



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.873>

Artículo

Reconstrucción dendrohidrológica de escurrimientos en la subregión hidrológica Coahuayana, estado de Jalisco

Dendrohydrological reconstruction of streamflow on the Coahuayana hydrological sub-basin, Jalisco State

José Villanueva Díaz^{1*}, Aldo R. Martínez Sifuentes¹, Ernesto A. Rubio Camacho², Álvaro Chávez Durán², Juan de Dios Benavides Solorio², Julián Cerano Paredes¹ y Juan Estrada Ávalos¹

Abstract

A dendrochronological network of conifers was developed for the *Armeria-Coahuayana* basin in southern *Jalisco*. A principal component analysis showed a common climatic response among the chronologies, therefore, they were integrated into regional representative chronologies of earlywood, latewood and total ring width with a length of 215 years (1800-2014), where the confident period for hydroclimate reconstruction extended from 1860 to 2014. The earlywood chronology had a significant association ($r = 0.70$, $p < 0.01$, 1952-2005) with the seasonal January-June gauged records of the *Quito* gage station located in the *Coahuayana* sub-hydrological region, *Jalisco*, and a streamflow model was developed for reconstruction purposes. The streamflow reconstruction showed high- and low frequency variability, where the extreme 1869-1876 drought could occur in coming years in order to take mitigation actions. The winter-spring streamflow in the *Quito* watershed is significantly influenced by the *El Niño* Southern Oscillation as corroborated by its association with the January-June SOI index ($r = -0.47$, $p < 0.01$, 1952-2014). Its influence is verified with the significant peak (3.21) detected in a power spectral analysis for the earlywood-chronology. Circulatory phenomena as the Pacific Decadal Oscillation showed a significant but comparatively lower association ($r = 0.38$, $p < 0.01$) and the Atlantic Multidecadal Oscillation was not significant.

Key words: Conifers, dendrohydrology, *El Niño* Southern Oscillation, earlywood, Hydrological Region 16, droughts.

Resumen

Se desarrolló una red dendrocronológica de coníferas para la región hidrológica Armería-Coahuayana en el sur de Jalisco. El análisis de componentes principales determinó que las cronologías poseen una respuesta climática común y se integraron en una cronología regional de madera temprana, tardía y anillo total con una longitud de 215 años (1800-2014) y un periodo estadísticamente confiable de 1860 a 2014, con fines de reconstrucción hidroclimática. La cronología regional de madera temprana mostró una respuesta significativa con los registros del gasto acumulado enero-junio ($r = 0.70$, $p < 0.01$, 1952-2005) de la estación hidrométrica Quito, subregión hidrológica Coahuayana, Jalisco. Esta se utilizó para desarrollar una reconstrucción de flujo, la cual presentó alta variabilidad interanual y multianual de escurrimientos, en la que la sequía más extrema (1869 a 1876) puede considerarse como un período de escurrimientos con posibilidad de ocurrir en el futuro e implementar acciones de mitigación. La precipitación invierno-primavera y por ende los escurrimientos en la cuenca Quito evidenciaron influencia del fenómeno del Niño Oscilación del Sur, como lo indica su asociación con el índice SOI enero-junio ($r = -0.47$, $p < 0.01$) y picos significativos de 3.21 años, con el análisis espectral en la frecuencia de este fenómeno. Otros eventos circulatorios, como la Oscilación Decadal del Pacífico registró un efecto significativo, pero menor ($r = 0.38$, $p < 0.01$); mientras que, la influencia de la Oscilación Multidecadal del Atlántico no fue significativa.

Palabras clave: Coníferas, dendrohidrología, El Niño Oscilación del Sur, madera temprana, Región Hidrológica 16, sequías.

Fecha de recepción/Reception date: 25 de septiembre de 2020

Fecha de aceptación/Acceptance date: 28 de enero de 2021

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. México.

*Autor por correspondencia: correo-e: villanueva.jose@inifap.gob.mx

Introducción

La demanda por los recursos hídricos en México se incrementa anualmente en función del crecimiento poblacional (Conagua, 2018); aunque no corresponde con la oferta de dichos recursos, debido a modificaciones en el ciclo hidrológico derivadas de cambios en el uso del suelo y a problemas de calentamiento global, que acorde a modelos de circulación general producirán reducciones significativas en la precipitación para 2030 (Riva, 2015). El volumen de agua *per capita* en el país ha disminuido; de tal manera que en 67 años (1950-2017), la disponibilidad se redujo 79 %, de 17 742 a 3 656 m³ habitante⁻¹ año⁻¹ (Conagua, 2018).

La evaluación cuantitativa de los recursos hídricos es una tarea difícil de completar, particularmente, por la limitada red de estaciones climáticas e hidrométricas existente, así como a su corta extensión y calidad de datos; lo anterior limita realizar inferencias acerca de su comportamiento histórico y sus tendencias. En este tenor, los anillos de crecimiento de árboles constituyen un “*proxy*” de alta resolución para analizar la variabilidad histórica de los escurrimientos (Woodhouse *et al.*, 2006; Martínez-Sifuentes *at al.*, 2020), dado que en sus bandas de crecimiento anual quedan registrados las condiciones ambientales imperantes durante su desarrollo (Schweingruber, 1996).

Las reconstrucciones dendroclimáticas, en particular las hidrológicas en el occidente de México, son muy limitadas (Villanueva *et al.*, 2012; Cerano *et al.*, 2013), pero muestran el potencial del desarrollo de series extensas que pueden contribuir a entender la variabilidad interanual y multianual del clima, y la influencia de forzantes climáticos que impactan la disponibilidad de recursos hídricos para fines productivos y de consumo humano (Villanueva *et al.*, 2017).

La producción de agua en la porción sur-suroeste del estado de Jalisco impacta el bienestar de los asentamientos humanos ubicados en el área limítrofe de los estados de Jalisco, Colima y Michoacán, que dependen del agua producida en regiones hidrológicas como la de Armería-Coahuayana (INEGI, 1995; INEGI, 2000). Así, el

objetivo del presente estudio fue generar una red de series de anillos de crecimiento distribuidos en la región hidrológica Armería-Coahuayana (RH16) y desarrollar una reconstrucción de los escurrimientos producidos en la cuenca Coahuayana de Jalisco, cuyos volúmenes de flujo se registran en las estaciones hidrométricas Quito y San Gregorio. La hipótesis de la investigación es que las series dendrocronológicas en la RH16 muestran una señal climática común, y que al integrarse en una serie de crecimiento regional permitirán extender hacia el pasado la estimación de volúmenes de flujo ocurridos en esa región hidrológica.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La región hidrológica Armería-Coahuayana se localiza al sur de Jalisco, en las provincias Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur; en el estado cubre una superficie de 12 581.5 km², que representa 15.70 % del total de la entidad. El clima de la región es cálido subhúmedo con lluvias de verano, subtipos AW₀ y AW₁(w) (García de Miranda, 1989). La precipitación de la región varía de 800 a 1 200 mm anuales, con una temperatura media de 24 a 26 °C (INEGI, 2000). Esta región hidrológica se conforma por las subregiones ríos Coahuayana y Armería que drenan hacia el océano Pacífico.

La subregión río Coahuayana la integran cuatro cuencas hidrológicas: Quito, Coahuayana-Jalisco, Coahuayana-Colima y Coahuayana-Michoacán con una superficie total de 7 895 km²; se ubica al sur de Jalisco y se extiende hacia Colima y Michoacán. En el estado de Jalisco tiene una superficie de 4 487.6 km², que equivale a 5.60 % de su superficie. El volumen precipitado en la cuenca Coahuayana es de 3 383 millones de m³ (Mm³), de los que drenan 281.0 Mm³ (INEGI, 2000).



Muestreo dendrocronológico y reconstrucción dendrohidrológica

Para la generación de series dendrocronológicas, se seleccionaron diversos parajes en comunidades de bosque de coníferas, en partes altas de las cuencas de la RH16, correspondiente al estado de Jalisco; los sitios fueron: Autlán de Navarro (AUT); Gómez Farías (GFA), Sierra de Quila (SQU), Terrero (TER), Tuxpan (TUX) y Bosque La Primavera (BLP) (Figura 1).

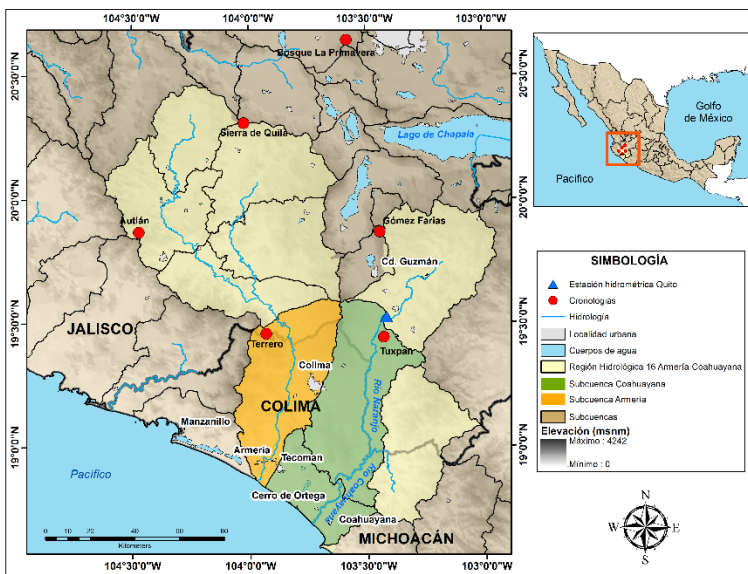


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo para el desarrollo de las series dendrocronológicas en la Región Hidrológica 16 Armería-Coahuayana en el estado de Jalisco (izquierda) y condición de sitio en un rodal de coníferas en Bosque La Primavera (derecha).

El muestreo incluyó diversas especies de pino: *Pinus douglasiana* Martínez (Pdou), *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. (Pooc), *Pinus devoniana* Lindl. (Pdev), *Pinus lumholtzii* B. L. Rob. & Fernald (Plum), *Pinus durangensis* Martínez (Pdur), *Pinus maximinoi* H. E. Moore (Pmax) y *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Ppse), lo que permitió captar con mayor veracidad la variación hidroclimática que caracteriza al área de estudio (Cuadro 1).

Cuadro 1. Ubicación geográfica de los sitios de colecta y especies muestreadas en la región hidrológica 16 Armería-Coahuayana.

Sitio	Latitud norte (grados)	Longitud oeste (grados)	Altitud (m)	Especies
AUT	19.614	104.251	1 910	Pdou, Pooc, Pdev, Plum
GFA	19.869	103.395	2 202	Pdur, Pmax
SQU	20.300	104.064	2 029	Pdou
TER	19.457	103.929	2 401	Ppse
TUX	19.441	103.428	1 440	Pooc
BLP	20.645	103.586	1 821	Pooc

Se seleccionaron de 30 a 50 árboles por sitio. Las muestras dendrocronológicas se obtuvieron con una barrena de *Pressler* y de cada árbol se extrajeron de dos a tres incrementos radiales a la altura del pecho (1.35 a 1.40 cm). El número de núcleos totales extraídos por sitio fue de 90 para AUT, 87 para GFA, 130 para SQU, 90 para TER, 120 para TUX y 150 para el BLP.

Las muestras se procesaron acorde a técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968); y con un sistema de medición *Velmex*, precisión 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980) se hicieron las mediciones tanto del anillo total, como de las bandas de crecimiento de madera temprana y tardía. La calidad del fechado se realizó mediante el programa COFECHA (Holmes, 1983) y la base de datos de medición de anillo total, madera temprana y tardía de cada sitio, se estandarizó con el programa *ARSTAN*, al aplicar una curva exponencial negativa o recta de regresión

de pendiente positiva o negativa y un "spline" que conserva 50 % de la varianza (Cook, 1987), que produjo tres versiones de la cronología: estándar, residual y *arstan*.

Para analizar la varianza común entre las series dendrocronológicas, se aplicó un Análisis de Componentes Principales (PCA, siglas en inglés), y con base en el primer componente principal se definieron los sitios por integrar en una base de datos de medición para generar una cronología regional; en la cual, la extensión útil de la cronología con fines de reconstrucción se determinó en función de la Señal Expresada de la Población (EPS), con un valor ≥ 0.85 (Wigley *et al.*, 1984).

Del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales de la Comisión Nacional del Agua (Bandas), se descargaron los registros de las estaciones hidrométricas presentes en la RH16 con las claves: 16041 Quito (18.525° N, 103.417° O), 6020 El Nogal (19.892° N, 103.8° O), 16021 San Gregorio (19.834° N, 103.35° O), 16031 Canoas (19.525° N, 103.884° O) y 16033 El Rosario (19.667° N, 103.992° O). Los volúmenes de escurrimiento producidos en la cuenca Coahuayana se consignan en las estaciones hidrométricas Quito y San Gregorio; mientras que, los volúmenes del río Armerías en las estaciones hidrométricas Canoas, El Nogal y El Rosario.

Los registros hidrométricos a nivel mensual y estacional se normalizaron al transformarlos a logaritmos base 10 y, posteriormente, se compararon con la serie dendrocronológica regional de madera temprana, tardía y de anillo total en sus versiones estándar y residual; con ello, se generó un modelo para una estación hidrológica individual o combinada con fines de reconstrucción de volúmenes de escurrimiento.

Los datos hidrométricos disponibles se calibraron tanto en la longitud total del periodo, como en dos subperiodos, correspondientes a la mitad de los registros; la verificación se realizó en la mitad de los mismos, mediante la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL), con la subrutina "Verify".

La ecuación de regresión estadísticamente calibrada y verificada, se utilizó para realizar una reconstrucción de volúmenes de escurrimiento estacional, a la cual se le

ajustó una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia (Cook y Peters, 1981).

La presencia de años o periodos con bajo o alto escurrimiento estacional en la reconstrucción se determinó en función del valor de la mediana ± 0.5 de la desviación estándar, en la que los valores por encima de este parámetro se clasificaron como eventos húmedos y por debajo, como secos.

Las frecuencias significativas en la serie regional dendrocronológica y, por ende, en los escurrimientos se calcularon con un Análisis Espectral de Potencia (Wilks, 1995), realizado con la Librería de Programas Dendrocronológicos en "R", versión 1.6.7 (Bunn *et al.*, 2018).

La variación interanual y multianual del clima en México está influenciada por diversos fenómenos océano-atmósfera; en este estudio, para determinar la mejor relación entre la cronología regional de madera temprana, tardía, de anillo total y fenómenos océano-atmósfera, se eligió la mejor asociación de estas cronologías con índices del Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), a través del Índice de Oscilación de Sur (SOI) reconstruido en el periodo noviembre previo a febrero del año actual de crecimiento (Stahle *et al.*, 1998) y el Índice Multivariado (MEI, por sus siglas en inglés) (Wolter y Timlin, 2011); así como con índices de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) (Mantua *et al.*, 1997) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) (Enfield *et al.*, 2001).

La presencia de eventos húmedos y secos en la reconstrucción, se verificó con datos históricos documentados de sequías, periodos húmedos, producción de alimentos y reconstrucciones dendroclimáticas existentes (Cerano *et al.*, 2013; Domínguez, 2016; Ortega-Gaucín, 2018; Villanueva *et al.*, 2018).



Resultados

La extensión de las series dendrocronológicas fue diferente entre sitios, la más extensa fue la de Autlán de Navarro (1800–2014) y la más corta, la de Terrero (1935–2015). La intercorrelación entre series superó el valor crítico de 0.328 ($p < 0.01$) para un adecuado fechado y la sensibilidad media indicó que las series tienen potencial para las reconstrucciones hidroclimáticas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros dendrocronológicos de las series de crecimiento y extensión de las cronologías generadas.

Sitio	Especies	Intercorrelación entre series	Sensibilidad media	Extensión
AUT	Pdou, Pooc, Pdev, Plum	0.544	0.379	1800-2014
GFA	Pdur, Pmax	0.495	0.219	1880-2014
SQU	Pdou	0.420	0.305	1850-2013
TER	Ppse	0.537	0.342	1935-2015
TUX	Pooc	0.523	0.349	1867-2014
BLP	Pooc	0.506	0.401	1850-2014

Las series dendrocronológicas evidenciaron un comportamiento similar en el periodo común (1935-2013), cuando la mayor asociación se determinó entre los sitios AUT y SQU (0.67, $p < 0.01$) y fue menor (0.35, 0.45), pero significativa ($p < 0.01$) con las otras cronologías.

El primer componente del PCA explicó 43.76 % de la varianza total, con las cronologías AUT, GFA, SQU, TUX y BPL; mientras que, la cronología del sitio TER mostró mayor varianza en el segundo componente (17.7 %) (Figura 2).

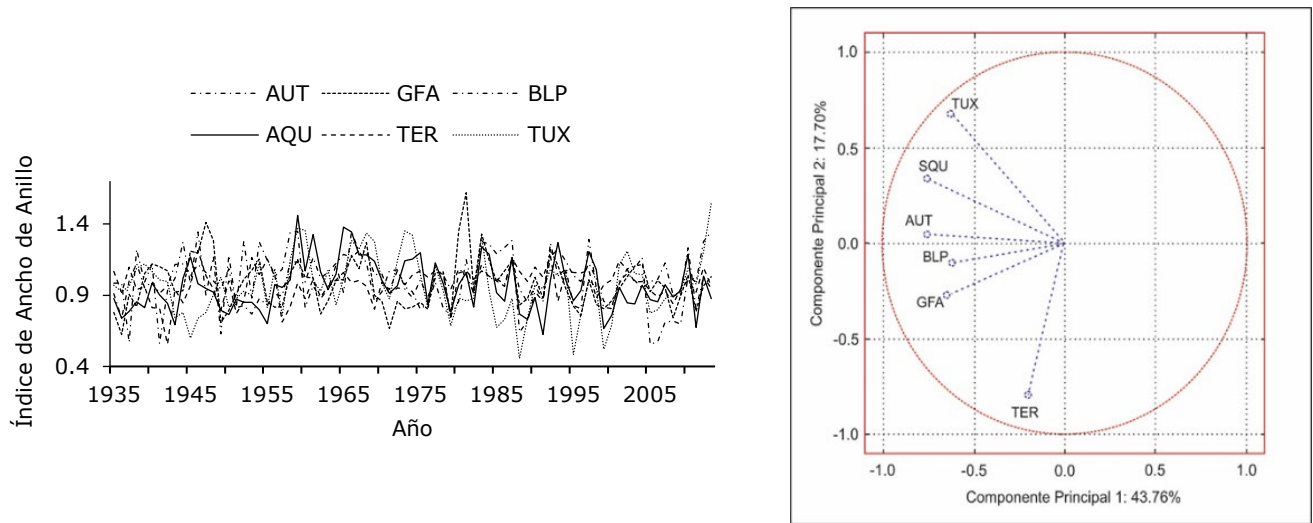


Figura 2. Comportamiento interanual de los índices de crecimiento de las series de anillo total para el período común (1935-2013) (izquierda) y comportamiento de las series analizadas mediante Componentes Principales (derecha).

La integración de las bases de medición originales de dichos sitios, excluyendo a la cronología del sitio TER, resultó en una serie de tiempo de 215 años (1800-2014), en la que el periodo con una Señal Expresada de la Población significativa ($EPS \geq 0.85$) fue de 1860 a 2014 (155 años) con más de siete núcleos de crecimiento, por lo que para fines de reconstrucción de escurrimientos fue el periodo considerado en el análisis (Figura 3).



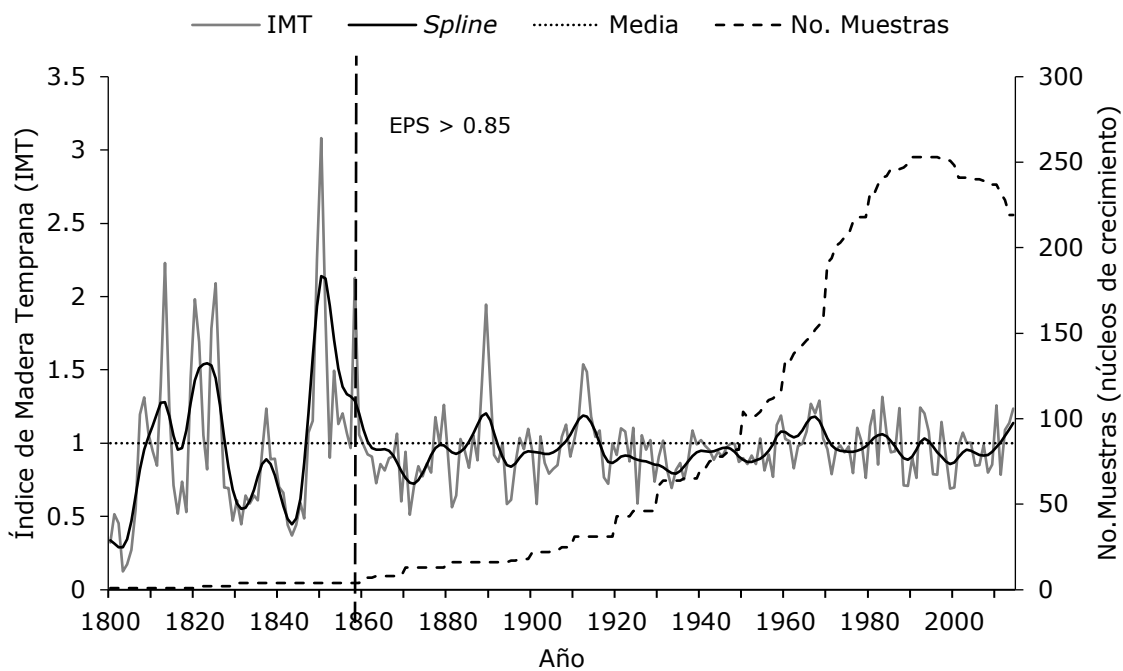
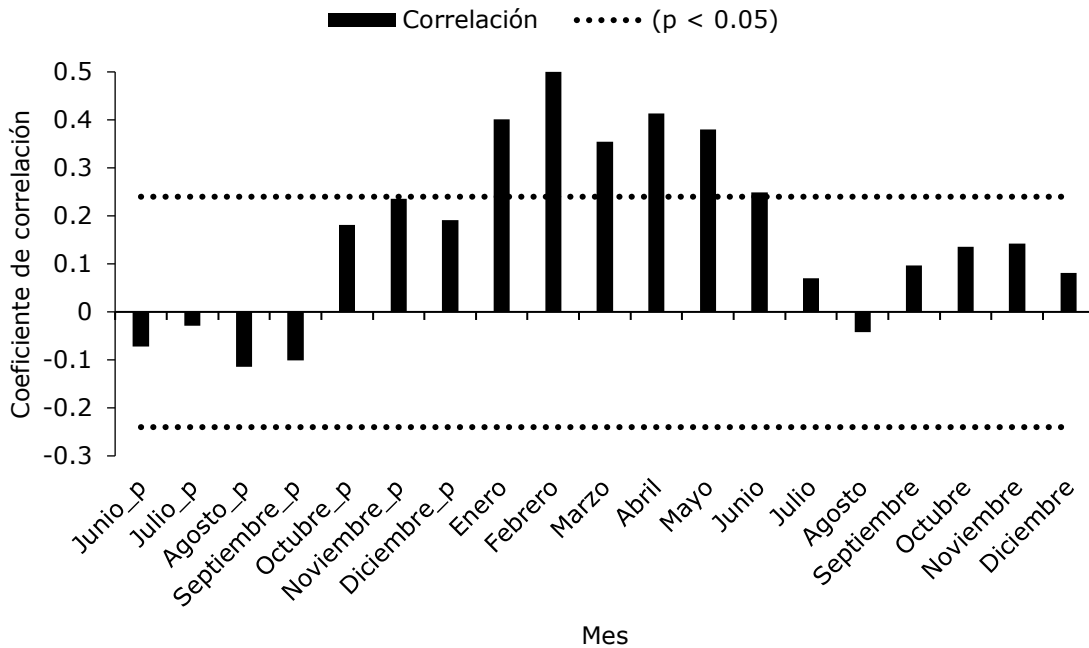


Figura 3. Cronología regional de madera temprana representativa de la subregión hidrológica Coahuayana.

La mejor respuesta entre la serie regional de crecimiento de madera temprana, tardía, de anillo total y los datos hidrométricos fue entre la cronología de madera temprana y los gastos registrados en la estación hidrométrica Quito ($r = 0.62$, $p < 0.01$, $n = 54$); por lo anterior, el análisis dendrohidrológico se limitó a esta cuenca, cuya estación hidrométrica registra 90 % del escurrimiento anual producido en la subregión hidrológica Coahuayana del estado de Jalisco.

Un análisis más detallado entre la serie de madera temprana y los registros de la estación hidrométrica Quito en los meses previos de junio a diciembre y durante el año de crecimiento (enero-diciembre) indicó que los volúmenes mensuales de enero a junio tuvieron una asociación significativa ($p < 0.05$) con los índices de madera temprana, tanto a nivel mensual como estacional (Figura 4).



Valores por encima o por debajo de las líneas punteadas son significativos ($p < 0.05$).

Figura 4. Correlaciones entre la cronología regional de madera temprana y registros hidrométricos mensuales de la estación hidrométrica Quito.

Al considerar el flujo acumulado enero-junio del período 1952-2005, la asociación se incrementó a 0.62 ($p < 0.01$) y al normalizar el flujo acumulado con \log_{10} , la correlación alcanzó un valor de 0.70 ($p < 0.01$).

Los resultados del proceso de calibración del modelo fueron significativos ($p < 0.01$), tanto en el período total de registros (1946-2005, $r = 0.70$, $p < 0.01$, $n = 54$) que explica 50 % de la variación en escurrimientos, como en los subperíodos 1946-1974 ($r = 0.64$, $p < 0.01$) y 1975-2005 ($r = 0.74$, $p < 0.01$). El proceso de verificación en ambos subperíodos resultó significativo para diversas pruebas estadísticas, como correlación, prueba de signos, prueba de "t" y primera diferencia significativa. El subperíodo de 1975 a 2005 se utilizó para generar el modelo de reconstrucción, el cual fue el siguiente:

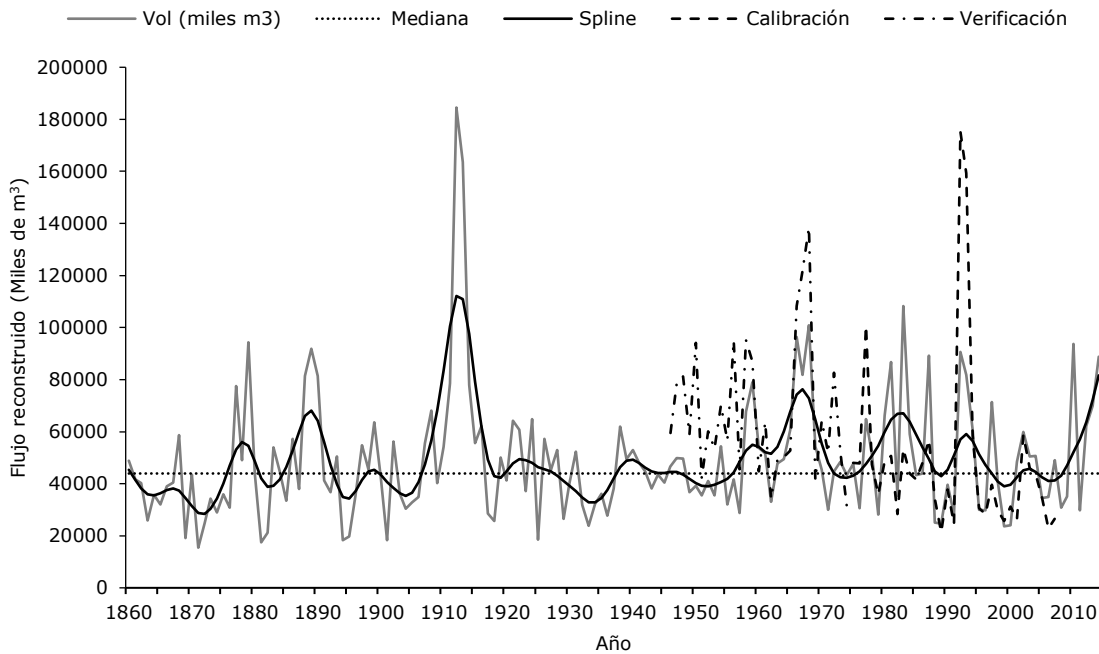
$$Y_i = 3.6489021 + 1.0514014X_i$$

Donde:

Y_i = Volumen estacional enero-junio reconstruido en \log_{10}

X_i = Índice de la cronología regional de madera temprana versión estándar

Los valores anuales en \log_{10} se transformaron a unidades métricas para obtener volúmenes en miles de m^3 (Figura 5).



Las líneas discontinuas representan los registros hidrométricos utilizados para la prueba de calibración (1975-2005) y verificación (1946-1974) del modelo de reconstrucción.

Figura 5. Volumen estacional reconstruido enero-junio para la cuenca Quito en la subregión hidrológica Coahuayana, Jalisco.

Con base en la mediana reconstruida y al considerar como eventos húmedos la mediana ± 0.5 de la desviación estándar (24 039.4) para eventos húmedos y secos, respectivamente; se observó la dominancia de periodos húmedos. Las sequías más prolongadas correspondieron a los períodos: 1861-1867, 1869-1876, 1903-1906, 1932-1937, 1949-1953 y 1988-1991; la sequía más severa ocurrió de 1869 a 1876; y algunos de los eventos más húmedos tuvieron lugar en los periodos: 1888-1890, 1910-1916, 1980-1981, 1983-1984, 1992-1994 y 2012-2014. La mayor influencia de los fenómenos atmosféricos en la serie de crecimiento regional en la variabilidad del clima de esta región, se atribuye al fenómeno ENSO durante el periodo invierno-primavera y principios de verano, cuando la cronología regional de madera temprana registró una correlación de -0.47 ($p < 0.01$, 1952-2014) y de 0.43 ($p < 0.01$, 1953-2014) con el SOI y con el MEI en los periodos enero-junio y noviembre-julio, respectivamente. Una asociación significativa también se observó con el PDO en el periodo estacional julio-febrero (0.38 , $p < 0.01$, 1949-2011), pero la correlación con índices de AMO no fue significativa ($p > 0.05$) (Figura 6).

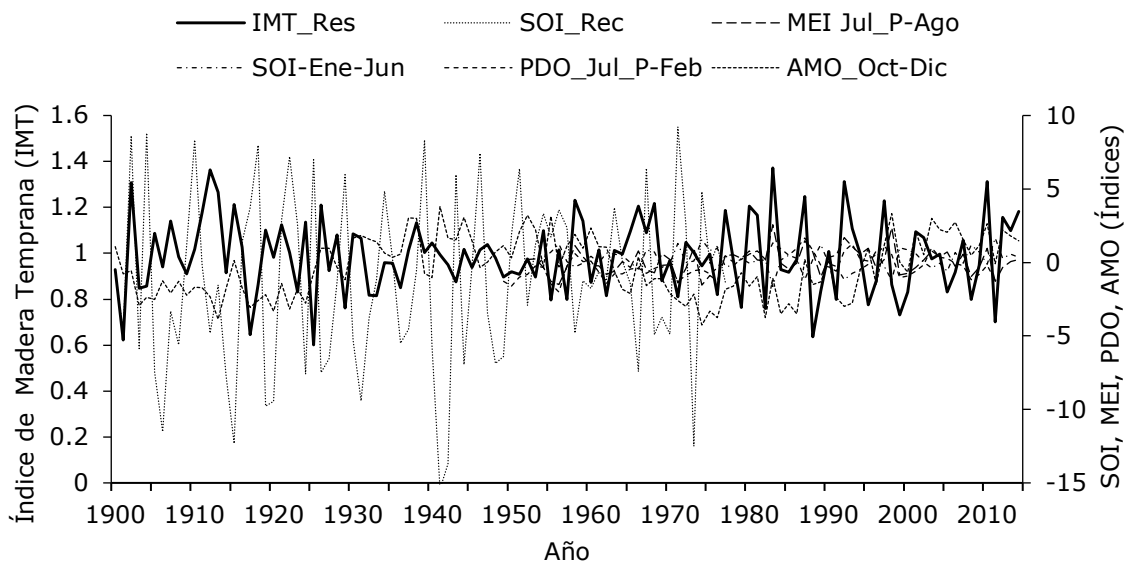


Figura 6. Comportamiento de los índices de fenómenos circulatorios (ENSO, AMO, PDO) con respecto al índice de madera temprana (línea sólida más oscura), representativa de la cuenca hidrológica Quito, subregión hidrológica Coahuayana.

El análisis espectral de potencia en la serie de crecimiento regional de madera temprana mostró la presencia de periodicidades significativas cada 11.58 y 3.21 años (Figura 7).

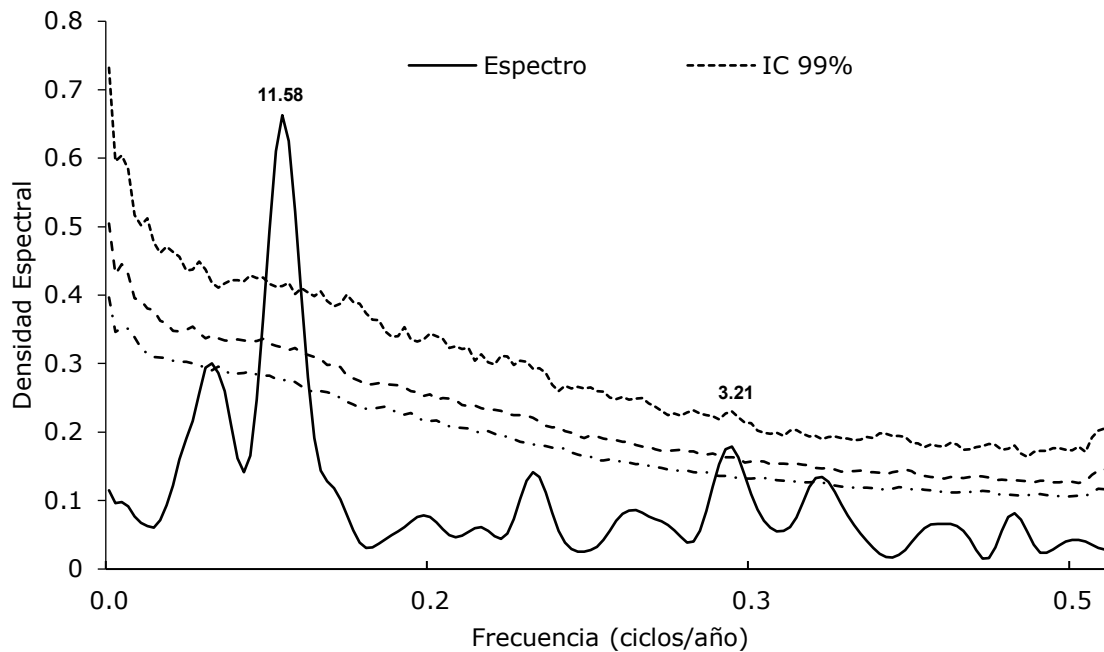


Figura 7. Análisis espectral de potencia para la serie regional de madera temprana.

Discusión

Las cronologías individuales de anillo total fueron satisfactoriamente datadas, acorde a la intercorrelación entre series (0.42 a 0.544) que superó el valor de referencia (0.328, $p < 0.01$); mientras que, la sensibilidad media (0.219 a 0.401) se considera adecuada con fines de reconstrucción hidroclimática (Speer, 2010). Valores similares a los de este estudio se han referido con *Abies guatemalensis* Rehder, *Abies religiosa* (Kunth) Schldl. et Cham. y *Pinus strobiformis* Engelm. en Michoacán y Oaxaca (Carlón-Allende *et al.*, 2018; Aquino *et al.*, 2019).

No obstante que las series dendrocronológicas se integraron por diversas especies de coníferas, la asociación entre cronologías fue significativa con valores de correlación entre 0.35 a 0.67, lo que implica la influencia de variables climáticas de impacto regional y una respuesta similar de las especies de coníferas presentes en esta región. Lo anterior se corroboró con el Análisis de Componentes Principales que integró todas las cronologías en el primer componente, excepto el sitio Terrero que a pesar de un correcto fechado, su variabilidad interanual presentó una señal climática distinta, probablemente, influenciada por cambios en el uso del suelo (INEGI, 2000).

La integración de una red de series dendrocronológicas compuesta por diversas especies ha permitido analizar en diversas regiones geográficas del continente la reconstrucción de índices de sequía (Cook *et al.*, 2010; Stahle *et al.*, 2016), índices de ENSO (Stahle *et al.*, 1998) y de flujos en amplias regiones de Norteamérica (Woodhouse *et al.*, 2006; Anderson *et al.*, 2019) y de México (Villanueva *et al.*, 2017; Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020).

La cronología regional de madera temprana registró una asociación significativa con los volúmenes acumulados del período enero-junio; esto indica que la precipitación ocurrida en las estaciones de invierno, primavera y principios de verano, de la cual dependen los volúmenes escurridos, define el crecimiento de la madera temprana en el occidente de México. En algunos estudios se ha señalado el efecto que tienen las condiciones de precipitación invierno-primavera para explicar el crecimiento de madera temprana y del anillo total en diversas especies de coníferas de bosques templados de México, como son *Pinus douglasiana*, *Abies religiosa* y *Pinus pseudotrobus* (Cerano *et al.*, 2013; Carlón *et al.*, 2016).

La reconstrucción de escurrimientos enero-junio en la cuenca Quito, caracterizada por la dominancia de periodos húmedos derivada de la presencia de fenómenos climáticos de amplia escala (Stahle *et al.*, 2020), también sugiere la presencia de sequías prolongadas en los siglos XIX y XX; así, la de 1869 a 1876 afectó la recuperación del lago de Chapala (Villanueva *et al.*, 2012), y en 1866 y 1876 hubo poco aporte clástico

(indicativo de sequía). En un estudio de sedimentos realizado en un lago del occidente de Jalisco (Sosa-Nájera *et al.*, 2010), lo mismo se detectó en reconstrucciones de precipitación invierno-primavera (enero-mayo) para la Sierra de Manantlán y el Bosque La Primavera, Guadalajara, Jalisco (Cerano *et al.*, 2013; Villanueva *et al.*, 2018). Las sequías en esta región del país, se tradujeron en escasez de alimentos para la población de Jalisco y Michoacán (Escobar, 1997).

En el siglo XX, las sequías de 1932 a 1937, 1949 a 1953 y 1988 a 1991 han sido bien documentadas en registros climáticos, hidrológicos y reconstrucciones dendroclimáticas, tanto por su impacto en la producción de alimentos como como por su efecto social y económico (Domínguez, 2016). La sequía de 1949-1953, fue la más severa del siglo XX en el norte de México y suroeste de los Estados Unidos de América (Seager *et al.*, 2009), lo cual se refleja en reducidos escurrimientos en la cuenca del Conchos (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2020) y su efecto también, se corrobora en el sur de Jalisco.

La sequía de 1869 a 1876, presente en otras reconstrucciones de precipitación (Cerano *et al.*, 2013), no tiene precedente en los registros hidrológicos de la estación hidrométrica Quito, y aunque la disponibilidad hídrica en esta cuenca parece no ser limitante con fines productivos, una baja disponibilidad de agua sí puede afectar procesos ecológicos de los ecosistemas forestales y riparios de la región, así como con fines de irrigación; por lo tanto, es importante considerar estos eventos y diseñar planes de manejo hídrico para mitigar sus efectos. Entre ellos, la tecnificación del riego en áreas irrigadas, uso de especies con menos requerimiento hídrico, manejo sustentable del bosque que favorezca la estabilidad hidrológica, entre otras acciones de conservación.

Los periodos húmedos detectados en la reconstrucción son similares a los registrados para la Sierra de Manantlán (Cerano *et al.*, 2013) e implicaron mayores entradas de escurrimientos al Lago de Chapala, como fueron los períodos 1877-1879, 1938-1942, 1963-1970 y 1992-1994 (Villanueva *et al.*, 2012).

Fenómenos de circulación general que muestran un impacto en el clima de México son ENSO, AMO y PDO, pero el grado de influencia es diferente en cada una de las regiones del país (Stahle *et al.*, 2011). ENSO, a través de sus tele-conexiones, es el

fenómeno que más impacta el clima de México (Magaña *et al.*, 1999; Stahle *et al.*, 2016); en la región norte del país, la fase cálida de este fenómeno (Niño) incrementa la precipitación en la época fría del año, pero la inhibe durante la fase fría (Niña), lo que produce condiciones de sequía y su efecto es contrario en el centro y sur de México (Méndez y Magaña, 2010).

En el presente estudio, la serie de madera temprana evidenció una correlación de -0.47 ($p < 0.01$) con el SOI enero-junio y de 0.43 con MEI, lo cual corrobora que ENSO ejerce una influencia positiva en la precipitación y en consecuencia, favorece los escurrimientos invierno-primavera en la subregión hidrológica Coahuayana del estado de Jalisco. La influencia de ENSO definió picos significativos de 2.21 y 11.58 años, en los que el de 2.21 años queda incluido en las frecuencias dominantes de ENSO (Bruun *et al.*, 2017), mientras que el de 11.58 años puede asociarse a frecuencias dominantes del PDO (Mantua y Hare, 2002).

Por lo que respecta al PDO, la asociación positiva de julio del año previo a febrero del año actual de crecimiento hace suponer que este fenómeno afecta los escurrimientos en la región de estudio, aunque su efecto es más notorio en el norte de México en el período invernal y en el verano (Méndez *et al.*, 2010); cuando tiene un comportamiento en fase con ENSO (Méndez y Magaña, 2010). La influencia de AMO no fue significativa como se describe para otras regiones de México (Stahle *et al.*, 2020). La influencia positiva de ENSO y PDO no se ha estudiado para esta región del país y se desconoce el proceso físico que origina ese comportamiento. Investigaciones de interacciones ENSO-AMO se han llevado a cabo para la península de Yucatán, donde las sequías coinciden con la fase fría de AMO en periodicidades de 10 años (Mendoza *et al.*, 2007).



Conclusiones

El desarrollo de una red dendrocronológica e integrada en una cronología representativa de la subregión hidrológica Armería-Coahuayana, conformada por diversas especies de coníferas, muestra una respuesta climática común, lo que proporciona una opción para extender en el tiempo el entendimiento de la variabilidad hidroclimática interanual y multianual.

De las series dendrocronológicas de madera temprana, tardía y anillo total, la madera temprana es la que responde con mayor significancia a los escurrimientos acumulados en el periodo estacional invierno-primavera y principios de verano; ello implica que la precipitación de este periodo y su relación directa con escurrimientos es la que más influye en el incremento anual de madera temprana de las coníferas en esta subregión hidrológica.

De los fenómenos océano-atmósfera (ENSO, PDO, AMO), ENSO es el que más explica la variabilidad hidrológica interanual y multianual de la subregión hidrológica Coahuayana.

Agradecimientos

El presente estudio recibió financiamiento de los proyectos Conacyt CB-2016-01-283134, "Red dendrocronológica mexicana: aplicaciones hidroclimáticas y ecológicas".

Conflicto de interés

Los autores del presente artículo manifiestan no tener conflicto de interés de ningún tipo con las instituciones que apoyaron financieramente la investigación.

Contribuciones por autor

José Villanueva Díaz: colecta de material dendrocronológico, análisis de datos y redacción del escrito; Aldo R. Martínez Sifuentes: análisis de resultados y diseño de figuras; Ernesto A. Rubio Camacho: selección de sitios y muestreo; Álvaro Chávez

Durán: definición de sitios de muestreo y colecta de material; Juan de Dios Benavides Solorio: definición de sitios de estudio y colecta de material dendrocronológico; Julián Cerano Paredes: colectas y datado de muestras; Juan Estrada Ávalos: acopio y análisis de datos hidrométricos.

Referencias

- Anderson, S. R., R. Ogle, G. Tootle and A. Oubeidillah. 2019. Tree-ring reconstructions of streamflow for the Tennessee Valley. *Hydrology* 6: 34. Doi:10.3390/hydrology6020034.
- Aquino R., M., A. Velázquez M., J. Villanueva D., H. L. Hervert Z., A. Gómez G., V., J. Reyes H. y G. Ramírez V. 2019. Respuesta climática de *Abies guatemalensis* Rehder en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 25 (2): e2521773. Doi:10.21829/myb.2019.2521773.
- Bruun, J. T., J. I. Allen and T. J. Smyth. 2017. Heartbeat of the Southern Oscillation explains ENSO climatic resonances. *Journal of Geophysical Research Oceans* 122: 6746–6772. Doi:10.1002/2017JC012892.
- Bunn, A., M. Korpela, F. Biondi, F. Campelo, P. Merian, F. Qeadan, C. Zang C., D. Pucha C. and J. Wernick. 2018. dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.6.7. <https://r-forge.r-project.org/projects/dplr/> (10 de septiembre de 2020).
- Carlón A., T., M. E. Mendoza, D. R. Pérez-Salicrup, J. Villanueva-Díaz and A. Lara. 2016. Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the Monarch Butterfly Biospheres Reserve, central Mexico. *Dendrochronologia* (38): 103-116. Doi: 10.1016/dendro.2016.04.002.

Carlón-Allende, T., J. Villanueva-Díaz, M. E. Mendoza and D. R. Pérez-Salicrup. 2018. Climate signal in earlywood and latewood in conifer forests in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Tree-Ring Research* 74(1); 63-75.
Doi: 10.3959/1536-1098-74.1.63.

Cerano P., J., J. Méndez G., A. Amaro S, J. Villanueva D., R. Cervantes M. y E. Rubio C. 2013. Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biósfera de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*.
Doi:10.45154/rrchscfa.2013.02.007, Pp. 413-423.

Comisión Nacional del Agua (Conagua). 2018. Estadísticas del agua en México, edición 2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México. 303 p.

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* (41): 45-53. <http://hdl.handle.net/10150/261038> (14 de septiembre de 2020).

Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* (47): 37-59. <http://hdl.handle.net/10150/261788>. (14 de septiembre de 2020).

Cook, E. R., R. Seager, R. R. Heim Jr., R. S. Vose, C. Herweijer and C. Woodhouse. 2010. Megadroughts in North America: placing IPCC projections of hydroclimatic change in a long-term palaeoclimate context. *Journal of Quaternary Science* (25): 48-61. Doi: 10.1002/jps.1303.

Domínguez, J. 2016. Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias del Agua* 7(5): 77-93. <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1272> (7 octubre 2020)

- Enfield, D. B., A. M. Mestas N. and P. J. Trimble. 2001. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and riverflows in the continental U.S. *Geophysical Research letters* 28(10): 2077-2080. Doi:10.1029/2000GL012745.
- Escobar O., A. 1997. Las sequías y sus impactos en la sociedad del México decimónico. *In: García A., V. (ed.). Historia y Desastres en América latina, Vol. II. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina pp. 170-202. <http://www.desenredando.org>. (1 de octubre de 2020).*
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* (43): 69 -78.
<https://repository.arizona.edu/handle/10150/261223>. (5 de septiembre de 2020).
- García de Miranda, E. 1989. IV.4.10 Climas, Atlas Nacional de México. Escala 1: 4 000 000. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F., México. 90 p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1995. Estudio hidrológico del Estado de Colima. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México. 28 p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2000. Estudio hidrológico del Estado de Jalisco. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México. 176 p.
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrisoza y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. *In: Magaña Ríos, V.O. (Ed.). Los impactos de El Niño en México. SEP-Conacyt. México, D. F. México. 229 p.*
- Mantua, N., S. Hare, Y. Zhang, J. Wallace and R. Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*. (78): 1069–1079. Doi:10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2.

Mantua, J. N. and S. R. Hare. 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Oceanography* 58: 35-44. Doi: 10.1023/A:1015820616384.

Martínez-Sifuentes, A. R., J. Villanueva-Díaz, T. Carlón-Allende and J. Estrada-Ávalos. 2020. 243 years of reconstructed streamflow volume and identification of extreme hydroclimatic events in the Conchos River Basin, Chihuahua, Mexico. *Trees* 34:1347-1361. Doi:10.1007/s00468-020-02002-w.

Méndez, M. and V. Magaña. 2010. Regional aspects of meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate* 23(5): 1175–1188. Doi:10.1175/2009JCLI3080.1.

Méndez G., J., A. Ramírez L., E. Cornejo O., A. Zárate L. y T. Cavazos P. 2010. Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* (73): 57-70.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112010000300005&lng=es&nrm=iso (7 de octubre de 2020).

Mendoza, B., V. García A., V. Velasco, E. Jáuregui and R. Diaz S. 2007. Frequency and duration of historical droughts from the 16th to the 19th centuries in the Mexican Maya lands, Yucatan Peninsula. *Climate Change* (83):151–168. Doi: 10.1007/s10584-006-9232-1.

Ortega-Gaucín, D. 2018. Medidas para afrontar la sequía en México: una visión retrospectiva. *Revista de El Colegio de San Luis* 8(15): 77-105. Doi: 10.21696/rcsl8152018743

Riva A., I. 2015. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. *In: Arreguín C., F. I, M. López P., O. Rodríguez L. y M. J. Montero M. (coords.). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor., México. pp. 89-98.*

Robinson, W. J. and R. Evans. 1980. A microcomputed-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin* 40: 59-64. <http://hdl.handle.net/10150/2604043> (21 de septiembre de 2020).

- Schweingruber, F. H. 1996. Tree rings and environment. Dendroecology. Birmendsdorf, Swis Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stugart, Vienna, Haupt, Switzerland. 609 p.
- Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Naik, J. Nakamura, C. Li, E. Cook. and D. W. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22(1): 1-31.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56512093001> (3 de septiembre de 2020).
- Speer, J. 2010. Fundamentals of tree-ring research. University of Arizona Press. Tucson, AZ, USA. 509 p.
- Sosa-Nájera, S., S. Lozano-García, P. D. Roy y M. Caballero. 2010. Registro de sequías históricas en el occidente de México con base en el análisis elemental de sedimentos lacustres: El caso del lago de Santa María del Oro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 62(3): 437-451.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94319371009> (9 de septiembre de 2020).
- Stahle, D. W., R. D. D'Arrigo, P. J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. B. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Guy, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva D. and L. G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 70(10): 2137-2152.
Doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<2137EDROTS>2.0CO:2.
- Stahle, D. W., D. J. Burnette, J. Villanueva D., R. R. Heim Jr., F. K. Fye, J. Cerano P., R. Acuña S. and M. K. Cleaveland. 2011. Pacific and Atlantic influences in Mesoamerican over the past millennium. *Climate Dynamics* 39:1431-1446.
Doi: 10.1007/s00382-011-1205-z.

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. Doi: 10-1016/j.quascirev.2016.06.018.

Stahle, D. W., E. R. Cook, D. J. Burnette, M. C. A. Torbenson, I. M. Howard, D. Griffin, J. Villanueva D., B. I. Cook, A. P. Willimas, E. Watson, D. J. Sauchyn, N. Pederson, C. A. Woodhouse, G. T. Pedderson, D. Meko, B. Coulthard and C. J. Crawford. 2020. Dynamics, variability, and change in seasonal precipitation reconstructions for North America. *Journal of Climate* 33: 3173–3194. Doi: 10.1175/JCLI-D-19-0270.1.

Stokes, M. A. and T. L Smiley. 1968. *An introduction to Tree-Ring Dating*, University of Arizona Press. Tucson, AZ, USA. 73 p.

Villanueva D., J., J. Cerano P., J. de Dios Benavides S., D. W. Stahle, J. Estrada Á., V. Constante G. y M. Tostado P. 2012. Reconstrucción de los niveles del Lago de Chapala con series dendrocronológicas de *Taxodium mucronatum* Ten. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(14):55-68. Doi: 10.29298/rmcf.v3i14.474.

Villanueva, J., A. Gómez, J. Cerano, S. Rosales. J. Estrada, L. U. Castruita y A. R. Martínez. 2017. La variabilidad del caudal del río Acaponeta inferida mediante series de anillos de crecimiento en coníferas. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8(3): 55-74.

Villanueva D., J., E. A. Rubio C., A. A. Chávez D., J. L. Zavala A., J. Cerano P. y A. R. Martínez S. 2018. Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede ex Scheletol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques* 24(1):1-32. Doi:10.21829/myb.2018.2411464.

Wigley, M. L., K. R. Brifa and P. D. Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *American Meteorological Society* (23): 201-213. Doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO2.

Wilks, D. S. 1995. *Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction*. Academic Press. New York, NY, USA. 463 p.

Wolter, K. and M. S. Timlin. 2011. El Niño/Southern Oscillation behavior since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *International Journal of Climatology* (31): 14. Doi:10.1002/joc.2336.

Woodhouse, C. A., S. T. Gray and D. M. Meko. 2006. Updated streamflow reconstructions for the Upper Colorado River Basin. *Water Resources Research* 42: W05415. Doi:10.1029/2005WR004455.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.