actuales de anillo total (medidos) y los estimados (Cook y Holmes, 1984). El programa generó tres versiones de cronologías de anillo total, que son estándar, residual y ARSTAN (Cook, 1985).

Para determinar el período del año en que el crecimiento radial de *P. cembroides* estuvo más influenciado por la precipitación, se utilizó el programa PRECON, que aborda la relación entre ambas variables y produce una función de respuesta de la cronología y los datos de lluvia.

Los registros de precipitación se obtuvieron del programa Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC II), del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2000), del que se seleccionaron ocho estaciones cercanas al área de estudio, para integrar una base de datos de precipitación media mensual a nivel regional. Las estaciones meteorológicas en el estado de Coahuila fueron: San Antonio de las Alazanas, Huachichil, El Tunal, Arteaga, Gómez Farías, San Juan de la Vaquería, Saltillo y General Cepeda (Figura 3).

Para el desarrollo del modelo climático, la precipitación total estacional del período enero - julio y la cronología estándar se sometieron sólo al proceso de calibración. No se realizó la verificación estadística de la ecuación generada, ya que los datos climáticos regionales fueron insuficientes en términos de extensión, para llevar a cabo dicho proceso. A los valores reconstruidos se les ajustó una curva flexible suavizada (spline) a nivel década, para resaltar eventos de baja frecuencia (Cook y Peters, 1981). Los periodos secos y húmedos derivados del modelo, no obstante, se verificaron al compararlos tanto con datos procedentes de archivos históricos, como con trabajos similares de reconstrucciones de precipitación con anillos de árboles, efectuados con anterioridad para las regiones norte y centro de México y suroeste de los Estados Unidos de América.

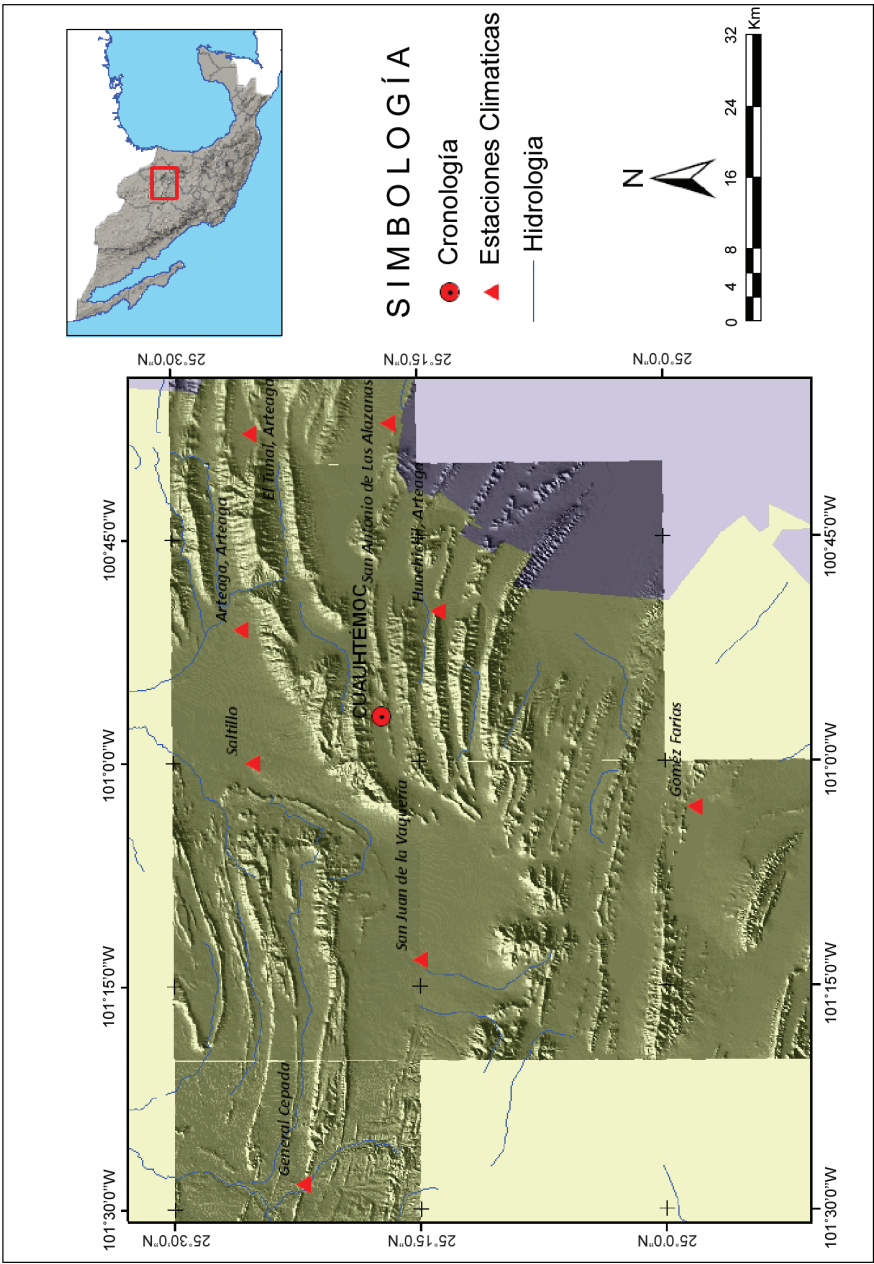


Figura 3. Ubicación del área de estudio y estaciones meteorológicas empleadas en el estudio.

Los valores de precipitación obtenidos se compararon con el Índice de Lluvia Tropical (TRI, por sus siglas en inglés), parámetro que es considerado como más representativo de la variabilidad de ENSO en la región tropical (Wright, 1979). La reconstrucción también se contrastó con el Índice de Lluvia para Todo México (Englehart y Douglas, 2000), con el fin de analizar la existencia de alguna relación entre ambas variables, es decir, determinar la posible concordancia entre la cantidad de lluvia para la SZA y el agua promedio mensual que se precipita en todo el país. Finalmente, se determinó si existía alguna recurrencia en la regularidad de eventos de baja frecuencia, en especial para las sequías que son más comunes en el noreste de México.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la población inicial de árboles muestreados (400), se seleccionaron 38 en los cuales se fecharon 67 radios o incrementos (el resto fue descartado debido a problemas en crecimiento) y con el programa COFECHA se verificó dicha calidad. La correlación fue de 0.72, lo que significa que un importante porcentaje de los árboles involucrados en este análisis poseen una señal climática común y el “cofechado” o “dateo” cruzado fue adecuado para fines de reconstrucción paleoclimática. El programa ARSTAN produjo un valor de sensibilidad climática de 0.31, que se clasifica como alto; un valor señal - ruido de 22.94, que implica una gran capacidad de la especie para captar la variabilidad climática y una desviación estándar de 0.3, indicativo de una gran variación interanual entre anillos de crecimiento, así como un valor de autocorrelación de primer orden de 0.26, considerado aceptable para reconstrucción climática (Fritts, 1976) (Cuadro 1).

Para fines comparativos de respuesta climática de *Pinus cembroides*, los valores estadísticos procedentes del programa ARSTAN se analizaron contra aquellos procedentes de una red de cronologías de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Sierra de Arteaga, Coahuila, sitio muy cercano a la SZA (Cerano, 2004; Villanueva *et al.*, 2007).

Los valores de los parámetros de la cronología de *P. cembroides* fueron similares en términos de correlación entre series, pero superiores en sensibilidad media y desviación estándar a los parámetros estadísticos de las cronologías de *Pseudotsuga menziesii*. Los de autocorrelación de primer orden, que deben ser bajos, fueron mejores para *P. cembroides* y la relación señal - ruido no mostró un comportamiento regular. La información anterior confirma el alto potencial de este pino piñonero para el desarrollo de estudios paleoclimáticos.

El período de precipitación estacional, al que responde el crecimiento del pino piñonero en la región es invierno - primavera (enero a julio), lo que sugiere que

Cuadro 1. Parámetros estadísticos para las cronologías de *Pinus cembroides* y *Pseudotsuga menziesii*, desarrolladas para las Sierras de Zapalinamé y de Arteaga, Coahuila.

Parámetros	<i>Pinus cembroides</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>				
	Cuauhtémoc	La Viga	El Coahuilón	Los Pilares	El Morro	El Tarillal
Correlación entre series ¹	0.72	0.73	0.83	0.75	0.75	0.75
Sensibilidad media ²	0.3090	0.2840	0.2891	0.2770	0.1992	0.4744
Desviación estándar ³	0.3009	0.3405	0.3194	0.2699	0.2483	0.4497
Autocorrelación de primer orden ⁴	0.2646	0.592	0.3211	0.1863	0.4312	0.016
Relación señal-ruido ⁵	22.937	34.19	51.67	11.93	14.73	23.87

¹Grado de asociación o similitud entre dos series de crecimiento; ²Capacidad de una especie para mostrar variaciones en crecimiento de un año al siguiente como función del clima; ³Medida de la variación de los datos alrededor de la media; ⁴Tendencia de un árbol a producir crecimientos similares de un año al siguiente, aunque esta persistencia decrece con el tiempo; ⁵Relación señal - ruido es una expresión de la fuerza de la señal común observada entre árboles del rodal.

la especie depende de la precipitación ocurrida en la época fría del año. Esta lluvia, se caracteriza por su baja intensidad, favoreciendo así una infiltración alta y que aunado a una baja evapotranspiración, produce un balance positivo en términos de agua almacenada en el perfil del suelo (Meko *et al.*, 1996) (Figura 4).

En el área de estudio, las lluvias torrenciales superan la tasa de infiltración y por ende, gran parte de la precipitación escurre como flujo superficial, volumen que no se almacena en el perfil del suelo y que tampoco es utilizado para el crecimiento de la especie (Fritts, 1976).

En esta región, la precipitación del período invierno - primavera (enero - julio) constituye 51% del total anual. Una respuesta de las coníferas a la precipitación invierno - primavera como es el caso de *Pseudotsuga menziesii*, se ha descrito con anterioridad para la Sierra de Arteaga y otras partes del norte de México y suroeste de los Estados Unidos de América, donde el crecimiento de algunas especies de pinos, particularmente la formación de madera temprana, está asociada con la precipitación acumulada del período que se extiende de noviembre del año previo hasta junio o julio del año actual de crecimiento (Díaz *et al.*, 2002; Villanueva y McPherson, 1999; Pohl *et al.*, 2003; Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano, 2004; Villanueva *et al.*, 2006; Villanueva *et al.*, 2007; Santillán, 2008); mientras que la precipitación de verano determina el comportamiento en grosor de la madera tardía (Stahle, 1996).

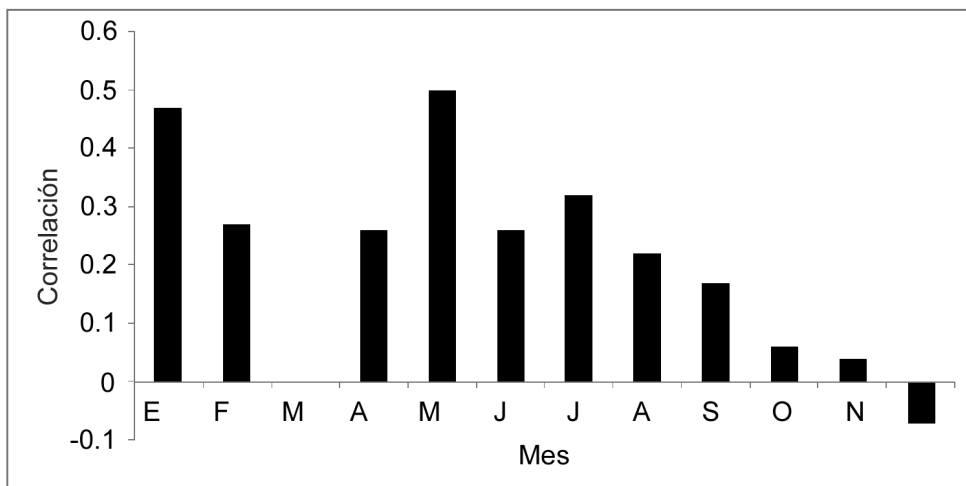


Figura 4. Correlación entre el índice de ancho de anillo de *Pinus cembroides* y la precipitación acumulada mensual del período común 1941 a 2001 para el sureste de Coahuila.

Al asociar los índices de anillo total con los datos de precipitación total acumulada enero - julio, período 1977 a 2000, se encontró una correlación significativa entre las dos variables ($r = 0.90$, $p < 0.0000$) (Figura 5, cuadros 2 y 3).

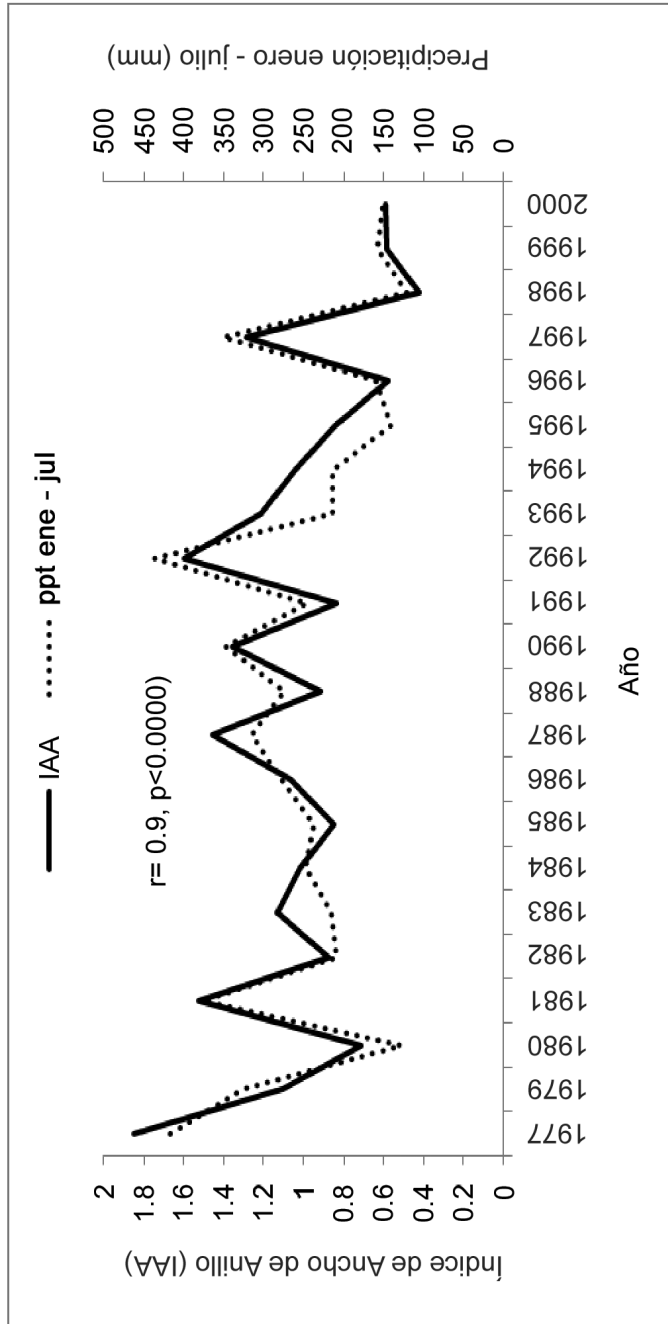


Figura 5. Calibración entre el Índice de ancho de anillo y la precipitación total acumulada de los meses enero-julio ($r = 0.9$) para el período de datos instrumentales 1977 al 2000.

Cuadro 2. Modelo de regresión para la variable dependiente (precipitación estacional invierno - primavera).

Periodo	R ²	Coeficientes	Error estándar	Prueba de "t" (20)	Probabilidad
1977-2000	0.8162	a 12.76	26.91	0.474	0.6404
		b 230.77	24.48	9.420	0.00000

Cuadro 3. Análisis de varianza para el modelo de reconstrucción estacional de precipitación.

Variables	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Prueba de "F"	Probabilidad
Regresión	151374.9	1	151374.9	88.84	0.0001
Residual	34077.4	20	1703.9		
Total	185452.3				

Las pruebas de calibración fueron significativas ($p < 0.05$), lo que sugiere, que el modelo de regresión obtenido para el período 1977- 2000 es estadísticamente válido, para desarrollar una estimación histórica de la precipitación estacional invierno - primavera, en la parte sureste del estado de Coahuila (Cuadro 4).

Cuadro 4. Pruebas estadísticas del proceso de calibración para el período de 1977-2000 (subrutina VERIFY).

Calibración	
Correlación ($p = 0.957$)	0.7577 *
Reducción del error	0.2764 *
T-valor	3.769 *
Prueba de signos	4/7 *
Primera diferencia	5/7 *

*Significativo ($p < 0.05$).

El modelo de regresión lineal simple con fines de reconstrucción fue el siguiente:

$$Y_t = 12.76 + 230.78 * X_t$$

Donde:

Y_t = Valor reconstruido de precipitación estacional para un año determinado

X_t = Índice de ancho de anillo (valor anual de la cronología estándar)

La correlación obtenida entre los datos de precipitación observados y reconstruidos indicaron un valor de 0.76 ($p < 0.001$), estadísticamente válido con fines de reconstrucción (Figura 6).

Al determinar que el modelo era confiable se procedió a generar la reconstrucción, en la extensión total de la cronología (1595 – 2004) (Figura 7).

Para analizar el efecto de ENSO se utilizó como estimativo el TRI del período 1895 - 1996. La correlación es derivada de la comparación entre la precipitación reconstruida y el TRI para subperíodos de 20 años, indicó que sólo el lapso más reciente (1975 – 1996) fue significativo ($p < 0.05$) (Figura 8).

Los resultados muestran que el fenómeno ENSO afecta con menor intensidad el noreste, en comparación con la región norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Magaña, 1999; Villanueva *et al.*, 2005, 2007), por lo que es probable, que otros fenómenos circulatorios, tengan una mayor influencia en definir las condiciones climáticas de precipitación dominantes para la época invierno - primavera en el sureste de Coahuila.

La comparación entre el Índice de Lluvia para Todo México (Englehart y Douglas, 2000) y la precipitación reconstruida del período 1941 a 1998 mostró una correlación de 0.52 ($p < 0.05$), lo que implica un comportamiento similar de la precipitación para gran parte de la República Mexicana. El análisis de la tendencia en la precipitación reconstruida para subperíodos de 50 años determinó sequías recurrentes en las décadas de 1750 a 1760, 1850 a 1860 y 1950 a 1960; condiciones de precipitación limitante que provocaron crisis agrícolas generalizadas y carestía de alimentos (Florescano, 1980). Períodos secos, intensos y de corta duración tuvieron lugar en los años de 1641 a 1646, 1662 a 1670, 1687 a 1694, 1730 a 1743, 1784 a 1794 y 1891 a 1896 y temporadas secas de mayor duración se presentaron en los años de 1595 a 1618, 1917 a 1934, 1945 a 1962 y de 1993 a 2004 (Cuadro 5).

En la precipitación reconstruida también se detectaron intervalos húmedos (1620 a 1639, 1647 a 1661, 1672 a 1685, 1766 a 1780, 1900 a 1916, 1966 a 1994); no obstante, la información documentada existente para describir el impacto en la

sociedad de dichos eventos es mínima, ya que la mayor atención prestada se ha centrado históricamente en el daño que produce la falta de agua, en esta región de por sí semiárida (Florescano, 1980). El período lluvioso de 1966 a 1994 es uno de los más extensos y se consigna también para Chihuahua (Díaz *et al.*, 2002); mientras que el de los años de 1649 a 1661, ocurrió simultáneamente en el noroeste, que abarca parte de Chihuahua y Sinaloa (Villanueva *et al.*, 2008; Villanueva *et al.*, 2009).

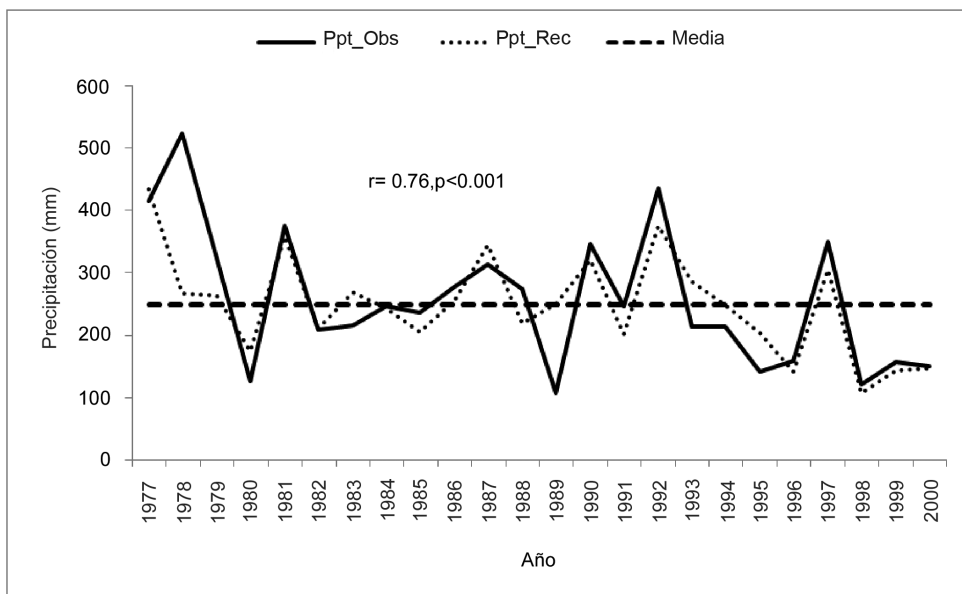


Figura 6. Relación entre datos de precipitación estacional observados y reconstruidos.

De los intervalos de tiempo secos, el período de 1784 a 1794, que incluye “El año del hambre”, registrado entre 1785 y 1786, estuvo acompañado por heladas severas y ocasionó carencia de granos básicos, epidemias en humanos y animales (García *et al.*, 2003; Florescano, 1980). Para la región de Saltillo, reconstrucciones de lluvia indican sequías severas en los mismos años, lo que evidencia la hipótesis de un fenómeno climático generalizado de impacto nacional (Pohl *et al.*, 2003; Cerano, 2004, Therrell *et al.*, 2006).

Otras sequías críticas de efectos similares a la anterior se presentaron de 1807 a 1812, 1819 a 1832, 1850 a 1857, 1860 a 1884, 1875 a 1910 (García *et al.*, 2003; Florescano, 1980). Por su trascendencia en el país y el efecto social y

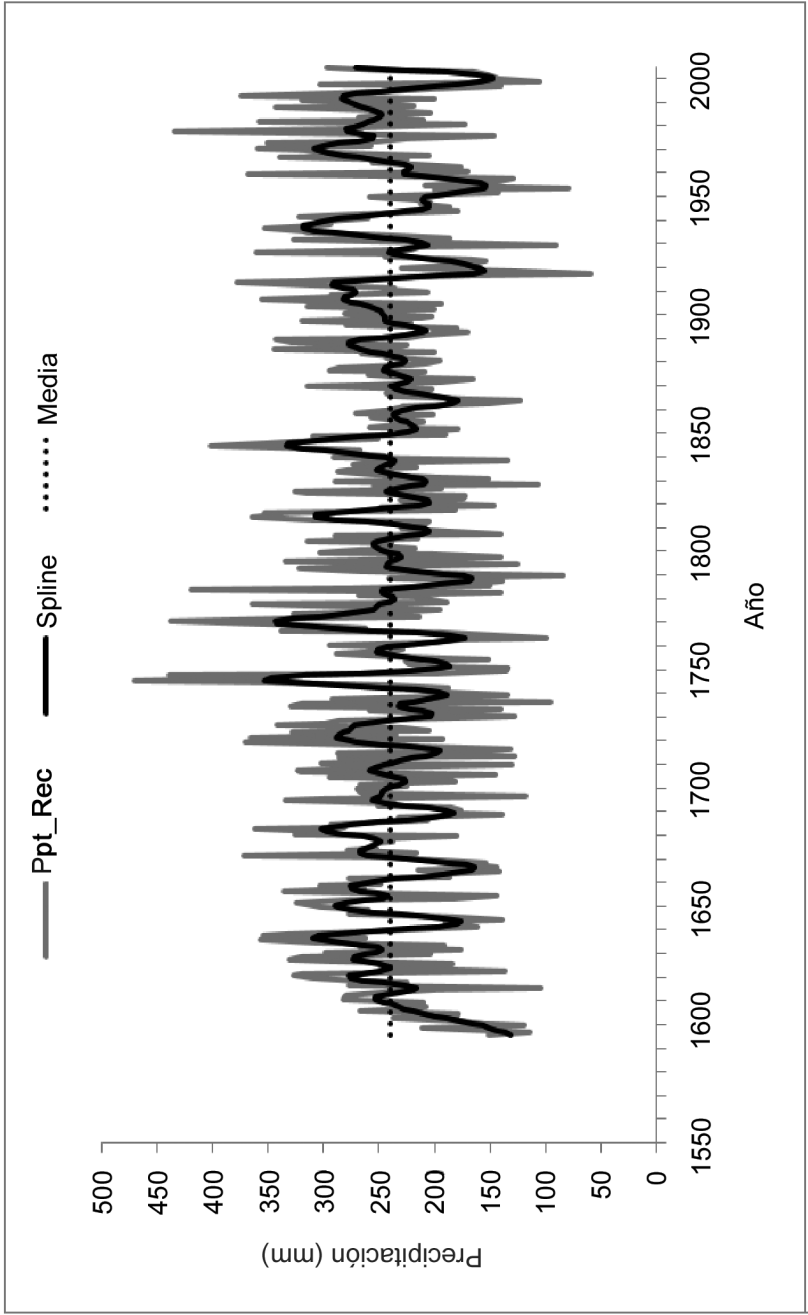


Figura 7. Reconstrucción de la precipitación estacional invierno - primavera (enero - julio) para el sureste de Coahuila, período 1595 - 2004.

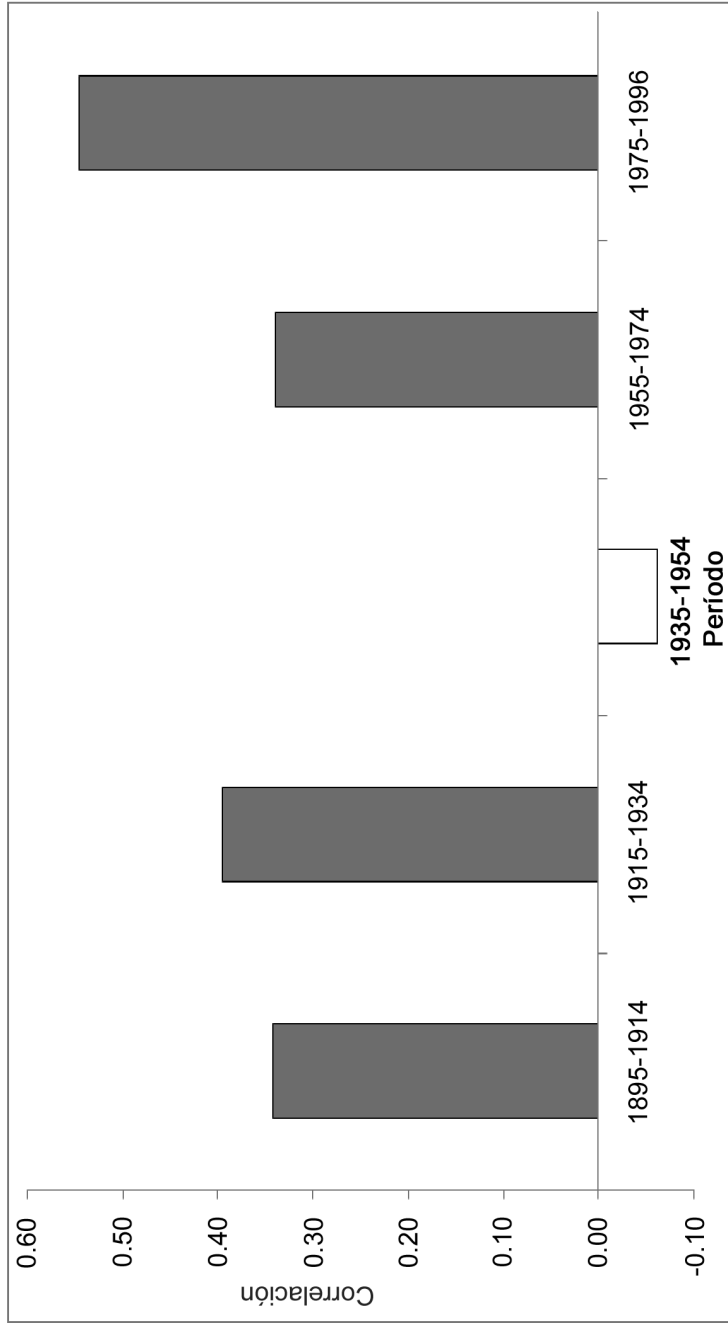


Figura 8. Correlación en subperíodos de 20 años entre la precipitación reconstruida y el TRI. Período 1895 a 1996.

económico, el período seco que tuvo lugar de 1945 a 1965 es considerado como el más crítico del siglo XX, ya que provocó hambruna generalizada y olas de emigración del campo a la ciudad, así como hacia los Estados Unidos de América (García *et al.*, 2003; Florescano, 1980; Sánchez *et al.*, 2008); el fenómeno por su intensidad y extensión se ha reportado en gran parte de la República Mexicana (Díaz *et al.*, 2001; 2002; Therrell *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Pohl *et al.*, 2003; Cerano, 2004; Therrell *et al.*, 2006; Villanueva *et al.*, 2009) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Datos históricos de sequías y sus consecuencias para el estado de Coahuila.

Períodos secos	Documentos históricos de impacto de sequías	
	Efectos sociales y económicos a nivel nacional	Años con sequía e impacto en Coahuila
1595-1618	Sequía	No existe información histórica documentada de su impacto social o económico
1641-1646	Sequía, falta de grano	Impacto en la producción de granos básicos
1662-1670	Sequía, falta de grano	Impacto en la producción de granos básicos, muerte de ganado
1687-1694	Crisis agrícola	1691- 1695, crisis agrícola
1702-1706; 1713-1716.	Sequías; carestía y falta de maíz	Falta de granos básicos
1730-1743	Falta de grano, hambruna, epidemias	1733, falta de maíz
1750-1756; 1759-1764	Falta de grano y epidemias	Monclova con escasez de grano en los años 1750, 1760, 1763 y 1764
1784-1794	Falta de maíz; epidemias en humanos y epizootias	Saltillo y Monclova registran sequía en años 1784, 1785, 1786, 1787, 1789, 1790 y 1793

continúa Cuadro 5...

continuación Cuadro 5...

Documentos históricos de impacto de sequías		
Períodos secos	Efectos sociales y económicos a nivel nacional	Años con sequía e impacto en Coahuila
1807-1812; 1819-1832	Crisis agrícolas	Prolongada sequía, período 1805-1810
1850-1857; 1860-1884	Falta de grano; mortandad en humanos y animales	Sequías en los años 1850, 1851, 1853, 1862, 1863, 1880, 1882 y 1884
1891-1896	Carestía y muerte.	Sequía de 1894 a 1896
1917-1934	Falto de grano, incendios forestales extensos	Sequías en los años 1921, 1922, 1923, 1924, 1925 y 1927
1945-1962	Carestía de grano, muerte de ganado	Sequía intensa en 1948, 1954, 1951, 1953, 1956, 1957 y de 1960 a 1964.
1993-2004	Sequía, incendios forestales	El período de 1993 a 1998 se caracterizó por una intensa sequía e incendios severos

CONCLUSIONES

Pinus cembroides mostró excelente potencial para estudios dendrocronológicos y su sensibilidad climática superó a la especie de referencia *Pseudotsuga menziesii*, con la ventaja adicional de ubicarse próximo a sitios cercanos a estaciones meteorológicas existentes. El crecimiento del pino piñonero respondió a la precipitación estacional invierno - primavera (enero - julio), lo que implica que patrones de circulación que afectan el clima en este período del año, tienen una fuerte influencia en su desarrollo.

La reconstrucción detectó eventos de baja frecuencia, como sequías periódicas cada 50 años, en las cuales se ubican las crisis agrícolas documentadas en todo el país, o bien sequías de gran magnitud e intensidad identificadas en reconstrucciones dendroclimáticas reportadas para el centro y norte de México, así como el sureste de los Estados Unidos de América. Estuvieron presentes sequías críticas que provocaron gran impacto social y económico en la región, como fueron

las de los periodos 1784-1794, 1807-1812, 1819-1832, 1850-1857, 1860-1884, 1891-1896 y 1945-1965. Así mismo, se presentaron periodos húmedos de 1620 a 1639, 1647 a 1641, 1672 a 1685, 1766 a 1780, 1900 a 1916 y de 1966 a 1994.

Al asociar la precipitación reconstruida con el Índice de Precipitación Tropical para Todo México, se obtuvo una correlación de 0.52 ($p < 0.05$). Por otra parte, la precipitación reconstruida con el TRI en subperiodos de 20 años, indicó alta variabilidad del impacto de El Niño y sólo el último subperiodo fue significativo; lo que implica que la influencia de dicho fenómeno en la precipitación del noreste de México ha sido variable y aparentemente, no afecta de manera significativa en la cantidad de precipitación que caracteriza a dicha región y solamente aquellos eventos de alta intensidad tienen impacto en la misma, por lo que posiblemente otros fenómenos atmosféricos como tormentas tropicales, huracanes y frentes fríos tengan una mayor relevancia en el clima del noreste de México.

AGRADECIMIENTOS

La investigación aquí descrita fue posible gracias al financiamiento otorgado por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático (IAI), a través del proyecto CRN # 2047 Documentación, Entendimiento y Proyección de los Cambios en el Ciclo Hidrológico en la Cordillera Americana, a su vez financiado por el US/Nacional Science Foundation (Grant GEO-0452325).

REFERENCIAS

- Cerano P., J. 2004. Reconstrucción de 350 años la precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. Tesis profesional. Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 152 p.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva D. and B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369 - 388.
- Cook, E. R. and K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-ring Bulletin* 47: 37 - 59.
- Cook, E. R. and R. H. Holmes. 1984. Program ARSTAN and users manual Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. Tucson, AZ. USA. 15 p.
- Cook, E. R. 1985. A time series analysis approach to tree ring Standardization. PhD. Dissertation. School of Renewable Natural Resources, University of Arizona. Tucson, AZ. USA. 171 p.

- De la Cruz L., J. 1984. Estudio dasonómico del bosque de coníferas de la Sierra de Zapalinamé. Tesis Profesional. Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 117 p.
- Díaz S., C., R. Touchan and T. W. Swetnam. 2001. A tree - ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, Mexico. *International Journal of Climatology* 21: 1007 - 1019.
- Díaz S., C., M. T. Therrell, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter - spring precipitation reconstructed from tree - rings. *Climate Research* 22: 237 - 244.
- Eguiluz P., T. 1978. Ensayo de la integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de Méx. México. 633 p.
- Englehart, P. J. and A. V. Douglas. 2000. Dissecting the macro-scale variations in Mexican maize yields. *Geographical and Environmental Modelling* 4: 65 - 81.
- Farjon, A., J. A. Pérez de la R. and B. T. Styles. 1997. A field guide to the pines of Mexico and Central America. The Royal Botanic Gardens. Kew Publishing House. London, UK. 147 p.
- Florescano E., M. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D. F. México. 158 p.
- Fritts, H. C. 1976. Tree rings and climate. Academic Press, Inc. New York, NY. USA. 565 p.
- García, E. 1978. Apuntes de climatología. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. México. 153 p.
- García, V., J. M. Pérez y A. Molina. 2003. Desastres agrícolas en México, catálogo histórico. Tomo I. Fondo de Cultura Económica. México, D. F. México. 506 p.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2000. Extractor Rápido de Información Climática (ERIC II). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor. México. s/p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1983. Síntesis Geográfica del Estado de Coahuila. Secretaría de Programación y Presupuesto. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. D. F. México. 163 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000a. Carta Topográfica Arteaga. G14 C34. Escala 1: 50, 000. México, D. F. México. s/p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000b. Carta Topográfica. General Cepeda G14 C33. Escala 1:50.000. México, D. F. México. s/p.

- Madrigal S., X. 1977. Características generales de la vegetación del Estado de Durango, México. *Revista Ciencia Forestal* 2(57): 19 - 77.
- Magaña R., V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez. 1999. El Niño y el Clima. *In*: V. Magaña Rueda (Ed.). Los impactos de El Niño en México. SEP-CONACYT. México, D. F. México. pp. 23 - 68.
- Martínez, M. 1948. Los pinos mexicanos. 2da. edición. Editorial Botas, S. A. México, D. F. México. 361 p.
- Marroquín S., J. y L. Arce. 1985. Las unidades fisonómico - florísticas del Cañón de San Lorenzo, Saltillo, Coahuila. *Biota* 10 (4): 369 - 393.
- Meko, D. C., W. Stockton and W. R. Boggess. 1996. The tree-ring record of severe sustained drought. *Water Resources* 31: 789 - 801.
- Perry, J. P. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press. Inc. Portland, OR. USA. 231 p.
- Pohl, K., M. D. Therrell, J. S. Blay, N. Ayotte, J. J. Cabrera, S. C. Díaz, E. H. Cornejo, J. A. Elvir, M. E. González, D. Opland, J. Park, G. Pederson S. S. Bernal, L. S. Vázquez, J. Villanueva-Díaz and D. W. Stahle. 2003. A cool season precipitation reconstruction for Saltillo, Mexico. *Tree-ring Research*. 59(1): 11 - 19.
- Portes V., L. 1996. Análisis de cambios de uso de suelo en la Sierra de Zapalinamé, Municipios de Arteaga y Saltillo, Coahuila. Tesis Profesional. Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila. México. 106 p.
- Robert, M. F. 1977. Notas sobre el estudio ecológico y fitogeográfico de los bosques de *Pinus cembroides* Zucc. en México. *Revista Ciencia Forestal* 2(10): 49 - 58.
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. LIMUSA. México, D. F. México. 432 p.
- Sánchez-Cohen I., W. Ojeda-Bustamante, G. Chebhouni, I. Orona-Castillo, J. Villanueva-Díaz, J. L. González-Barrios y G. González-Cervantes. 2008. Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos. *Ingeniería Hidráulica en México XXIII* (4): 5-24.
- Santillán H., M. 2008. Dendrocronología de diez poblaciones de *Pinus pinceana* Gordon de la Sierra Madre Oriental. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento Forestal. Buenavista, Saltillo, Coah. México. 120 p.
- Stahle, D. W., 1996. Tree rings and ancient forest relicts. *Arnoldia* 56 (4): 2 - 10.
- Stahle, D. W., P. D'Arrigo, J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. B. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Gay, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva-Díaz and L. G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79(10): 2137 - 2152.

- Stokes M., A. and T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press. Chicago, IL. USA. 73 p.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland and J. Villanueva. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research* 107(D14): 6-1 – 6-8.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, J. Villanueva, E. H. Cornejo and M. K. Cleaveland. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico 1474-2001. *Climatic Change* 74: 493 - 504.
- Villanueva D., J. y G. R. McPherson. 1999. Estudios dendroclimáticos en montañas del sureste de Estados Unidos de América y norte de México. *Rev. Cien. For. en Méx.* 4(86): 37 - 62.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland y B. H. Luckman. 2005. Capítulo I: Estudios paleoclimáticos en México utilizando anillos de crecimiento de especies arbóreas. *In: Contribución al Estudio de de los Servicios Ambientales. Libro Técnico Núm. 1 CIR- Pacífico Centro, INIFAP. Guadalajara, Jal. México.* pp. 7 - 32.
- Villanueva D., J., J. Cerano P, D. W. Stahle and B. H. Luckman. 2006. Reconstrucciones históricas de precipitación estacional en el noreste de México. INIFAP, CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. 44 p.
- Villanueva D., J., D. W Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano-Paredes, M. D. Therrell and M. K. Cleaveland. 2007. Winter-spring precipitation reconstruction from tree rings for northeast Mexico. *Climate Change* 83: 117 - 131.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D. W. Stahle, J. Estrada A. y V. Constante G. 2008. Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y reconstrucción de precipitación y flujo en México. Folleto Científico No. 23. INIFAP, CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. 49 p.
- Villanueva D., J., P. Z. Fulé, J. Cerano P., J. Estrada A. e I. Sánchez C. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Rev. Cien. For. en Méx.* 34 (105): 37 - 69.
- Wright, P. B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature* 277: 371 - 374.