



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.254>

Artículo

Reconstrucción de algunas sequías a través de anillos de crecimiento para el norte de México

Reconstruction of some droughts through growth rings for northern Mexico

Edgar Jesús Ortega Arroyo^{1*}, Javier Jiménez Pérez¹, José Villanueva Díaz², José Israel Yerena Yamallel¹ y Eduardo Alanís Rodríguez¹

Abstract:

The historical impact of droughts on the social and economic stability of settlements in northern Mexico demands a better understanding of high-end low-frequency climate variability, which impacts water availability and produces grain scarcity for human consumption. Dendroclimatic reconstructions can define historical extreme drought frequencies, intensity, duration, and trends. Douglas-fir ring width chronologies were involved in this study to reconstruct seasonal precipitation variability in three northern Mexico states. The developed tree-ring series extended 75 to 99 years long all of them with high interseries correlation (0.56 to 0.72). Winter-Spring rainfall reconstruction showed high short-and long-term variability. Severe droughts were detected for the periods 1919 to 1924, 1948 to 1963, 1969 to 1979, 1988 to 2001, and 2008 to 2014. Seasonal winter-spring precipitation was significantly influenced by warm ENSO events with correlations ranging from 0.40 to 0.41. The effect of this circulatory pattern impacted an extended area in northern Mexico given the distance between studies' sites greater than 500 km straight line. This study demonstrated the influence of the ENSO tele-connections in northern Mexico.

Key words: Correlation, ENSO, historical impacts of drought, proxy, dendroclimatic reconstruction, hydroclimatic variability

Resumen:

El impacto histórico de las sequías en la estabilidad social y económica de la población en el norte de México demanda de un mejor conocimiento de la variabilidad interanual y multianual del clima, que afecta particularmente la disponibilidad hídrica y, por ende, la producción de alimentos, así como para el propio consumo humano. De esta forma, los análisis dendroclimáticos pueden definir la frecuencia de estas sequías extremas, su comportamiento pasado y sus tendencias; por ello, se emplearon como proxy los anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii*, con el objetivo de analizar la variabilidad hidroclimática en tres estados del norte de México. Se desarrollaron tres series de tiempo dendrocronológicas de anillo total con una extensión de 75 a 99 años, que mostraron una intercorrelación entre series en un intervalo de 0.56 a 0.72. La reconstrucción de precipitación invierno-primavera indicó gran variabilidad interanual y decenal de los patrones de precipitación para las áreas de estudio. Sequías severas se reconstruyeron para los períodos (1919 a 1924, 1948 a 1963, 1969 a 1979, 1988 a 2001 y del 2008 al 2014). Al analizar la variabilidad de fenómenos de circulación general como El Niño Oscilación del Sur en las áreas de estudio se obtuvieron correlaciones positivas que variaron de 0.40 a 0.41, lo cual supone que, a pesar de la distancia entre sitios (mayor de 500 km en línea recta), fue posible identificar períodos de sequía comunes, los cuales demostraron los efectos que tiene la teleconexión de El Niño en la variabilidad hidroclimática para el norte de México.

Palabras clave: Correlación, ENSO, impacto histórico de sequías, proxy, reconstrucción dendroclimática, variabilidad hidroclimática.

Fecha de recepción/Reception date: 20 de marzo de 2018
Fecha de aceptación/Acceptance date: 28 de septiembre de 2018

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Correo-e: ortega.uanl@gmail.com

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (Cenid-RASPA). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agrícolas y Pecuarias. México.

Introducción

Conocer la dinámica climatológica del pasado es importante para determinar su variabilidad en el tiempo, tendencias y posible comportamiento venidero (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007). Los parámetros del clima y eventos climáticos extremos ocurridos en el pasado son difíciles de determinar mediante registros de estaciones climáticas, ya que generalmente no superan los 70 años de extensión y muestran serios problemas de calidad y ausencia de información, aun por varios años consecutivos (IMTA, 2009). Una forma para extender la información climática en el tiempo es mediante el uso de fuentes *proxy* o fuentes indirectas, una de ellas y de alta resolución, la constituyen los anillos de árboles, que fechados al año exacto de su formación pueden generar reconstrucciones paleoclimáticas con árboles vivos y muertos que superan los últimos 10 000 años (Bradley, 1999).

Las reconstrucciones dendroclimáticas desarrolladas para el norte de México se extienden por cerca de mil años e indican una influencia significativa en la variabilidad interanual y multianual de la precipitación invernal de la tele-conexión de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), con dominancia de períodos secos durante la fase fría de ENSO y condiciones húmedas, cuando domina la fase cálida (Cleaveland *et al.*, 2003; Méndez y Magaña, 2010; Villanueva *et al.*, 2014).

El impacto de la influencia de ENSO, sin embargo, no es uniforme en toda la región, debido al efecto fisiográfico que ejercen los sistemas montañosos como las sierras Madre Occidental y Oriental, condiciones que modifican y modulan la influencia de este y de otros fenómenos circulatorios, pero que en algunas zonas de Durango y Chihuahua pueden explicar más de 30 % de la variabilidad en la precipitación invierno-primavera (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2014; Díaz-Ramírez *et al.*, 2016).

La repercusión de las sequías a través de los años en la estabilidad social y económica de civilizaciones en México, hace necesario contar con un mejor conocimiento de la variabilidad interanual y multianual del clima, que afecta, particularmente, la disponibilidad hídrica para el consumo humano, así como para la producción de alimentos

(Endfield y Fernández, 2006). Los análisis dendroclimáticos pueden definir la frecuencia de estas sequías extremas, su comportamiento pasado y sus tendencias; tal información contribuye al desarrollo de estrategias de mitigación de eventos hidroclimáticos extremos y de larga duración que probablemente se presenten en años venideros.

La presente investigación se realizó en tres estados ubicados en el norte de México, donde el agua es un recurso limitado para las actividades humanas. Al respecto, es fundamental hacer una planeación adecuada de los recursos hídricos para mitigar problemas de disponibilidad a futuro, particularmente, si se considera la influencia del cambio climático en esa región, en la que se pronostican condiciones de mayor aridez (Seager *et al.*, 2009; IPCC, 2014).

Las reconstrucciones hidroclimáticas específicas en sitios que pueden proporcionar información para áreas aledañas, en especial para cuencas productoras de agua, como es el caso del presente estudio, enriquecen el conocimiento de la variabilidad del clima en la región centro-sur de Nuevo León, parte de Coahuila y occidente de Durango; tres zonas semiáridas en el norte de México que aportan agua para el desarrollo de actividades agropecuarias, agricultura de riego y consumo humano.

Por lo anterior, los objetivos de la presente investigación fueron: 1) analizar la influencia de variables climáticas en el incremento radial de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco; 2) generar reconstrucciones dendroclimáticas en los sitios de estudio; y 3) analizar el impacto de fenómenos atmosféricos de circulación general en la variabilidad interanual y multianual del clima en esa región, así como la frecuencia de eventos hidroclimáticos extremos.



Materiales y Métodos

Área de estudio

Las áreas de estudio (Figura 1) son las siguientes:

- 1) Cerro El Potosí (CPOT), ubicado a 3 670 msnm a 15 km del municipio Galeana, al sur del estado de Nuevo León ($24^{\circ}50'35''$ - $24^{\circ}53'16''$ latitud norte; $-100^{\circ}13'12''$, $-100^{\circ}15'12''$ longitud oeste). El sitio pertenece a la Sierra Madre Oriental, subprovincia de la Gran Sierra Plegada, en donde la precipitación media anual es de 400 a 600 mm y la temperatura media anual de 12°C a 18°C (García y González, 1991).
- 2) Paraje Puentecillas (PNT), el cual se localiza en la zona de Santa Bárbara, municipio Pueblo Nuevo, al sur del estado de Durango. Se ubica en los límites del ejido El Brillante, coordenadas $23^{\circ}39'$ latitud norte y $-105^{\circ}25'$ longitud oeste. Esta zona se considera la de mayor precipitación en el estado, pues recibe de 1 000 a 1 200 mm anuales. La temperatura media anual es de 12°C , la media más fría de 8°C y la más extrema de 22°C (Gordon, 1968; INEGI, 2005).
- 3) Sierra de Zapalinamé (SZAP), en las coordenadas geográficas $25^{\circ}15'00''$ - $25^{\circ}25'58.35''$ latitud norte y $-100^{\circ}47'14.5''$, $-101^{\circ}05'3.8''$ longitud oeste; sistema que forma parte de los municipios Saltillo y Arteaga, es aledaña a la ciudad de Saltillo. La temperatura media anual es de 18°C , y la precipitación media anual de 498 mm (Meganck *et al.*, 1981).

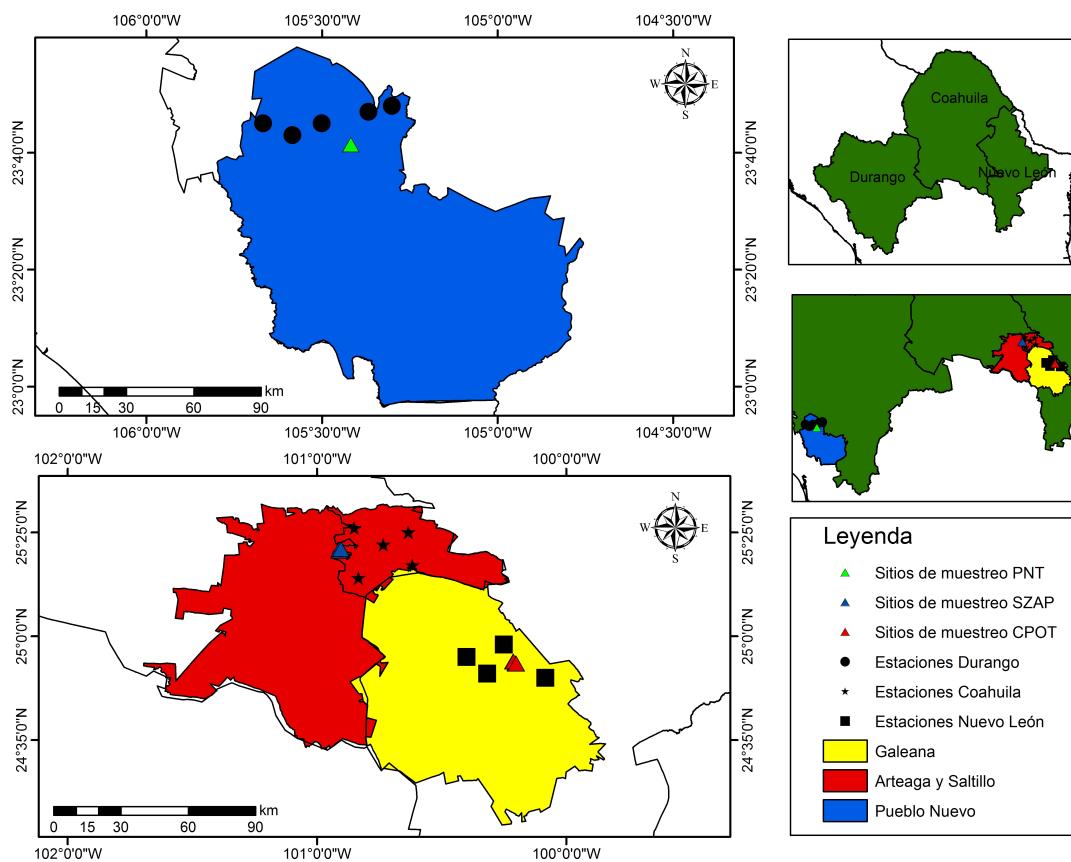


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el norte de México.

Trabajo de campo

El muestreo se realizó de manera selectiva con árboles ≥ 20 cm de DAP en un intervalo altitudinal de 2 500 a 3 100 m. Algunos criterios para la selección consistieron en que los especímenes tuvieran un fuste cilíndrico, de preferencia, para evitar problemas de liberación y compresión, arraigados a suelos someros y con aspecto longevo, lo cual se presume tiene más potencial para generar series dendrocronológicas lo más extenso posible y con alta sensibilidad climática (Constante, 2015). De cada árbol seleccionado se sacaron tres incrementos radiales o núcleos de crecimiento (virutas) con un taladro de Pressler marca Haglöf Sweden de 5 mm de grosor.

Trabajo de laboratorio

Las muestras se procesaron mediante técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968) en el Laboratorio de Dendrocronología del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (Cenid-RASPA, INIFAP) y en el Laboratorio de Captura de Carbono de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FCF-UANL).

Las muestras o virutas se montaron con pegamento en molduras de madera, sujetándolas con cinta adhesiva para evitar que se torcieran durante el secado y se distorsionaran los límites del crecimiento anual, por efectos de la pérdida de humedad. Posteriormente, se lijaron con diferentes grados de lijas (300 a 600) y se pulieron de forma manual para facilitar la observación de los anillos de crecimiento a través de un estereomicroscopio *Leica EZ4D* de alta resolución.

Se realizó un conteo de los crecimientos, mediante gráficos y se asignaron fechas tentativas a cada uno (prefechado). La medición de los anillos se hizo con el sistema de medición VELMEX de precisión 0.001 mm, con el software *MeasureJ2X* para *Windows* (Voortech, 2014). Los datos de la medición de los anillos de crecimiento se analizaron con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino, 2001), para verificar la calidad del fechado al correlacionar períodos de 50 años con traslape entre períodos de 25 años (Holmes, 1983).

Para la eliminación del ruido producido por efectos biológicos (edad) y geométricos (un fuste cada vez mayor), las series se normalizaron mediante el programa ARSTAN, con una doble estandarización, que incluyó, en primera instancia, una curva exponencial negativa y líneas rectas de regresión positiva o negativa (Cook, 1985). Los valores de dividir el valor de medición entre el valor resultante de la curva, se conoce como índices dendrocronológicos y muestran una media cercana a la unidad y varianza homogénea (Fritts, 1976).

Con el programa ARSTAN, se generaron tres versiones de la cronología: estándar, residual y Arstan; cada una de ellas se calculó de manera específica. Dichas series pueden ser

usadas con fines de reconstrucción climática, particularmente la cronología residual, en la que se ha eliminado la autocorrelación entre series (Cook, 1985).

Una vez obtenidas las cronologías para los tres sitios, se realizó un análisis de correlación con registros de precipitación de estaciones climáticas aledañas a cada sitio de estudio, con el fin de identificar una posible relación significativa entre ambas variables con fines de reconstrucción climática; así, se determina la presencia de eventos o periodos de sequía que impactarán el norte y otras regiones de México, para argumentar sobre las posibles causas de dicho comportamiento.

Para definir el período de lluvia que influye en el crecimiento de la especie, se utilizaron registros de estaciones climáticas cercanas a los sitios de colecta, las cuales se escogieron de la base de datos del Sistema Meteorológico Nacional, compilado en el programa Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2007). Se seleccionaron estaciones cercanas a las áreas de estudio, a fin de integrar una base de datos de precipitación media mensual a nivel regional. Las elegidas para el estado de Coahuila fueron: San Antonio de las Alazanas (SMN), San Antonio de las Alazanas (DGE), El Tunal, Jame y Saltillo; para Durango: La Peña, La Ciudad, El Salto 10093, El Salto 10025, Santa Bárbara 2 y Llano Grande; por último, para Nuevo León, se identificaron tres: 18 de marzo, Mimbres y Galeana.

Los datos considerados fueron la precipitación mensual del período 1954-1999 (46 años) para Coahuila, 1975-2004 (30 años) para Nuevo León y para Durango el período 1963-1985 (23 años) (Cuadro 1). Con dicha información, se realizó un análisis de correlación para detectar los meses o periodo estacional en el que se tenían relaciones significativas entre las series de tiempo dendrocronológicas y los datos climáticos instrumentales.

Cuadro 1. Estaciones climáticas empleadas para el estudio.

Estaciones climáticas						
Área	Nombre	Latitud N (grados)	Longitud W (grados)	Altitud (m)	Período (años)	% datos
Nuevo León	Pablillo, Galeana	24.917	-100.400	512	1975-2004	97.5
Coahuila	San A. de Alazanas (DGE)	25.267	-100.617	2170	1954-1999	86
Durango	La Peña, Pueblo Nuevo	23.550	-105.400	2670	1963-1985	96.4

Para la generación de la reconstrucción total del período por sitio, se hizo un análisis de regresión lineal entre las cronologías estándar de anillo total y en la longitud total de los datos climáticos disponibles. Debido a la corta extensión de los registros de precipitación, solo se realizó el proceso de calibración para generar la ecuación de reconstrucción. El proceso de verificación se hizo en los datos reconstruidos con información de reconstrucciones dendroclimáticas disponibles realizadas previamente, para cada uno de los sitios de estudio; así como, con registros de documentos históricos de producción de alimentos, problemas de epidemias en humanos y conflictos sociales (Endfield y Fernández, 2006); además de índices reconstruidos de sequía para México (Stahle et al., 2016).

A las reconstrucciones de precipitación, se les ajustó una curva flexible (*spline*) con una rigidez de 67 %, la cual conserva 50 % de la varianza, esta curva se suavizó a nivel década para resaltar eventos multianuales de escasez de agua relacionados con sequías presentes en la reconstrucción.

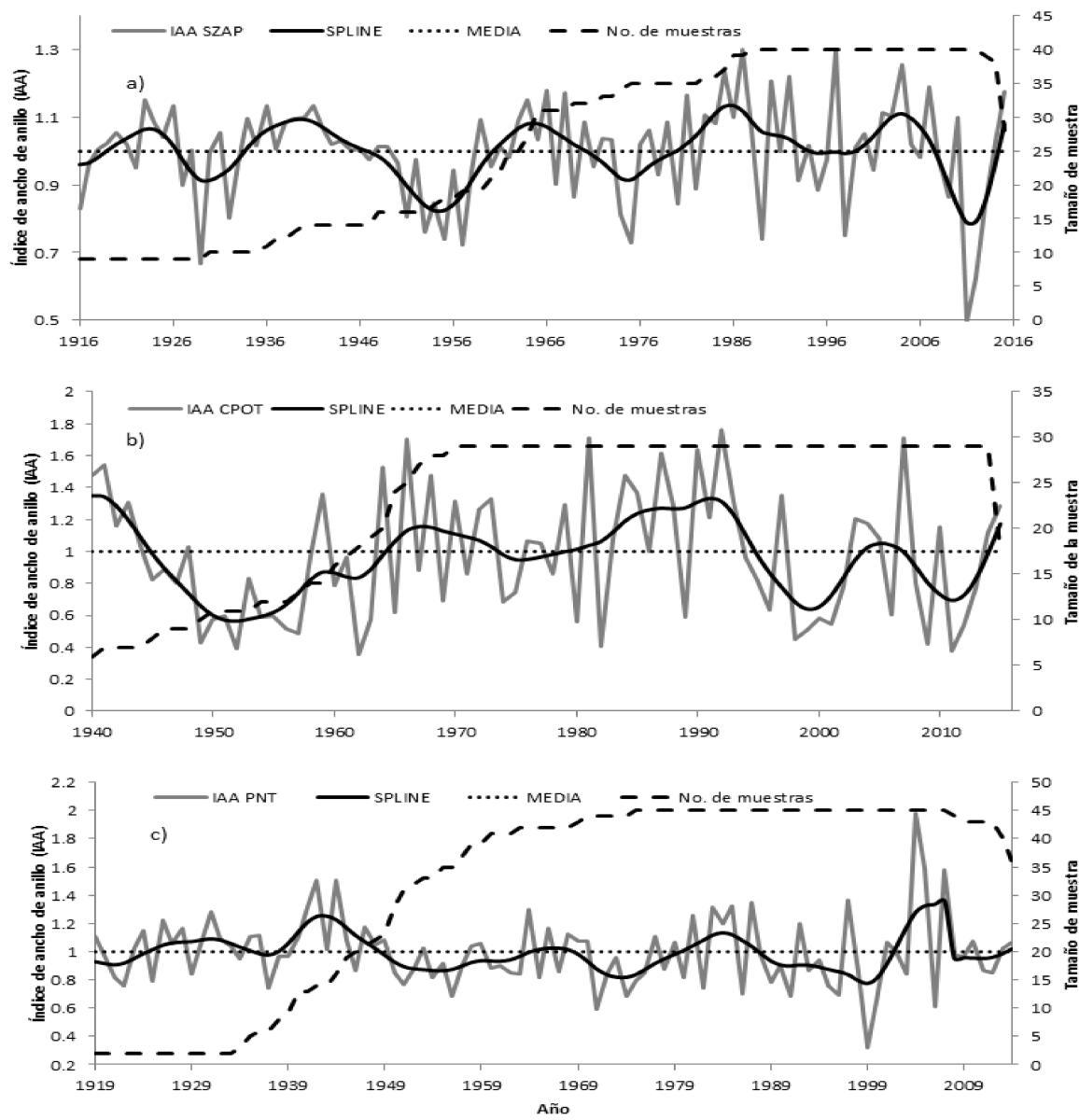
De igual manera, se correlacionaron los datos de la cronología general con el Índice de Oscilación del Sur (SOI, por sus siglas en inglés) (NOAA, 2016), ya que este fenómeno tiene un alto impacto en la variabilidad climática en el norte de México (Díaz et al., 2002; Cleaveland et al., 2003), y con una reconstrucción de 1 100 años de índices anuales normalizados del fenómeno ENSO (Li et al., 2011; KNMI, 2017).

Resultados y Discusión

Se fechó un total de 114 series de crecimiento, extraídas de árboles vivos de *Pseudotsuga menziesii* (29 para CPOT, 45 para PNT y 40 para SZAP). Los resultados de COFECHA indicaron una intercorrelación entre series de 0.72 para CPOT; el resultado es satisfactorio, particularmente, si se compara con series dendrocronológicas de la especie generadas en otras montañas del norte y noreste de México, que señalan valores de intercorrelación entre series de 0.75 (Canizales, 2011; Villanueva *et al.*, 2010). Para el área de SZAP se obtuvo una intercorrelación entre series de 0.70, registro similar a los valores de 0.71 y 0.72 citados por Villanueva *et al.* (2009).

Para PNT, la intercorrelación entre series fue de 0.56, valor inferior al documentado por Cerano *et al.* (2012) de 0.70, a pesar de haberse observado fluctuaciones en este parámetro originados por variaciones en el crecimiento. De cualquier manera, el valor de intercorrelación entre series fue superior al señalado por Holmes (1986), que es de 0.32 ($p<0.01$) para considerar las series dendrocronológicas perfectamente fechadas.

Respecto a los períodos en que se tiene un tamaño de muestra estadísticamente bueno con fines de reconstrucción, mejor conocido como Señal Expresada de la Población (EPS, por sus siglas en inglés), el período confiable para el sitio PNT es de 1919 a 2014 (profundidad de muestra de nueve núcleos); para SZAP, de 1916 a 2015 (>6 núcleos) y de 1940 a 2015 (>5 núcleos) para CPOT (Figura 2).



La línea horizontal punteada se refiere a la media de las cronologías (valor alrededor de 1.0); la línea continua en color gris oscuro representa el valor del índice anual de las cronologías; la línea flexible en color oscuro es el *spline* o línea flexible decadal y la línea continua quebrada es el tamaño de muestra involucrado en la obtención de cada índice anual.

Figura 2. Cronologías estándar de anillo total para los sitios SZAP (a), CPOT (b) y PNT (c).

Función de respuesta

Con base en la asociación entre los índices de crecimiento de anillo total y para los datos de precipitación acumulada mensual previo y durante la estación de crecimiento para cada uno de los sitios, se determinó que el período de lluvia que incide de manera significativa ($p<0.05$) en el crecimiento de la especie corresponde al de invierno-primavera, que involucra la precipitación acumulada de enero-mayo para PNT y SZAP; para CPOT la mayor correlación se obtuvo para el lapso estacional enero-julio; es decir, su crecimiento está influenciado por la precipitación que ocurre en la época fría del año; mientras que el impacto de la lluvia de verano parece ser mínimo.

En el presente estudio no se analizó la relación entre la madera y la precipitación de verano, que pudiera tener mayor efecto en la formación de esta banda de crecimiento. La lluvia correspondiente al periodo invierno-primavera, se caracteriza por ser de baja intensidad y larga duración; lo que le permite no rebasar la tasa de infiltración y ser retenida en la matriz del suelo, por lo que está disponible al inicio y durante las primeras etapas de crecimiento y formación de madera temprana. En las áreas de estudio, la precipitación del intervalo invierno-primavera constituye alrededor de 50 % del total anual (Figura 3).

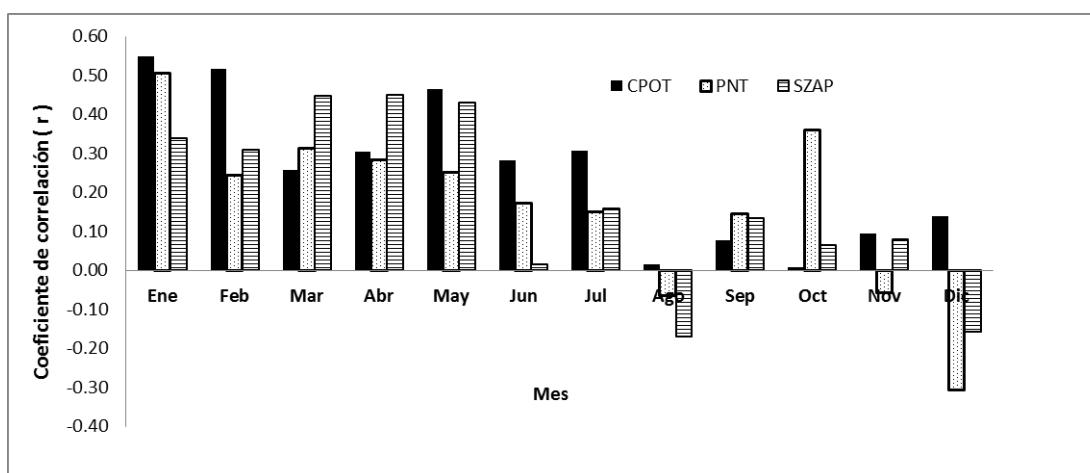
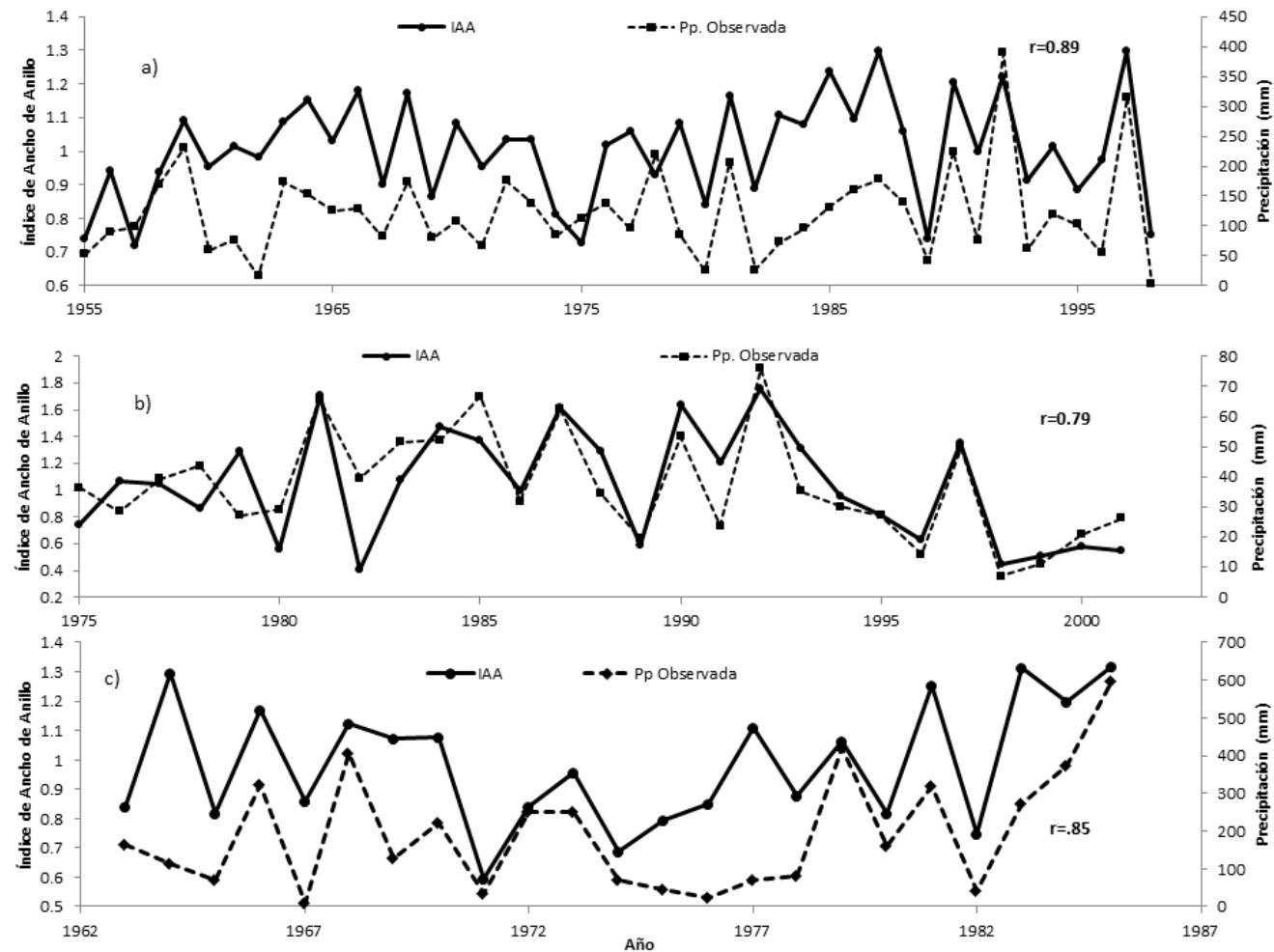


Figura 3. Coeficiente de correlación entre el índice de ancho de anillo de *Pseudotsuga menziesii* en las áreas de estudio con la precipitación mensual obtenida de estaciones climáticas cercanas a los sitios de estudio.

Una respuesta de las coníferas a la precipitación invierno-primavera, se ha descrito con anterioridad para la Sierra de Arteaga, el Cerro El Potosí (Villanueva *et al.*, 2010), y para La Cuenca del río El Presidio (Díaz-Ramírez *et al.*, 2016), donde para diferentes períodos estacionales de precipitación se describen correlaciones positivas con el crecimiento de madera temprana; es decir, enero-abril, enero-mayo y enero-agosto; aunque en la investigación que aquí se documenta, únicamente se midió el ancho total del anillo, los resultados son similares. Por otra parte, para los sitios PNT y SZAP difieren de lo registrado por Constante *et al.* (2009) y Cerano *et al.* (2012), quienes realizaron una reconstrucción de la precipitación para la parte alta de la cuenca del río Nazas en Durango y para el sureste de Coahuila, en la que establecieron una asociación positiva entre el índice de ancho de anillo y la precipitación mensual acumulada de diciembre del año previo y enero del año actual de crecimiento. En este estudio, al correlacionar el índice de ancho de anillo total y la precipitación acumulada, se obtuvieron coeficientes negativos para el mes de diciembre, no obstante que PNT mostró coeficientes negativos para noviembre, no así para SZAP.

Reconstrucción de la precipitación

La correlación entre los datos de precipitación invierno-primavera observados y los índices dendrocronológicos de la versión estándar indicaron un valor de 0.79 para CPOT ($n=27$, $p<0.001$), 0.89 para SZAP ($n=44$, $p<0.001$) y 0.85 para PNT ($n=23$, $p<0.001$); estos valores son indicativos de la alta asociación que tienen ambas variables y estadísticamente indican un buen potencial para generar un modelo de regresión con fines de reconstrucción de precipitación en la longitud de la cronología, con un $\text{EPS}>0.85$ (Figura 4).



El gráfico superior (a) corresponde al sitio SZAP (período 1954-1999), el de en medio (b) corresponde a CPOT (período 1975-2004) y el inferior (c) a PNT (período 1963-1985).

Figura 4. Comportamiento de los datos reconstruidos vs índices de anillo total en su versión estándar para cada uno de los sitios de estudio.

Los modelos utilizados para la reconstrucción incluyeron los registros de precipitación de los períodos de 1975-2004 para CPOT, de 1963-1985 para PNT y de 1954-1999 para SZAP. Para CPOT, se obtuvo un $r = 0.79$ ($r^2 = 0.62$, $p < 0.0001$) entre los registros de precipitación y los índices de anillo. PNT presentó un $r = 0.85$ ($r^2 = 0.72$, $p < 0.0001$) y por último SZAP, $r = 0.89$ ($r^2 = 0.79$, $p < 0.0001$). Las tres series explican al menos 60 % de la variación en la cantidad de lluvia que ocurre en el período estacional

invierno-primavera. Los modelos de regresión para los lapsos antes mencionados se consideraron válidos, en términos estadísticos con fines de reconstrucción (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estadísticos de la regresión.

	CPOT	PNT	SZAP
Correlación de Pearson	0.79	0.85	0.89
R ²	0.62	0.72	0.79
R ² ajustado	0.61	0.68	0.77
Error típico	55.29	134.15	66.48
Observaciones	27	23	44

Los modelos de regresión lineal utilizados fueron los siguientes:

$$Y_i = 167.57 + 12.908 * X_i \quad (\text{CPOT})$$

$$Y_i = 506.27 - 308.01 * X_i \quad (\text{PNT})$$

$$Y_i = 331 - 211.99 * X_i \quad (\text{SZAP})$$

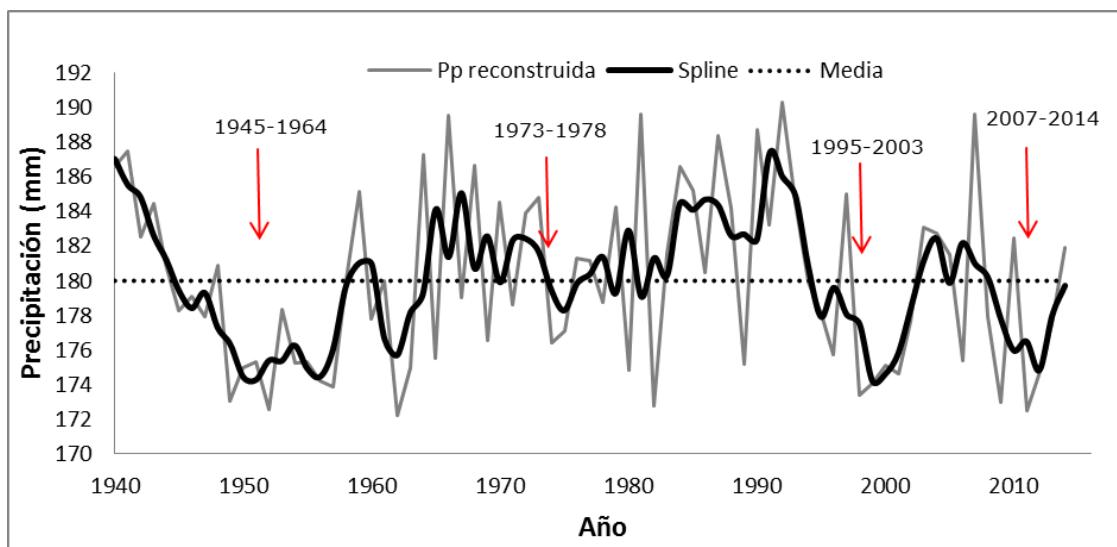
Donde:

Y_i = Valor de la precipitación reconstruida (mm) para un año específico

X_i = Índice estandarizado de ancho de anillo

Detección de períodos secos

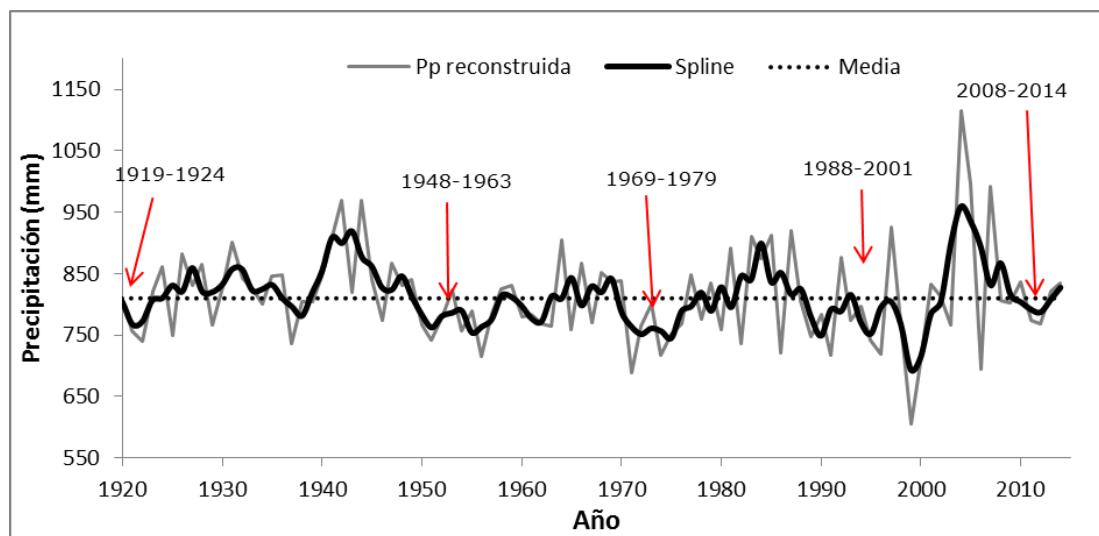
Al aplicar los modelos lineales se generaron los datos reconstruidos en la extensión de las cronologías con EPS >0.85. Los datos para el sitio CPOT cubren el lapso 1940-2015 (75 años) (Figura 5), cuando se detectaron períodos de sequía importantes, como los de 1945-1964, 1973-1978, 1995-2003 y 2007-2014. Estos resultados son coinciden con los de Arreola-Ortiz *et al.* (2010) y de Canizales (2011). También, se detectaron etapas de sequía de 1993 a 1998 y de 2008 a 2014, correspondientes al efecto de El Niño. En el lapso de 1945 a 1964 se registró una de las sequías más severas ocurridas en el norte y centro de México (Díaz-Ramírez *et al.*, 2016), y que, como consecuencia, propició un grave desempleo en gran parte del territorio, razón por la cual se inició la migración masiva o “bracerismo” hacia los Estados Unidos de América (Florescano *et al.*, 1995).



La línea punteada se refiere a la precipitación media en el área, la de color gris indica la precipitación reconstruida para el período total de la cronología y, por último en color negro resalta los períodos de sequía a nivel década detectados en la reconstrucción.

Figura 5. Identificación de eventos secos para CPOT.

En cuanto al sitio PNT (Figura 6), la etapa reconstruida 1919-2014 (95 años) señala períodos de sequía importantes, como los ocurridos de 1919 a 1924, de 1948 a 1963, de 1969 a 1979, de 1988 a 2001 y de 2008 a 2014. Intervalos que coinciden con los considerados por Díaz-Ramírez *et al.* (2016) para la región hidrológica Presidio-San Pedro, en donde los autores indican la presencia de escasez de agua intensa en las décadas de 1920, 1950 y 1990. De 1982 a 1983 tuvo lugar un evento intenso de ENSO, que provocó sequías para casi todo el país (Magaña *et al.*, 1999), efecto también detectado en esta reconstrucción. Periodos similares, los han consignado Cerano *et al.* (2012) para el norte de México.

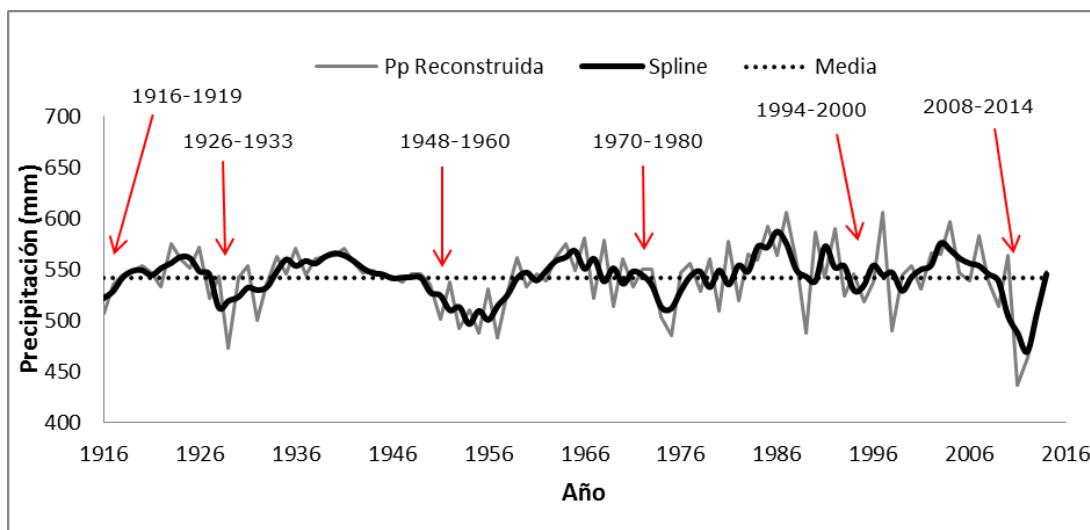


La línea punteada se refiere a la precipitación media en el área, la de color gris indica la precipitación reconstruida para el período total de la cronología y, por último en color negro resalta los períodos de sequía a nivel década detectados en la reconstrucción.

Figura 6. Identificación de eventos secos para el sitio PNT.

Por último, para SZAP (Figura 7) la reconstrucción se extiende de 1916 a 2015 (99 años), y en ella coinciden las etapas secas detectadas en las reconstrucciones previas; es decir, 1916-1919, 1926-1933, 1948-1960, 1970-1980, 1994-2000 y 2008 a 2014. Períodos que han sido abordados por Villanueva *et al.* (2011), con lo que se corrobora

que una de las más importantes sequías registrada en el norte de México sucedió en de 1950–1965 a consecuencia de un evento intenso de ENSO, y se le considera la más intensa del siglo XX (Stahle *et al.*, 2011); porque causó severos daños socioeconómicos, no sólo a la población de Durango, sino también a estados aledaños como Chihuahua y Coahuila (Magaña *et al.*, 1999).

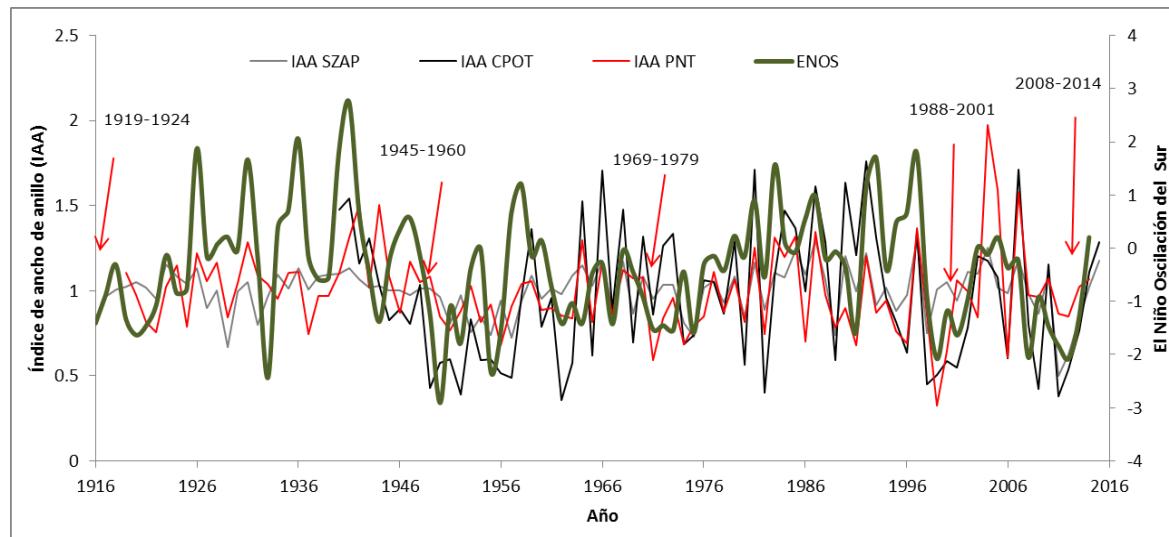


La línea punteada se refiere a la precipitación media en el área, la de color gris indica la precipitación reconstruida para el período total de la cronología y por último, la línea suavizada flexible en color negro resalta los períodos de sequía a nivel década detectados en la reconstrucción.

Figura 6. Eventos de sequía para el sitio SZAP.

Correlación con ENSO

ENSO es uno de los fenómenos circulatorios con mayor influencia en el comportamiento de la variabilidad climática del norte de México (Méndez y Magaña, 2010; Stahle *et al.*, 2016). En este estudio se determinó una relación positiva entre los índices de ENSO (KNMI, 2017) y el crecimiento de los árboles, en la que las correlaciones observadas estuvieron entre 0.41 y 0.44 (Figura 8).



La línea gris corresponde a la cronología generada para el sitio SZAP, mientras que la de color negro corresponde a la cronología de CPOT, y en rojo la de PNT. La intensidad de los índices de ENSO se indica en una línea suavizada de color verde militar.

Figura 7. Periodos de sequía influenciados por ENSO en el norte de México.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2014), a partir de 1960 los fenómenos atmosféricos a nivel mundial estuvieron más relacionados con el crecimiento de las masas forestales en el ámbito local; de igual manera, los períodos de sequía registrados en la presente investigación, se relacionan con la tele-conexión de ENSO, la cual es significativa en el norte y centro de México; por ejemplo, las sequías más notorias ocurridas en los períodos 1945-1960, 1969-1979, 1998 y 2011, se relacionan con la influencia de dicho fenómeno.

Conclusiones

Aunque las cronologías de anillo total se extendieron en un intervalo de 75 a 99 años, su longitud no fue limitante para reconstruir algunos de los episodios secos más intensos ocurridos durante el siglo XX y la primera década del siglo XXI. Estas reconstrucciones corroboran a las sequías con datos reconstruidos e instrumentales que indican su carácter regional y que, por su amplitud e intensidad, afectaron de

manera severa las condiciones sociales y económica de los asentamientos humanos en el norte de México, que sufrieron hambrunas generalizadas, y con ello, el inicio de la migración masiva a centros urbanos y hacia los Estados Unidos de América. Esas sequías, por su carácter regional, son provocadas por fenómenos climáticos de amplio alcance, uno de ellos es ENSO, que a través de sus tele-conexiones afecta los sitios estudiados de manera significativa.

El área de impacto en la que inciden los fenómenos circulatorios tiene repercusiones serias en la estabilidad social y económica de las poblaciones que habitan dichas regiones; de esta manera, conocer la frecuencia histórica de esos fenómenos, su intensidad y duración permite tomar medidas preventivas con fines de mitigación ante eventos climáticos similares determinados en las reconstrucciones y que no están presentes en los registros instrumentales, lo cual es crucial para la toma de decisiones.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Conacyt el financiamiento otorgado al primer autor para estudiar en el programa de Maestría en Ciencias Forestales en la FCF-UANL; al personal del INIFAP Cenid-RASPA, por el apoyo otorgado para hacer el análisis y el procesamiento de los datos; al personal de la Reserva Natural Estatal Sierra de Zapalinamé y al Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, por las facilidades brindadas para realizar el trabajo en campo.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Edgar Jesús Ortega Arroyo: trabajo de campo, análisis estadístico y elaboración del manuscrito; Javier Jiménez Pérez: revisión del manuscrito y coordinación de las revisiones; José Villanueva Díaz: revisión del manuscrito y análisis estadístico; José Israel Yerena Yamallel: revisión del manuscrito y análisis estadístico; Eduardo Alanís Rodríguez: revisión del manuscrito.

Referencias

- Arreola-Ortiz, Ma. R., M. González-Elizondo y J. J. Návar-Cháidez. 2010. Dendrocronología de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco de la Sierra Madre Oriental en Nuevo León, México. *Madera y Bosques* 16(1): 71-84.
- Bradley, R. S. 1999. *Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary.* Academic Press Ltd. London, UK. 614 p.
- Canizales V., P. A. 2011. Análisis dendroclimático y estimación del contenido de carbono como indicadores de cambio climático en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Cerro el Potosí, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL., México. 59 p.
http://eprints.uanl.mx/view/creators/Canizales_Vel=E1zquez=3APamela_Anabel=3A=3A.html (17 de octubre de 2015).
- Cerano P., J., J. Villanueva D., R. Valdez C., V. Constante G., J. González B. y J. Estrada Á. 2012. Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(10): 1-17.
<http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v3n10/v3n10a2.pdf> (4 de abril de 2016).
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva D. and B. T Burns. 2003. Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climate Change* 59:369-388.

Constante G., V. 2015. Aplicación de técnicas dendrocronológicas en *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Quercus canbyi* Trel. para analizar la influencia climática y el cambio de uso de suelo. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales.

Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, NL., México. 123 p.

Constante G., V., J. Villanueva D., J. Cerano P., E. Cornejo O. y S. Valencia M. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. Revista Ciencia Forestal en México 34(106): 17-39.

Cook, E. 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. Lamont-Doherty Geological Observatory. University of Arizona.
<https://repository.arizona.edu/handle/10150/188110> (2 de diciembre de 2015).

Díaz, S. C., M. D. Therrell, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. Climate Research 22:237-244.

Díaz-Ramírez, B., J. Villanueva-Díaz y J. Cerano-Paredes. 2016. Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. Madera y Bosques 22(1): 111-123.

Endfield, G. H. and I. Fernández T. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. Climate Change 75:391-419. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-006-3492-7> (26 de octubre de 2015).

Florescano, E., S. Swan, M. Menegus y E. Galindo. 1995. Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana. Biblioteca Universidad Veracruzana. México, D. F., México. 246 p.

Fritts, H. C. 1976. Tree rings and climate. London Academic Press. New York, NY, USA. 565 p.

García, A. y S. González. 1991. Flora y vegetación de la cima del Cerro El Potosí,

Nuevo León, México. Acta Botánica Mexicana 13: 53-74.

Gordon, A. G. 1968. Ecology of *Picea chihuahuana* Martínez. Ecology 49: 880-896.

Grissino M., H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. Tree-Ring Research 57: 205–221.

<http://hdl.handle.net/10150/251654> (3 de enero de 2016).

Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin 43:69-78.

Holmes, R. L. 1986. Guide for computer program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. Tucson, AZ USA. 50 p.

<https://www.ltrr.arizona.edu/pub/dpl-mac/68k/dpl.txt> (10 de diciembre de 2015).

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2007. Extractor Rápido de Información Climatológica, versión 3 (ERIC III). CD. s/p.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC), Software. Jiutepec, Mor., México. s/p.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2005. Anuario estadístico Durango. Aguascalientes, Ags. México.

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usosuelo/> (16 de octubre de 2015).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad–Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al V Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza, 34 p.

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (KNMI). 2017. El Niño South Oscillation ENSO. https://climexp.knmi.nl/data/ienso_li.dat (23 de mayo de 2017).

Li, J. Xie, S. P, Cook E. R, Huang, G., D 'Arrigo R., Liu, F., Ma, J., Zheng, X. 2011. Interdecadal Modulation of El Niño Amplitude During the Past Millennium. Climate Change. pp. 1-12. <http://doi:10.1038/nclimate1086> (23 de mayo de 2017).

Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez. 1999. Los impactos del Niño en México. Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D. F. México. 229p.

Meganck, R. A., J. L. Carrera, F. C. Rodríguez y V. C. Serrato. 1981. Plan de manejo para el uso múltiple del cañón de San Lorenzo. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Organización de los Estados Americanos (OEA). Saltillo, Coah., México. 129p.

Méndez, M. y V. Magaña. 2010. Regional aspects of prolonged meteorological droughts over México and Central America. *In:* Special US Claver Drought Collection, American Meteorological Society, 23, pp.1175-1188.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2016. Southern Oscillation Index SOI. https://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/SOI/ (26 de enero de 2016).

Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Nike, J. Nakumara and D. K. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22(1):1-31.

Stahle, D. W., J. Villanueva D., D. J. Burnette, J. Cerano P., R. R. Heim Jr., F. K. Fye, R. Acuna S., M. D. Therrell, M. K. Cleaveland and D. K. Stahle. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*. 38, L05703. <https://doi.org/10.1029/2010GL046472> (17 de junio de 2017).

Stahle, D. W., E. R. Cook, D. J. Burnette, J. Villanueva, J. Cerano, J. N. Burns, D. Griffin, B. I. Cook, R. Acuña, M. C. A. Torbenson, P. Szejner and I. M. Howard. 2016. The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews* 149:34-60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018> (6 de junio de 2017).

Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. The University of Chicago Press. Chicago, IL, USA. 73.

- Villanueva D., J., J. Cerano P., V. Constante G., P. Z. Fulé y E. Cornejo O. 2009. Variabilidad hidroclimática histórica de la Sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques* 15(3): 45-64.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D. W. Stahle, V. Constante G., L. Vázquez S., J. Estrada Á. y J. D. Benavides S. 2010. Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2): 7-29.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., V. Constante G., D. W. Stahle, J. Estrada Á. y M. M. Tostado P. 2011. Variabilidad hidroclimática histórica del Norte de México inferida con anillos de crecimiento de douglas-fir. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Publicación especial 2:* 221-334.
- Villanueva D., J., J. Cerano-Paredes, J. Estrada Á., V. Constante G. and D. W. Stahle. 2014. Reconstruction of historical runoff in the upper Nazas river watershed, Durango. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 13(1) 21-25.
<http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsz.2012.06.036> (19 de marzo de 2016).
- Villanueva-Díaz, J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano-Paredes, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland and E. Cornejo-Oviedo. 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83: 117–131.
<http://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>.
- Voortech.com. 2014. MeasureJ2X measurement software.
www.voortech.com/projectj2x/docs/userGuide.htm (3 de diciembre de 2015).