

Precipitation variability (1660-2018) for the western part of Chihuahua induced with tree rings

Variabilidad de la precipitación (1660-2018) para el oeste de Chihuahua inferida con anillos de árboles

Ricardo Miranda-Briones¹; Julián Cerano-Paredes^{2*}; Gerardo Esquivel-Arriaga²; Jordi Morató-Farreras³; Rosalinda Cervantes-Martínez²; Ignacio Sánchez-Cohen²; Alejandro Gómez-Nísino⁴

¹Universitat Politècnica de Catalunya (UPC - Barcelona Tech), Instituto en Ciencia y Tecnología de la Sostenibilidad (IS.UPC). Carrer Jordi Girona 29. C. P. 08034. Barcelona, España.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), km 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento. C. P. 35140. Gómez Palacio, Durango, México.

³Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-Barcelona Tech), Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. Carrer Colom 1, edificio TR1, planta 0 puerta 108. C. P. 08222. Terrassa, España.

⁴Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) Campo Verde. Calle 8a s/n entre Allende y Ahumada, col. Centro. C. P. 31940. Madera, Chihuahua, México.

*Corresponding author: cerano.julian@gmail.com; tel.: +52 871 159 0104.

Abstract

Introduction: Tree rings play a significant role for the reconstruction of climate variables on century scales.

Objective: To reconstruct the variability of precipitation for the western part of the state of Chihuahua, based on tree rings of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Pinus arizonica* Engelm. and *Pinus strobiformis* Engelm.

Materials and methods: Samples were extracted with a Pressler drill, dated and growth indexes were generated based on dendrochronological techniques. A correlation analysis was run between regional chronology and observed precipitation data. A regression model was used to reconstruct precipitation. A spectral analysis determined the recurrence of droughts and the influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on precipitation variability.

Results and discussion: The relationship between the chronologies was statistically significant and a regional series of 359 years was developed. October-June precipitation had the highest impact on growth ($r = 0.73$, $P < 0.01$), so the variability of precipitation for that period was reconstructed for the last 359 years. Severe droughts were detected in the periods 1751-1768, 1807-1810 and 1945-1956 and a recurrence of droughts every 50 years was identified. The reconstructed precipitation variability is significantly modulated by ENSO at different time scales and frequencies.

Conclusion: Paleoclimatic series help us to spread the knowledge of climate in specific geographic regions and to analyze the recurrence of extreme events (droughts).

Resumen

Introducción: Los anillos de los árboles juegan un papel relevante para la reconstrucción de variables climáticas en escalas de siglos.

Objetivo: Reconstruir la variabilidad de la precipitación para el oeste de Chihuahua, con base en anillos de árboles *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Pinus arizonica* Engelm. y *Pinus strobiformis* Engelm.

Materiales y métodos: Se extrajeron muestras con taladro de Pressler, se fecharon y generaron índices de crecimiento con base en técnicas dendrocronológicas. Se corrió un análisis de correlación entre la cronología regional y los datos de precipitación observados. Se generó un modelo de regresión para reconstruir la precipitación. Un análisis espectral determinó la recurrencia de sequías y la influencia de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en la variabilidad de la precipitación.

Resultados y discusión: La relación fue significativa entre las cronologías y se desarrolló una serie regional de 359 años. La precipitación octubre-junio es la que más influye en el crecimiento ($r = 0.73$, $P < 0.01$), por lo que se reconstruyó la variabilidad de la precipitación de dicho periodo para los últimos 359 años. Se detectaron sequías severas en los periodos 1751-1768, 1807-1810 y 1945-1956 y se determinó una recurrencia de sequías cada 50 años. La variabilidad de la precipitación reconstruida es modulada significativamente por ENSO a diferentes escalas de tiempo y frecuencias.

Conclusión: Las series paleoclimáticas permiten extender el conocimiento del clima en regiones geográficas específicas y analizar la recurrencia de eventos extremos (sequías).

Keywords: *Pseudotsuga menziesii*; *Pinus arizonica*; *Pinus strobiformis*; dendrochronology, drought severity.

Palabras clave: *Pseudotsuga menziesii*; *Pinus arizonica*; *Pinus strobiformis*; dendrocronología, severidad de sequía.

Introduction

Droughts are one of the most important processes of natural climate variability, where precipitation levels are significantly lower than normal; due to current climate change, these events are likely to be magnified (Pokhrel et al., 2021). Even if we meet with the Paris Agreement to limit the global average temperature increase to 1.5 °C compared to pre-industrial levels, an increase in the intensity or frequency of droughts and precipitation deficits is expected in some regions of the world (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2019). While there is still uncertainty, there is enough knowledge to affirm that the north of Mexico will be impacted with more prolonged and intense droughts (Magaña-Rueda & Neri, 2012).

The border region of the states of Chihuahua and Sonora, located in an arid to semi-arid zone in the northwest part of Mexico, is frequently affected by severe droughts with considerable impact on the agricultural and livestock economy (Reyes-Gómez, Díaz, Brito-Castillo, & Núñez-López, 2013). Thanks to the diversity of these ecosystems, the area is a refuge for a significant variety of flora and fauna species that provide important environmental services for the population. The region is also rich in water resources due to the headwaters of the Fuerte, Yaqui and Humaya rivers that flow on both sides of the Sierra Madre Occidental, which recharge the aquifers (González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González, & López-Enríquez, 2012).

Therefore, it is essential to analyze trends in hydroclimatic variability to understand the impact of atmospheric circulation phenomena, to help developing plans to address future water scarcity events. However, the availability of climate records is limited because stations located in the area lack extensive and quality data (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2019).

Annual tree growth rings are one option to generate information on past climate (Guibal & Guiot, 2021). It is possible to obtain information on the historical variability of the climate of a region (Lüttge, 2017). In the bordering areas of Chihuahua and Sonora, paleoclimatic reconstructions are scarce (Irby, Fulé, Yocom, & Villanueva-Díaz, 2013; Villanueva-Díaz et al., 2015), thus, the generation of a greater number of series could help in the improvement of knowledge and understanding of the climate variability experienced and possible repercussions.

Therefore, the present study has the following objectives: 1) to reconstruct the variability of precipitation for the western region of the state

Introducción

Las sequías son uno de los procesos más importantes de variabilidad natural del clima, en las cuales los niveles de precipitación son significativamente menores que la normal; debido al cambio climático actual, es posible que estos eventos se magnifiquen (Pokhrel et al., 2021). Aun cuando se cumpla con el Acuerdo de París de limitar el aumento de la temperatura media mundial a 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales, se prevé aumento de la intensidad o frecuencia de las sequías y de déficits de precipitación en algunas regiones del mundo (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2019). Aunque todavía existe incertidumbre, se sabe lo suficiente para afirmar que la región norte de México será impactada con sequías más prolongadas e intensas (Magaña-Rueda & Neri, 2012).

La región limítrofe de los estados de Chihuahua y Sonora, localizada en una zona árida a semiárida en el noroeste de México, frecuentemente se ve afectada por sequías severas con impacto considerable en la economía agrícola y ganadera (Reyes-Gómez, Díaz, Brito-Castillo, & Núñez-López, 2013). Dada su diversidad de ecosistemas, la zona se convierte en refugio de una variedad significativa de especies de flora y fauna que proporcionan servicios ambientales importantes para la población. Además, la región presenta gran riqueza de recursos hídricos debido al nacimiento de los ríos Fuerte, Yaqui y Humaya que escurren por ambos lados de la Sierra Madre Occidental, permitiendo la recarga de los acuíferos (González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González, & López-Enríquez, 2012).

Debido a lo anterior, resulta indispensable el análisis de tendencias de la variabilidad hidroclimática para conocer la influencia de los fenómenos de circulación atmosféricos, de manera que ayude al desarrollo de planes para afrontar eventos futuros de escasez de agua. No obstante, la disponibilidad de registros climáticos es limitada, ya que las estaciones ubicadas en la zona carecen de datos extensos y de calidad (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2019).

Una opción para generar información sobre el clima del pasado son los anillos de crecimiento anual de los árboles (Guibal & Guiot, 2021). A través de estos, es posible obtener información sobre la variabilidad histórica del clima de una región (Lüttge, 2017). En las zonas limítrofes de Chihuahua y Sonora, las reconstrucciones paleoclimáticas son escasas (Irby, Fulé, Yocom, & Villanueva-Díaz, 2013; Villanueva-Díaz et al., 2015), por lo que, la generación de un número mayor de series podría ayudar a mejorar el conocimiento y entendimiento de la variabilidad climática que se ha experimentado y sus posibles repercusiones.

of Chihuahua based on annual growth rings of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Pinus arizonica* Engelm. and *Pinus strobiformis* Engelm., 2) to determine the frequency of extreme events (droughts) and 3) to analyze the influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on the historical variability of climate.

Materials and Methods

Study area

The Santuario de la Cotorra Serrana conservation area (29° 19' 25" N, 108° 12' 49" W) and the La Norteña site (29° 39' 08" N, 108° 28' 20" W), the latter corresponding to the Campo Verde Flora and Fauna Protection Area, are found in the municipality of Madera, Chihuahua, at an elevation gradient of 2500 to 3000 m (Figure 1). Both sites are located in the Yaqui river basin, which in turn belongs to the Región Hidrológica 9 Sonora Sur, with an area of 72 859.05 km² and a perimeter of 2 333.03 km, within the Sierra Madre Occidental (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). Also, both sites belong to Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) of Mexico (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2019).

Por lo anterior, el presente estudio plantea los objetivos siguientes: 1) reconstruir la variabilidad de la precipitación para la región oeste del estado de Chihuahua con base en los anillos de crecimiento anual de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *Pinus arizonica* Engelm. y *Pinus strobiformis* Engelm., 2) determinar frecuencias de eventos extremos (sequías) y 3) analizar la influencia de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) en la variabilidad histórica del clima.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de conservación El Santuario de la Cotorra Serrana (29° 19' 25" N, 108° 12' 49" O) y el sitio La Norteña (29° 39' 08" N, 108° 28' 20" O), este último correspondiente al Área de Protección de Flora y Fauna "Campo Verde", se localizan en el municipio de Madera, Chihuahua, en un gradiente de elevación de 2500 a 3000 m (Figura 1). Ambos sitios se ubican en la cuenca del río Yaqui, que a su vez pertenece a la Región Hidrológica 9 Sonora Sur, con una superficie de 72859.05 km² y un perímetro de 2333.03 km, dentro de la Sierra Madre Occidental (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2019). Asimismo, ambos

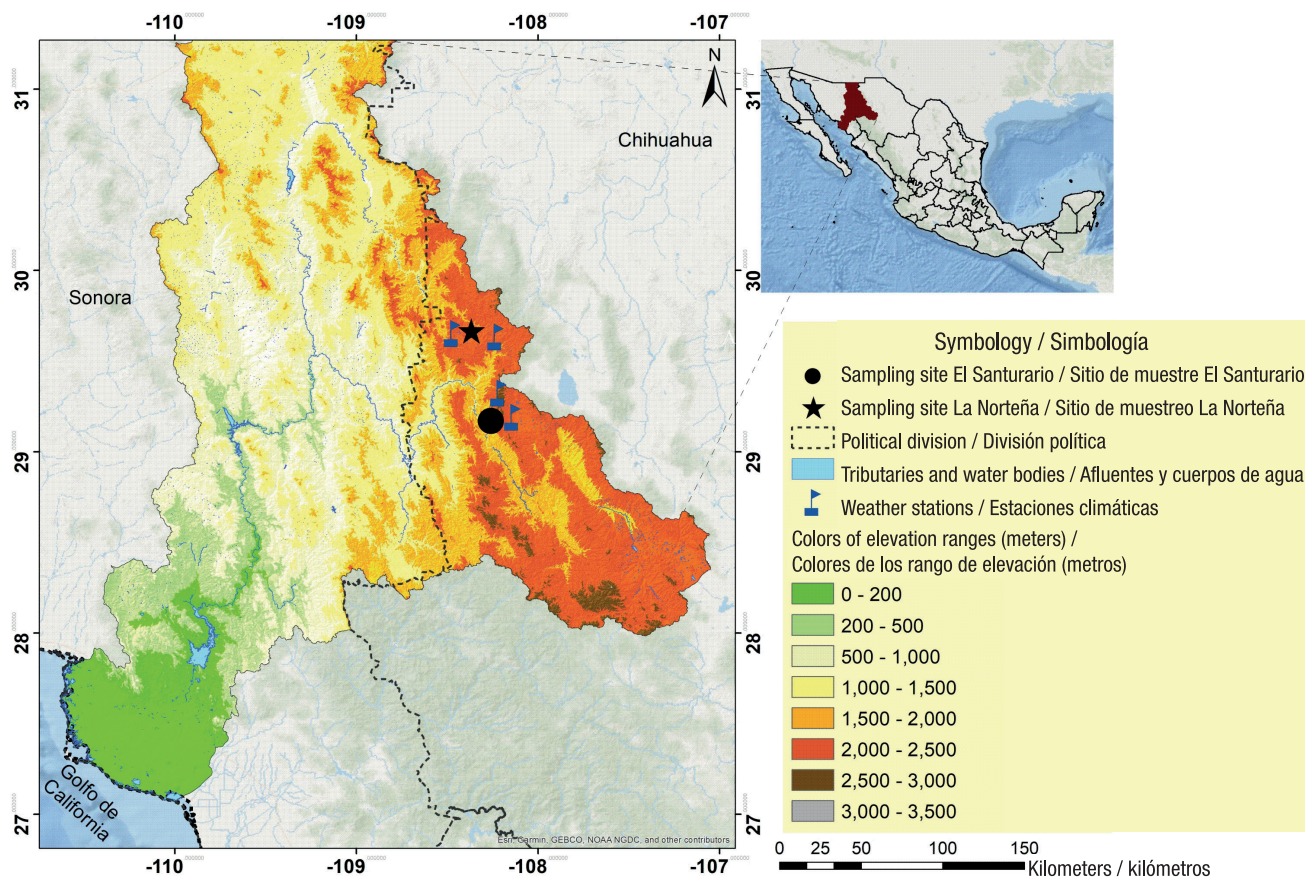


Figure 1. Geographical location of the study sites in the Yaqui river basin in western part of Chihuahua.

Figura 1. Localización geográfica de los sitios de estudio en la cuenca del río Yaqui en la parte oeste de Chihuahua.

The predominant climate in the area is semi-cold-subhumid with long cool summer (Cb'(w₂)x') (García, 1970). Mean annual precipitation ranges between 650 and 700 mm. Mean annual temperature of 11 °C with maximum temperatures of 28 °C in June and July, and minimum temperatures of -9 °C in December and January (SMN, 2019). The dominant vegetation type is conifers and oaks, while the soil type is Feozem (CONABIO, 2019).

Dendrochronological sampling and sample preparation

Tree ring samples were obtained by selective sampling. To maximize the climate signal, long-lived and climate-sensitive trees located in dry, rocky terrain were selected, seeking sites with minimal human disturbance (Fritts, 2001; Speer, 2010). Two to three samples were extracted per individual using a Pressler drill of 5 and 12 mm diameter and variable lengths (Hägloff). A total of 40 trees were sampled (18 *P. menziesii*, 15 *P. arizonica* and seven *P. strobiformis*) and a total of 91 samples were obtained at El Santuario. Sixty *P. arizonica* trees were sampled and a total of 132 samples were extracted at La Norteña. These were processed and predated following conventional techniques (Stokes & Smiley, 1996).

Dating and development of chronologies

For the predated samples, each of the annual growths (total ring, earlywood and latewood) were measured using a VELMEX sliding-phase system with 0.001 mm accuracy. Dating and measurement accuracy were verified with the COFECHA program (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983). Only series with intercorrelation values > 0.3281 ($P < 0.01$) were included in the construction of the final chronology (Holmes, 1983). Chronologies or growth indices (standard, residual and arstan), with mean 1.0 and homogeneous variance (Fritts, 2001), were generated with the ARSTAN program (Cook, 1987). This study used the standard and residual versions of the chronology because they provide the best association with precipitation.

Data analysis

A regional chronology was developed, and a Pearson correlation analysis was run between regional indices and observed regional precipitation data. Precipitation comprises quadrangles 51934 and 53212 (Terán-Cuevas, Gutiérrez-Castillo, & Davydova-Belitskaya, 2010) and the climatological stations Madera and Mesa del Huracán (SMN, 2019) (Figure 1; Table 1).

The relationship between monthly precipitation and regional indices of total ring width, earlywood and latewood in their standard and residual versions was evaluated by correlation analysis. Eighteen months of

sitios pertenecen a Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) de México (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2019).

El clima predominante en el área es semifrío-subhúmedo con verano fresco largo (Cb'(w₂)x') (García, 1970). La precipitación media anual oscila entre los 650 y los 700 mm. La temperatura media anual es de 11 °C con temperaturas máximas de 28 °C en junio y julio, y temperaturas mínimas de -9 °C en diciembre y enero (SMN, 2019). El tipo de vegetación dominante es de coníferas y encinos, mientras que el suelo es del tipo Feozem (CONABIO, 2019).

Muestreo dendrocronológico y preparación de muestras

Las muestras se obtuvieron mediante un muestreo selectivo. Para maximizar la señal climática, se seleccionaron árboles de aspecto longevo y sensibles al clima, ubicados en terrenos secos y rocosos, procurando sitios con perturbación humana mínima (Fritts, 2001; Speer, 2010). Dos a tres muestras se extrajeron por individuo con un taladro de Pressler de 5 y 12 mm de diámetro y longitudes variables (Hägloff). En El Santuario se muestrearon 40 árboles (18 de *P. menziesii*, 15 de *P. arizonica* y siete de *P. strobiformis*) y se obtuvieron 91 muestras en total. En el sitio La Norteña se muestrearon 60 árboles de *P. arizonica* y se extrajeron 132 muestras en total. Estas se procesaron y preficharon siguiendo las técnicas convencionales (Stokes & Smiley, 1996).

Fechado y desarrollo de cronologías

Para las muestras prefichadas, cada uno de los crecimientos anuales (anillo total, madera temprana y tardía) se midieron con un sistema VELMEX de fase deslizable con precisión de 0.001 mm. El fechado y exactitud de la medición se verificaron con el programa COFECHA (Grissino-Mayer, 2001; Holmes, 1983). Solo las series con valores de intercorrelación > 0.3281 ($P < 0.01$) se incluyeron en la construcción de la cronología final (Holmes, 1983). Las cronologías o índices de crecimiento (estándar, residual y arstan), con media 1.0 y varianza homogénea (Fritts, 2001), se generaron con el programa ARSTAN (Cook, 1987). En este trabajo se empleó la versión estándar y residual de la cronología porque proporcionan la mejor asociación con la precipitación.

Análisis de datos

Se desarrolló una cronología regional y se corrió un análisis de correlación de Pearson entre los índices regionales y los datos observados de precipitación regional. La precipitación comprende los cuadrantes 51934 y 53212 (Terán-Cuevas, Gutiérrez-Castillo,

Table 1. Weather stations used in the dendrochronological analysis for the western region of Chihuahua.
Cuadro 1. Estaciones climáticas utilizadas en el análisis dendrocronológico para la región oeste de Chihuahua.

Weather stations/ Estaciones climáticas	Latitude (N)/ Latitud (N)	Longitude (W)/ Longitud (O)	Elevation (m)/ Altitud (m)	Period/ Periodo
Madera 8097	29° 11' 24"	108° 08' 29"	2 102	1957-2007
Mesa del Huracán 8103	29° 38' 00"	108° 14' 01"	2 107	1957-1990
Cuadrante 51934	29° 19' 22"	108° 13' 01"	---	1950-2015
Cuadrante 53212	29° 39' 08"	108° 28' 22"	---	1950-2015

data were considered: six months before the growing year and 12 months during the growing season. According to Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva-Díaz, and Burns (2003), climate conditions recorded before the beginning of the growing season influence the development of subsequent annual growth.

For the highest significant correlation ($P < 0.05$) between cumulative precipitation and regional total ring index, a transfer equation was developed, using the program R version 3.6.1 (R Core Team, 2019). Precipitation was reconstructed with this model for the time span covered by the observed records. Using the *Verify* subroutine of the University of Arizona Dendrochronological Programs package (Holmes, 2001), a calibration test was applied to half of the observed and reconstructed climate data (1998-2015, $n = 18$) and the remaining half (1980-1997, $n = 17$) was assigned a verification test (Fritts, 2001). The equation obtained was applied to reconstruct precipitation over the total period of the regional series. A 10-year spline curve was fitted to the precipitation reconstruction to highlight dry and rainy events (Cook, 1987). A spectral analysis was applied to the reconstructed series to identify recurrence of dominant anomalies (droughts). For the most severe droughts, a spatial correlation analysis was performed between the reconstructed precipitation and the Palmer Drought Severity Index (PDSI) (Stahle et al., 2016). Finally, to determine the impact of ENSO on hydroclimatic variability, the reconstructed precipitation and the Niño 3.4 SST index (Rayner et al., 2003) were related using MATLAB version 8.5 (The MathWorks Inc., 2015). For this purpose, annual resolution plots of wavelet spectra and wavelet coherence plots were used.

Results

Dating of samples

From a total of 223 growth cores, 159 samples (71 %) were dated to the exact year of formation. The COFECHA results indicated that the intercorrelation

& Davydova-Belitskaya, 2010) y las estaciones climatológicas Madera y Mesa del Huracán (SMN, 2019) (Figura 1; Cuadro 1).

La relación entre la precipitación mensual y los índices regionales de ancho de anillo total, madera temprana y tardía en su versión estándar y residual, se evaluó mediante análisis de correlación. Se consideraron datos de 18 meses: seis meses antes del año de crecimiento y 12 meses durante la temporada de crecimiento. De acuerdo con Cleaveland, Stahle, Therrell, Villanueva-Díaz, y Burns (2003), las condiciones climáticas registradas antes del inicio de la temporada de crecimiento influyen en el desarrollo del crecimiento anual posterior.

Para la mayor correlación significativa ($P < 0.05$) entre la precipitación acumulada y el índice de anillo total regional, se desarrolló una ecuación de transferencia, utilizando el programa R versión 3.6.1 (R Core Team, 2019). Con este modelo se reconstruyó la precipitación para el lapso que cubren los registros observados. Con la subrutina *Verify* del paquete de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (Holmes, 2001), se aplicó una prueba de calibración a la mitad de los datos climáticos observados y reconstruidos (1998-2015, $n = 18$) y a la mitad restante (1980-1997, $n = 17$) se le asignó una prueba de verificación (Fritts, 2001). La ecuación generada se aplicó para reconstruir la precipitación en el periodo total de la serie regional. A la reconstrucción de precipitación se ajustó una curva o *spline* de 10 años, para resaltar los eventos secos y lluviosos (Cook, 1987). Se aplicó un análisis espectral a la serie reconstruida para identificar recurrencia de anomalías dominantes (sequías). Para las sequías más severas se hizo un análisis de correlación espacial entre la precipitación reconstruida y el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) (Stahle et al., 2016). Finalmente, para determinar la influencia de ENSO sobre la variabilidad hidroclimática, se relacionó la precipitación reconstruida y el índice Niño 3.4 SST (Rayner et al., 2003) mediante el programa MATLAB versión 8.5 (The

Table 2. Statistical parameters of total ring chronologies of *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* and *Pinus strobiformis* for the western region of Chihuahua.

Cuadro 2. Parámetros estadísticos de las cronologías de anillo total de *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* y *Pinus strobiformis* para la región oeste de Chihuahua.

Site / Sitio	Total ring correlation / Correlación de anillo total	Length of chronology / Longitud de la cronología	Sensitivity / Sensibilidad
El Santuario	0.610 ($P < 0.01$)	1863-2018 (156 years/años)	0.265
La Norteña	0.605 ($P < 0.01$)	1660-2018 (359 years/años)	0.313
Regional	0.580 ($P < 0.01$)	1660-2018 (359 years/años)	0.300

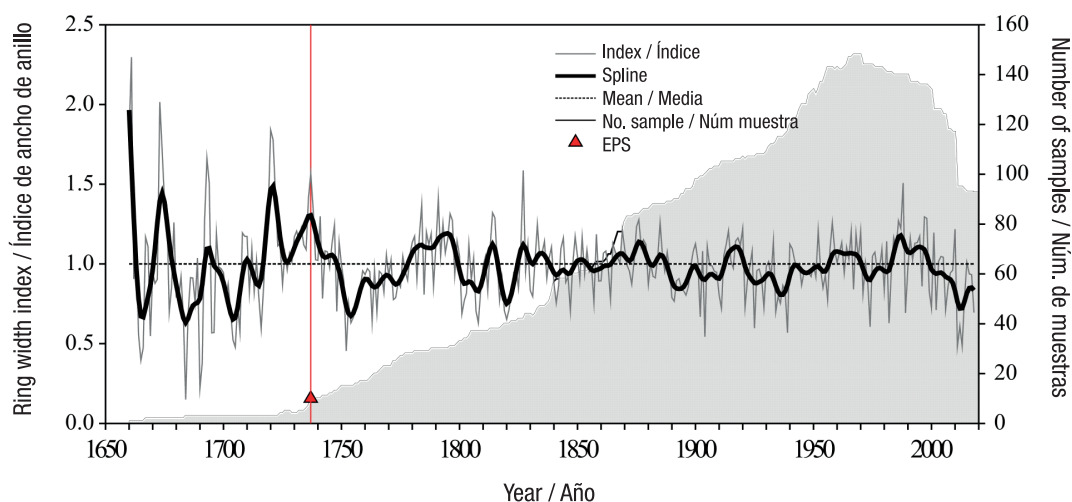


Figure 2. Composite total ring chronology of *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* and *Pinus strobiformis*. The time series shows the climate variability over the last 359 years for the western region of Chihuahua. The bottom gray line represents the annual variability; the dotted horizontal line, the mean; the black highlighted line is a 10-year spline that allows the observation of low frequency events; and the gray area indicates the sample size for each segment of the regional chronology. The red line represents an expressed population signal value (EPS) > 0.85.

Figura 2. Cronología compuesta de anillo total de *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* y *Pinus strobiformis*. La serie de tiempo muestra la variabilidad climática en los últimos 359 años para la región oeste de Chihuahua. La línea de color gris de fondo representa la variabilidad anual; la línea horizontal punteada, la media; la línea resaltada en color negro es un *spline* de 10 años que permite la observación de eventos de baja frecuencia; y el área gris indica el tamaño de muestra para cada segmento de la cronología regional. La línea en color rojo representa un valor de la señal expresada de la población (EPS) > 0.85.

of the series was statistically significant (Table 2). Two chronologies were identified: El Santuario of 156 years (1863-2018) and La Norteña of 359 years (1660-2018). A significant correlation ($r = 0.580$; $P < 0.01$) was determined between the two chronologies and a regional chronology was developed (Figure 2). This showed a expressed population signal (EPS) > 0.85 with more than 10 cores starting in 1739, a statistically robust sample size (Figure 2).

Response function

Figure 3 shows that the highest correlations between precipitation and chronologies are found with the

MathWorks Inc., 2015). Para tal efecto, se utilizaron gráficos de resolución anual de espectros de ondeleta y gráficos de coherencia de ondeleta.

Resultados

Fechado de muestras

De un total de 223 núcleos de crecimiento se lograron fechar 159 muestras (71 %) al año exacto de su formación. Los resultados de COFECHA indicaron que la intercorrelación de las series fue estadísticamente significativa (Cuadro 2). Se generaron dos cronologías: El Santuario de 156 años (1863-2018) y La Norteña de

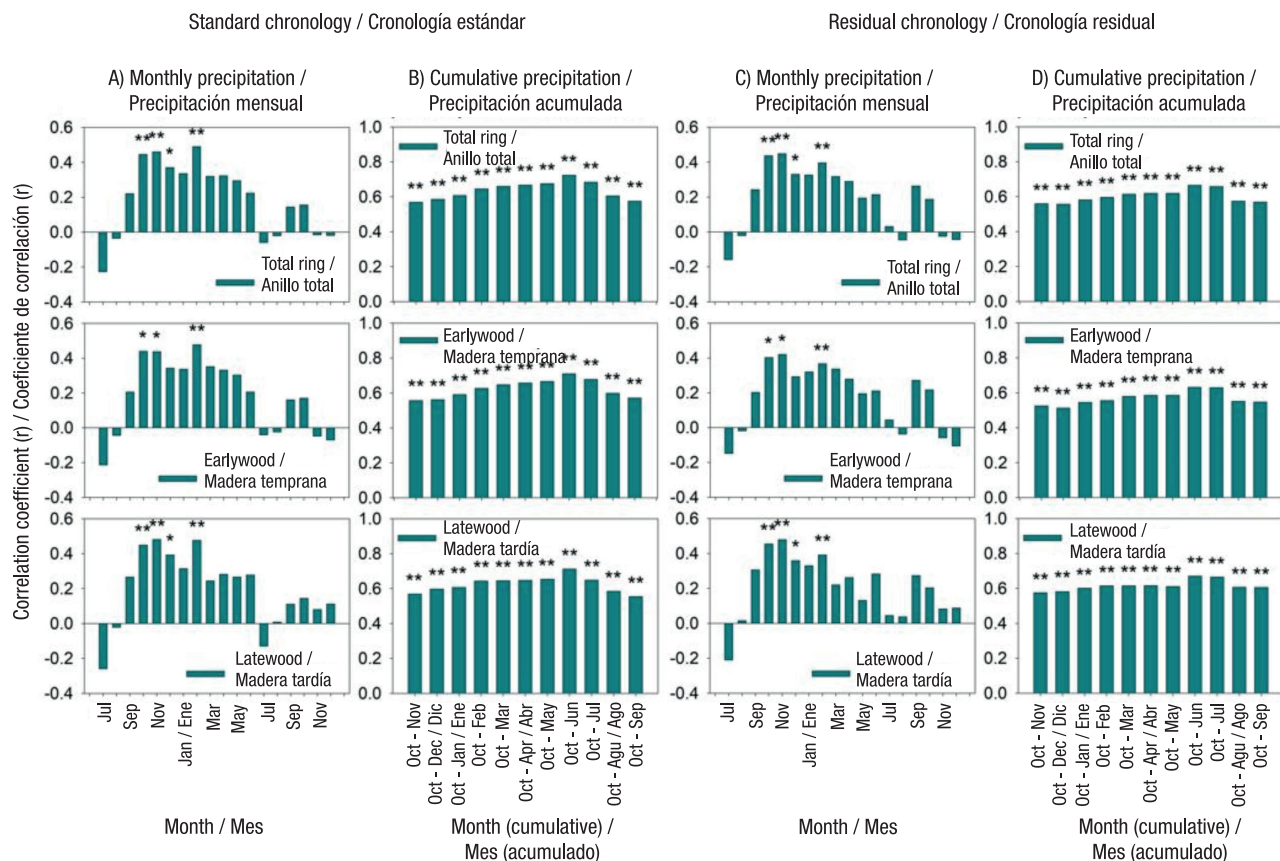


Figure 3. Response function analysis between precipitation (monthly and cumulative) and regional standard (A and B) and residual (C and D) chronology of *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* and *Pinus strobiformis* for the western region of Chihuahua. * $P < 0.05$ and ** $P < 0.01$ indicate the degree of significance of correlation between both variables.

Figura 3. Análisis de función de respuesta entre la precipitación (mensual y acumulada) y la cronología regional estándar (A y B) y residual (C y D) de *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* y *Pinus strobiformis* para la región oeste de Chihuahua. * $P < 0.05$ y ** $P < 0.01$ indican el grado de significancia de la correlación entre ambas variables.

standard version. Regarding monthly precipitation, the period from September of the previous year to June of the current year showed a positive relationship with the regional chronology of total ring, earlywood and latewood in its standard and residual version. The months of October and November of the previous year and February of the current year showed significant correlation ($P < 0.05$) with both standard and residual chronology for total ring, earlywood and latewood (Figure 3A and 3C).

In the case of cumulative precipitation, correlations were significant ($P < 0.01$) in all three indices (total ring, earlywood and latewood) throughout the year for standard and residual chronology (Figure 3B and 3D). However, the seasonal October-June cumulative precipitation period of the standard chronology recorded the highest correlation for total ring ($r = 0.73$, $P < 0.01$), earlywood ($r = 0.71$, $P < 0.01$), and latewood ($r = 0.71$, $P < 0.01$) (Figure 3B). The regional standard total ring chronology has the greatest potential to be

359 años (1660-2018). Se determinó una correlación significativa ($r = 0.580$; $P < 0.01$) entre ambas cronologías y se desarrolló una cronología regional (Figura 2). Esta indicó una señal expresada de la población (EPS) > 0.85 con más de 10 núcleos a partir del año 1739, un tamaño de muestra estadísticamente robusto (Figura 2).

Función de respuesta

La Figura 3 muestra que las mayores correlaciones entre la precipitación y las cronologías se obtienen utilizando la versión estándar. Con respecto a la precipitación mensual, el periodo que comprende desde septiembre del año previo a junio del año actual presentó relación positiva con la cronología regional de anillo total, madera temprana y tardía en su versión estándar y residual. Los meses de octubre y noviembre del año previo y febrero del año actual mostraron correlación significativa ($P < 0.05$) tanto con la cronología estándar como con la residual para anillo total, madera temprana y tardía (Figura 3A y 3C).

used as a proxy for seasonal precipitation variability in the October-June period ($r = 0.73$, $P < 0.01$).

Precipitation reconstruction

Figure 4A shows highly significant association ($r = 0.73$, $P < 0.01$) between the seasonal precipitation period October-June and the total ring width index for the common period 1980-2015. A linear regression model was developed that allowed reconstructing the variability of observed data precipitation in that period (Figure 4B). The model was as follows:

$$Y_t = -170.41 + 454.15 * X_t$$

where,

Y_t = precipitation value (mm) October-June, reconstructed for a specific t year

X_t = total ring width index for a specific t year.

En el caso de la precipitación acumulada, las correlaciones fueron significativas ($P < 0.01$) en los tres índices (anillo total, madera temprana y tardía) durante todo el año para la cronología estándar y residual (Figura 3B y 3D). No obstante, el periodo estacional de lluvia acumulada octubre-junio de la cronología estándar registró la mayor correlación para anillo total ($r = 0.73$, $P < 0.01$), madera temprana ($r = 0.71$, $P < 0.01$) y madera tardía ($r = 0.71$, $P < 0.01$) (Figura 3B). La cronología regional estándar de anillo total presenta el mayor potencial para emplearse como *proxy* de la variabilidad de la precipitación estacional del periodo octubre-junio ($r = 0.73$, $P < 0.01$).

Reconstrucción de la precipitación

La Figura 4A muestra asociación altamente significativa ($r = 0.73$, $P < 0.01$) entre el periodo de lluvia estacional octubre-junio y el índice de ancho de anillo total para

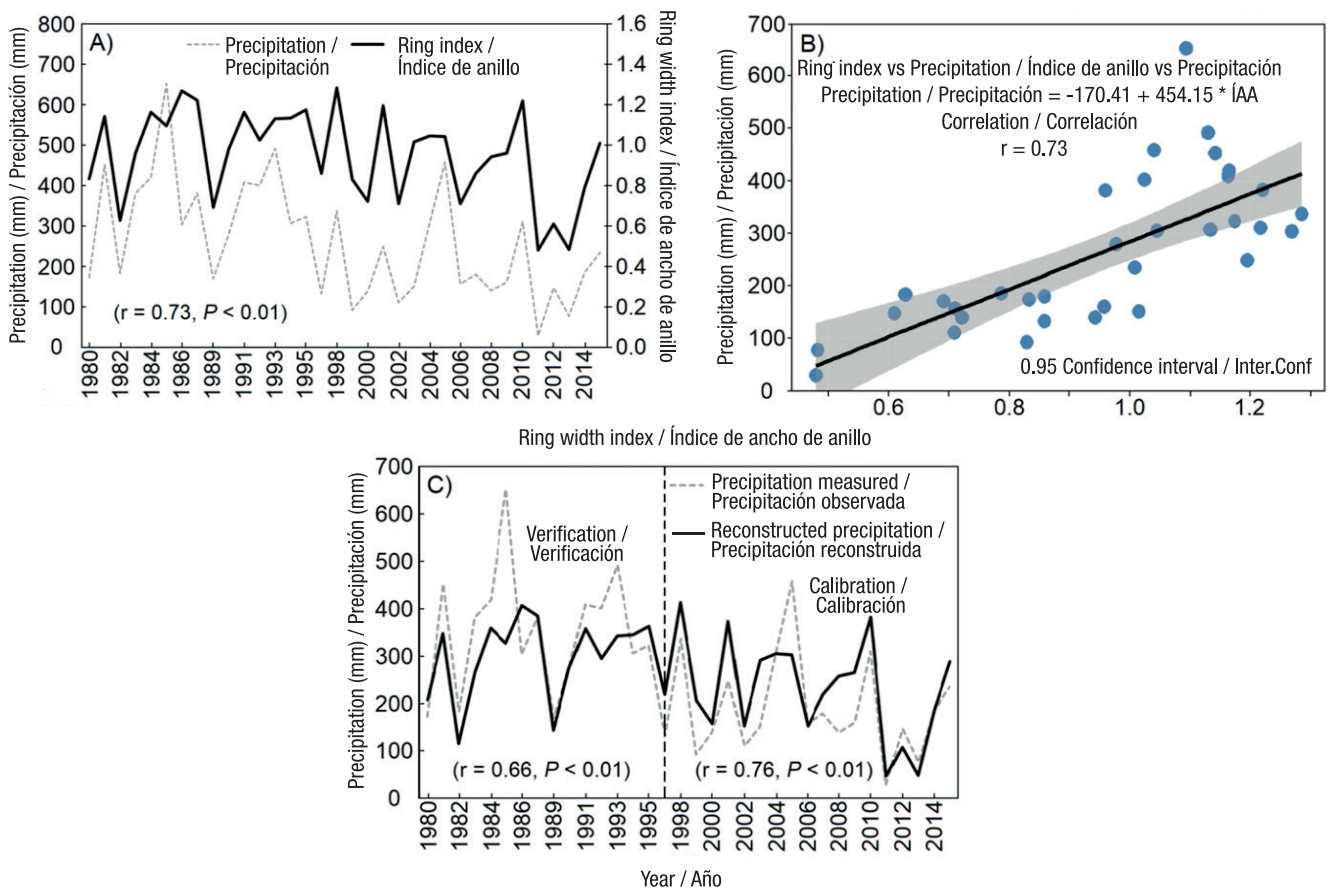


Figure 4. Association between the ring width index (RWI) of *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* and *Pinus strobiformis* and regional October-June precipitation for the period 1980-2015 in the western region of Chihuahua (A); linear regression model between both variables (B); and comparison of reconstructed October-June precipitation (solid line) and measured precipitation (dotted line) in the period 1980-2015, verification and calibration of the regression model (C).

Figura 4. Asociación entre el índice de ancho de anillo (IAA) de *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* y *Pinus strobiformis* y la precipitación regional octubre-junio del periodo 1980-2015 en la región oeste de Chihuahua (A); modelo de regresión lineal entre ambas variables (B); y comparación de la precipitación reconstruida octubre-junio (línea sólida) y la precipitación observada (línea punteada) en el periodo 1980-2015, verificación y calibración del modelo de regresión (C).

Model calibration and verification

Figure 4C indicates the variability of reconstructed precipitation for the common period of measured data (1980-2015). The model calibration process indicated highly significant correlation ($r = 0.76$, $r^2 = 0.58$, $P < 0.01$) between measured and reconstructed precipitation, and explained 58 % of the precipitation variability. On the other hand, the verification showed highly significant correlation $r = 0.66$ ($r^2 = 0.44$, $P < 0.01$), which explained 44 % of precipitation variability (Tables 3 and 4). Since both subperiods show significant correlations, the model for the total period of measured data (1980-2015) was considered statistically valid with $r = 0.75$ ($r^2 = 0.56$, $P < 0.01$) and was applied to the total chronology to reconstruct precipitation variability (Table 3).

el periodo común 1980-2015. Se generó un modelo de regresión lineal que permitió reconstruir la variabilidad de la precipitación de datos observados en dicho periodo (Figura 4B). El modelo fue el siguiente:

$$Y_t = -170.41 + 454.15 * X_t$$

donde,

Y_t = valor de la precipitación (mm) octubre-junio, reconstruido para un año específico t

X_t = índice de ancho de anillo total para un año específico t .

Calibración y verificación del modelo

La Figura 4C indica la variabilidad de la precipitación reconstruida para el periodo común de datos observados

Table 3. Calibration and statistics of the regression between October-June precipitation and total ring standard chronology index of *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* and *Pinus strobiformis* for the western part of Chihuahua.

Cuadro 3. Calibración y estadísticos de la regresión entre la precipitación octubre-junio y el índice de la cronología estándar de anillo total de *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus arizonica* y *Pinus strobiformis* para el oeste del estado de Chihuahua.

Period/ Periodo	R^2_{adj}	Coefficients/ Coeficientes		Standard error/ Error estándar		T test/ Prueba t		Probability/ Probabilidad	
		β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1	β_0	β_1
1980-1997	0.44	-136.28	463.61	155.5	148.6	-0.87	3.11	0.39	0.007
1998-2015	0.58	-110.69	342.51	65.33	71.48	-1.69	4.79	0.10	0.000
1980-2015	0.56	-170.41	454.15	74.93	76.59	-2.27	5.93	0.029	0.000

Table 4. Verification statistics for seasonal precipitation October-June for the western part of Chihuahua.

Cuadro 4. Estadísticas de verificación para la precipitación estacional octubre-junio del oeste de Chihuahua.

Period/ Periodo	Pearson correlation (r)/ Correlación de Pearson (r)	Error reduction/ Reducción del error	Sign test/ Prueba de signos	T test/ Prueba t	First significant difference/ Primera diferencia significativa
1980-1997	0.66**	0.69'	2'	4.2'	3'
1998-2015	0.76**	0.82'	4'	4.3'	3'
1980-2015	0.75**	0.55'	6'	4.7'	6'

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

Variability of reconstructed precipitation

Figure 5 shows the October-June reconstructed precipitation variability covering the period 1660-2018. The series indicates high interannual and multiannual variability with dry and wet periods that varied in extent and intensity. For the last three and a half centuries, significant frequencies ($P < 0.05$) of extreme events were determined every 50 years (Figure 6), at approximately mid-century and between the end and beginning of the century. Spatial correlation analysis between PDSI and four of the most severe droughts (1695-1707, 1751-1768, 1807-1810, 1945-1956) indicated areas of significant correlation ($P < 0.05$), showing the magnitude and geographic extent of these episodes (Figure 7).

Impact of ENSO on precipitation variability

Figure 8A shows the wavelet spectrum for the reconstructed precipitation, significant areas ($P < 0.05$) corresponding to periods of one (1902-1904, 1988-1989), three (1995-2002) and six years (2006-2018). On the other hand, Figure 8B indicates the wavelet spectrum of the ENSO phenomenon and its irregular cycle from one to seven years for the intervals 1912-

(1980-2015). El proceso de calibración del modelo indicó correlación altamente significativa ($r = 0.76$, $r^2 = 0.58$, $P < 0.01$) entre la precipitación observada y la reconstruida, y explicó 58 % de la variabilidad de la precipitación. Por su parte, la verificación mostró correlación altamente significativa $r = 0.66$ ($r^2 = 0.44$, $P < 0.01$), la cual explicó 44 % de la variabilidad de la lluvia (Cuadros 3 y 4). Dado que ambos subperiodos presentaron correlaciones significativas, el modelo para el periodo total de datos observados (1980-2015) se consideró estadísticamente válido con $r = 0.75$ ($r^2 = 0.56$, $P < 0.01$) y se aplicó a la cronología total para reconstruir la variabilidad de la precipitación (Cuadro 3).

Variabilidad de la precipitación reconstruida

La Figura 5 muestra la variabilidad de la precipitación reconstruida octubre-junio que comprende el periodo 1660-2018. La serie indica alta variabilidad interanual y multianual con periodos secos y húmedos que variaron en extensión e intensidad. Para los últimos tres siglos y medio se determinaron frecuencias significativas ($P < 0.05$) de eventos extremos cada 50 años (Figura 6), a mediados y entre finales e inicio de siglo, aproximadamente. El análisis de correlación espacial

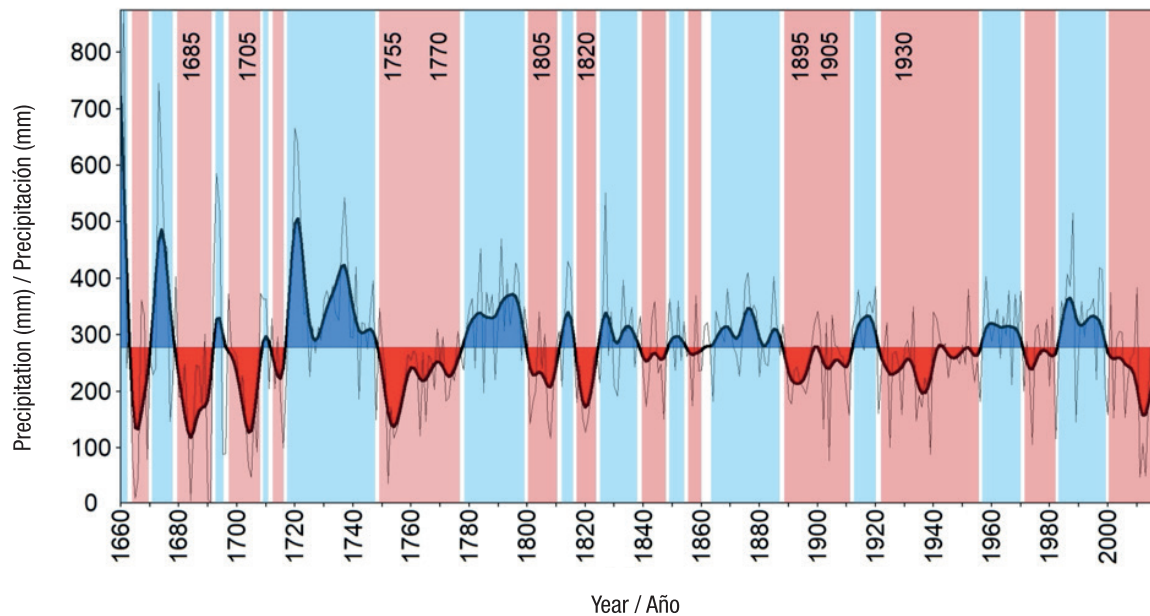


Figure 5. Reconstruction of winter-spring precipitation (359 years) for the western region of Chihuahua. The gray line at the bottom indicates annual variability and the smoothed 10-year curve, highlighted in black, indicates low-frequency events (in blue dry periods and in red wet periods). Average precipitation is 277.4 mm.

Figura 5. Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (359 años) para el oeste de Chihuahua. La línea gris del fondo indica la variabilidad anual y la curva suavizada de 10 años, resaltada en negro, permite la observación de eventos de baja frecuencia (en azul periodos secos y en rojo periodos húmedos). La lluvia promedio es de 277.4 mm.

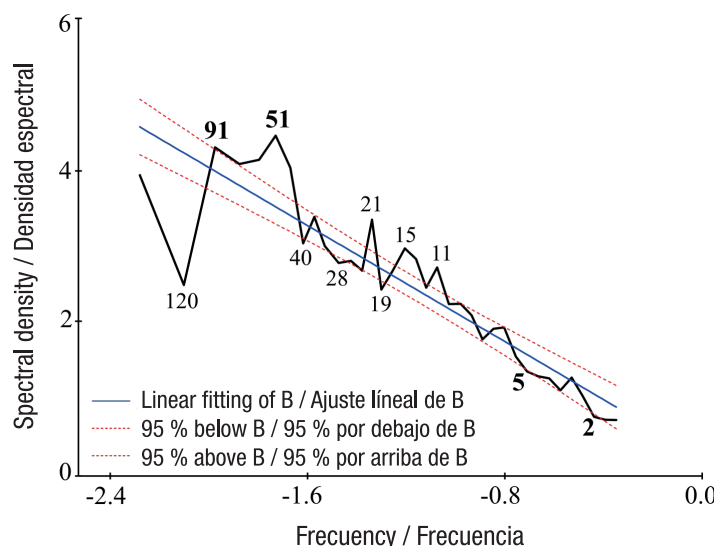


Figure 6. Spectral analysis of reconstructed regional precipitation for the western part of Chihuahua. Numbers indicate the frequencies reported in the series; in bold, the frequencies of 2 and 5 years indicate relationship with the ENSO phenomenon and the frequencies of 51 and 91 years correspond to extreme events with cycles of about 50 years.

Figura 6. Análisis espectral de la precipitación regional reconstruida para el oeste de Chihuahua. Los números indican las frecuencias observadas en la serie; en negritas, las frecuencias de 2 y 5 años indican relación con el fenómeno ENSO y las frecuencias de 51 y 91 años corresponden a eventos extremos con ciclos de 50 años, aproximadamente.

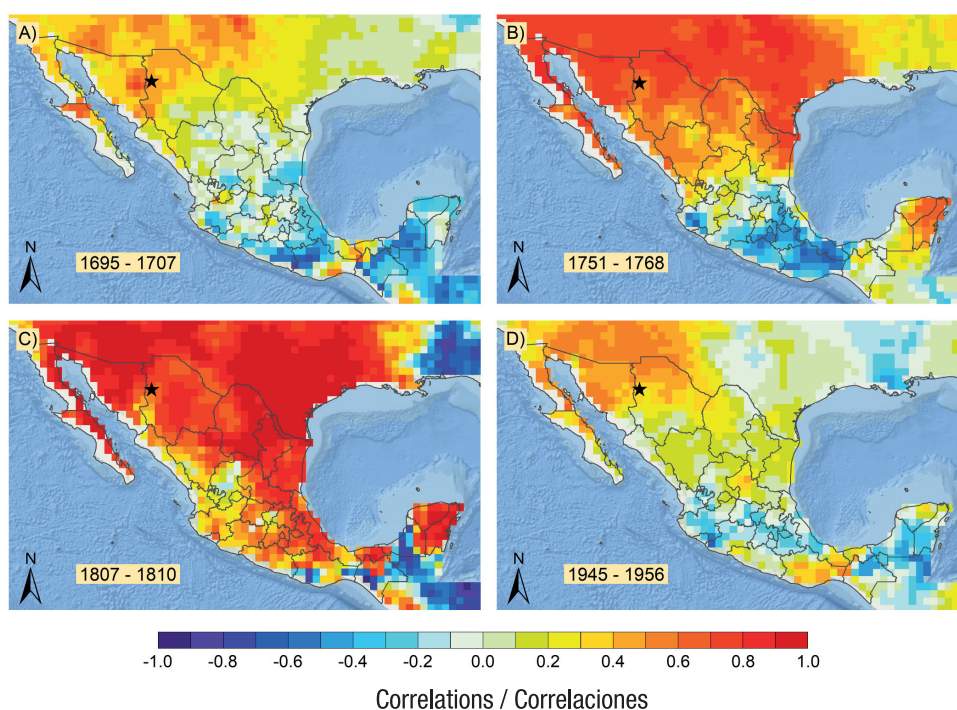


Figure 7. Spatial correlation between reconstructed precipitation and Palmer Drought Severity Index (PDSI) for the months of June, July and August (Stahle et al., 2016) for four extreme drought events. The star indicates the study area.

Figura 7. Correlación espacial entre la precipitación reconstruida y el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) de los meses junio, julio y agosto (Stahle et al., 2016) para cuatro eventos extremos de sequía. La estrella indica el área de estudio.

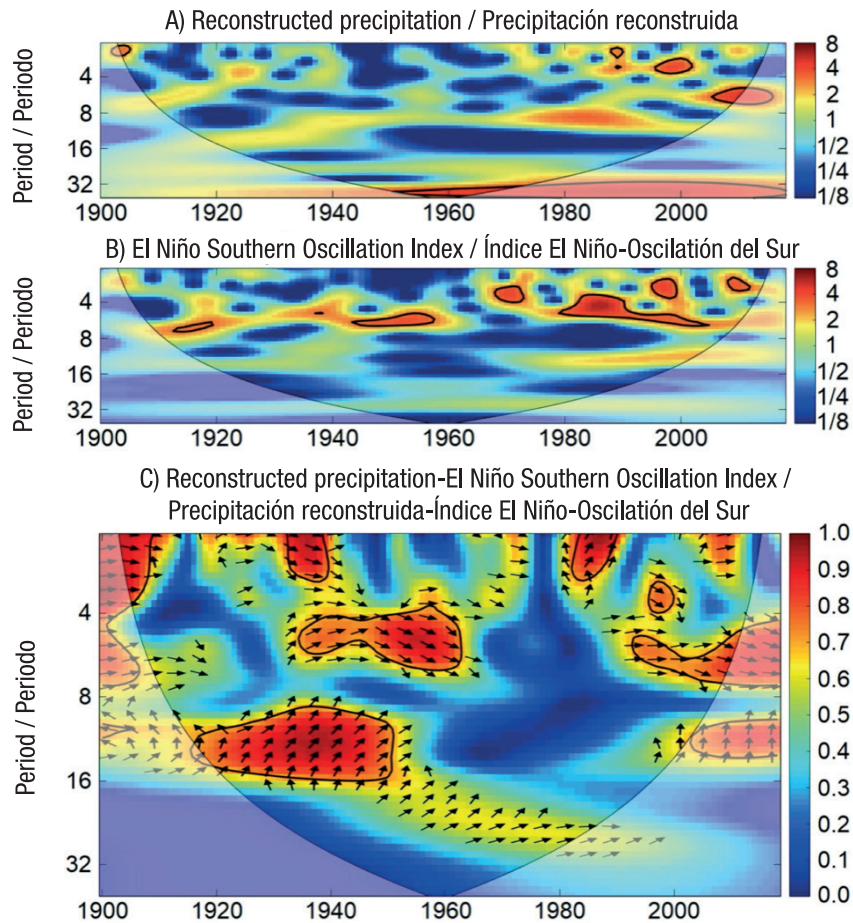


Figure 8. Wavelet spectra for the reconstructed precipitation (A) and the ENSO 3.4 index (B). Wavelet coherence analysis between the reconstructed precipitation series and the ENSO 3.4 index (C). Areas in red delimited by a black line indicate a significant relationship ($P < 0.05$) between the two variables. Horizontal arrows to the right indicate that both phenomena are in phase (positive relationship). On the other hand, arrows to the left indicate an anti-phase or negative relationship.

Figura 8. Espectro de ondeleta para la precipitación reconstruida (A) y el índice ENSO 3.4 (B). Análisis de coherencia de ondeletas entre la serie de precipitación reconstruida y el índice ENSO 3.4 (C). Las áreas en color rojo delimitadas por una línea negra indican una relación significativa ($P < 0.05$) entre las dos variables. Las flechas horizontales hacia la derecha indican que ambos fenómenos están en fase (relación positiva). Por el contrario, las flechas hacia la izquierda señalan una relación en antifase o relación negativa.

1920, 1942-1958, 1968-1973, 1978-2006 and 2008-2015. Spectral wavelet coherence analysis determined significant ($P < 0.05$) areas of in-phase relationship between the reconstructed precipitation and the Niño 3.4 index for the period 1900-2018 at frequencies of one to seven years (Figure 8C). Significant ($P < 0.05$) periods in phase were determined for the intervals 1900-1910, 1932-1940, 1934-1963, 1920-1950 and 1995-2018 at frequencies of 1-7, 1-2, 4-7, 10-16 and 5-7 years, respectively.

Discussion

Series sensitivity

The regional chronology generated exceeds the correlation parameter determined by the COFECHA

entre PDSI y cuatro de las sequías más severas (1695-1707, 1751-1768, 1807-1810, 1945-1956) indicó áreas de correlación significativa ($P < 0.05$), mostrando la magnitud y la extensión geográfica de estos episodios (Figura 7).

Influencia del ENSO sobre la variabilidad de la lluvia

La Figura 8A muestra el espectro de ondeleta para la precipitación reconstruida, áreas significativas ($P < 0.05$) que corresponden a periodos de uno (1902-1904, 1988-1989), tres (1995-2002) y seis años (2006-2018). Por otra parte, la Figura 8B indica el espectro de ondeleta del fenómeno ENSO y su ciclo irregular de uno a siete años para los intervalos 1912-1920, 1942-1958, 1968-1973, 1978-2006 y 2008-2015. El análisis espectral de coherencia de ondeletas determinó áreas significativas

program (Holmes, 1983), which establishes $r = 0.3281$ as the minimum significant correlation ($P < 0.01$) between growth series. This indicates that the species used have good sensitivity to environmental changes, showing potential for the reconstruction of regional climate variability.

Common variability of the series

P. menziesii, *P. arizonica* and *P. strobiformis* all show common climate variability through time, suggesting that annual growth is influenced by meteorological conditions modulating the regional climate. Multiple studies have found a common response between species from the Sierra Madre Oriental (Cerano-Paredes et al., 2011a; Cerano-Paredes, Villanueva-Díaz, Valdez-Cepeda, Méndez-González, & Constante-García, 2011) and the Sierra Madre Occidental (Chávez-Gándara et al., 2017; Irby et al., 2013; Villanueva-Díaz et al., 2015), even when they are separated; this implies that species capture the variability of larger scale climatic phenomena. A similar fluctuation in growth among species is due to the common limiting factor that is precipitation (Fritts, 2001).

Response of chronology to precipitation variability

Precipitation significantly influences the growth of tree species in the western part of Chihuahua, especially the seasonal October-June precipitation. Villanueva-Díaz et al. (2015) report similar results in the northwestern region of Chihuahua. The response of conifer growth to winter-spring precipitation in the northwestern part of Mexico and southwestern United States has been corroborated by several paleoclimatic studies (Cerano-Paredes et al., 2011a, 2012; Chávez-Gándara et al., 2017; Cleaveland et al., 2003; D'Arrigo & Jacoby, 1991). An explanation for the above is that rainfall during winter is usually of low intensity, favoring infiltration and soil saturation; meanwhile, low evapotranspiration in those months makes water saturate the soil and be available for the following tree growth period (Zywiec et al., 2017). Several paleoclimatic studies have documented and discussed the response of conifer growth to winter-spring precipitation in Chihuahua (Cerano-Paredes et al., 2009; Irby et al., 2013; Villanueva-Díaz et al., 2015). This common species response has made it possible to reconstruct droughts and analyze their impact at national level (Stahle et al., 2011).

Reconstructed droughts

There is little historical information available on the occurrence of droughts and their ravages in Mexico; with respect to the northern part, records begin in the second half of the eighteenth century when the

($P < 0.05$) de relación en fase entre la precipitación reconstruida y el índice Niño 3.4 para el periodo 1900-2018 en frecuencias de uno a siete años (Figura 8C). Se determinaron periodos significativos ($P < 0.05$) en fase para los intervalos 1900-1910, 1932-1940, 1934-1963, 1920-1950 y 1995-2018 con frecuencia de 1-7, 1-2, 4-7, 10-16 y 5-7 años, respectivamente.

Discusión

Sensibilidad de las series

La cronología regional generada supera el parámetro de correlación determinado por el programa COFECHA (Holmes, 1983), el cual establece $r = 0.3281$ como mínima correlación significativa ($P < 0.01$) entre series de crecimiento. Lo anterior señala que las especies empleadas poseen buena sensibilidad a los cambios ambientales, presentando potencial para fines de reconstrucción de la variabilidad climática regional.

Variabilidad común de las series

P. menziesii, *P. arizonica* y *P. strobiformis* muestran variabilidad climática común a través del tiempo, lo que sugiere que el crecimiento anual está influenciado por condiciones meteorológicas que modulan el clima regional. Múltiples trabajos han encontrado una respuesta común entre especies de la Sierra Madre Oriental (Cerano-Paredes et al., 2011a; Cerano-Paredes, Villanueva-Díaz, Valdez-Cepeda, Méndez-González, & Constante-García, 2011) y la Sierra Madre Occidental (Chávez-Gándara et al., 2017; Irby et al., 2013; Villanueva-Díaz et al., 2015), aun cuando están separadas; esto implica que las especies captan la variabilidad de fenómenos climáticos de mayor escala. La fluctuación similar del crecimiento entre especies obedece al factor limitante común que es la precipitación (Fritts, 2001).

Respuesta de la cronología a la variabilidad de la precipitación

La precipitación influye de forma significativa en el crecimiento de las especies arbóreas del oeste de Chihuahua, particularmente la lluvia estacional octubre-junio. Villanueva-Díaz et al. (2015) reportan resultados similares en la región norponiente de Chihuahua. La respuesta del crecimiento de coníferas a la precipitación invierno-primavera en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos ha sido corroborada por diversos estudios paleoclimáticos (Cerano-Paredes et al., 2011a, 2012; Chávez-Gándara et al., 2017; Cleaveland et al., 2003; D'Arrigo & Jacoby, 1991). Una explicación a lo anterior es que las lluvias durante el invierno suelen ser de poca intensidad, favoreciendo la infiltración y la saturación del suelo; a su vez, la baja evapotranspiración en esos meses hace

area was colonized and populated (García-Acosta, 1993). In Chihuahua, the records report drought affectations during several periods: in the mid-1720s, the late 1730s and early 1740s, between 1748 and 1766, in the first three years of the 1770s, in the mid-1780s, the first two decades of the 19th century, between 1890 and 1897, and during the 20th century in the 1930s, 1950s and 1990s (Endfield & Fernández-Tejedo, 2006). The present reconstruction recorded all reported events except for the period from the late 1730s to the early 1740s, which validates the annual resolution quality of the reconstruction.

Drought in the late 17th and early 18th centuries (1695-1707) has been reported in other paleoclimatic reconstructions from Chihuahua (Villanueva-Díaz et al., 2015) and Durango (Cerano-Paredes et al., 2012); moreover, PDSI spatial correlation analysis shows that the greatest intensity of this drought was concentrated in those states (Figure 7A). Drought affectation in the mid-18th century, with a duration of almost 20 years (1751-1768), extended over a large part of northern Mexico and southern United States (Figure 7B), corroborating that reported by Cook et al. (2009) and Cerano-Paredes et al. (2011a). On the other hand, the effects of one of the widely documented droughts known as “El Año del Hambre (1785-1786)”, considered the most severe event in the history of agriculture in New Spain (Therrell, Stahle, Villanueva-Díaz, Cornejo-Oviedo, & Cleaveland 2006), were less severe in the northern part compared to central Mexico, a region that suffered from famine and epidemics, with more than 300 000 people dying (Florescano, 1986).

The beginning of the armed struggle for Mexican independence was preceded by droughts and bad harvests in 1807, 1808 and 1809, which, in 1810, caused excessively high maize prices, food shortages and crises throughout the viceroyalty (O’Hara & Metcalfe, 1997). This created unemployment in the countryside and cities, social tension in the populations, epidemics and popular riots (Florescano, 1980). The reconstruction of precipitation variability for the western part of Chihuahua, as well as the spatial correlation analysis with the PDSI (Figure 7C) confirm this information, as it shows that the entire territory of New Spain was severely affected.

For the last years of the period known as “El Porfiriato” (1908-1911), below-average precipitation was again reconstructed. This drought caused massive food shortages, which subsequently led to social unrest (Irby et al., 2013). Florescano (1980) points out a close relationship between the drought conditions that affected mainly Querétaro and Hidalgo in the center of the country and Chihuahua, Coahuila and Nuevo León in the northern part, with the outbreak of the

que el agua sature el suelo y esté disponible para el siguiente periodo de crecimiento de los árboles (Zywiec et al., 2017). Varios estudios paleoclimáticos han documentado y discutido la respuesta del crecimiento de coníferas a la precipitación invierno-primavera en Chihuahua (Cerano-Paredes et al., 2009; Irby et al., 2013; Villanueva-Díaz et al., 2015). Esta respuesta común de las especies ha permitido reconstruir sequías y analizar su impacto a nivel nacional (Stahle et al., 2011).

Sequías reconstruidas

La disponibilidad de información histórica sobre la ocurrencia de sequías y sus estragos es escasa en México; en lo que respecta a la parte norte, la documentación inicia a partir de la segunda mitad del siglo XVIII cuando el área fue colonizada y poblada (García-Acosta, 1993). En Chihuahua, los registros reportan afectaciones por sequías durante varios periodos: a mediados de la década de 1720, finales de 1730 y principios de 1740, entre 1748 y 1766, en los primeros tres años de la década de 1770, a la mitad de 1780, primeros dos decenios del siglo XIX, entre 1890 y 1897, y durante el siglo XX en las décadas de 1930, 1950 y 1990 (Endfield & Fernández-Tejedo, 2006). La presente reconstrucción registró todos los eventos reportados a excepción del periodo de finales de 1730 a principios de 1740, lo cual valida la calidad de resolución anual de la reconstrucción.

La sequía a finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII (1695–1707) se ha reportado en otras reconstrucciones paleoclimáticas de Chihuahua (Villanueva-Díaz et al., 2015) y Durango (Cerano-Paredes et al., 2012); además, el análisis de correlación espacial de PDSI muestra que la mayor intensidad de esta sequía se concentró en dichos estados (Figura 7A). La afectación de la sequía a mediados del siglo XVIII, con una duración de casi 20 años (1751-1768), se extendió por gran parte del norte de México y sur de Estados Unidos (Figura 7B), corroborando lo reportado por Cook et al. (2009) y Cerano-Paredes et al. (2011a). Por otra parte, los efectos de una de las sequías ampliamente documentadas conocida como “El Año del Hambre (1785-1786)”, considerada como el evento más severo en la historia de la agricultura de la Nueva España (Therrell, Stahle, Villanueva-Díaz, Cornejo-Oviedo, & Cleaveland 2006), fueron menos severos en la parte norte comparada con el centro de México, región que padeció hambruna y epidemias, muriendo más de 300 000 personas (Florescano, 1986).

El inicio de la lucha armada por la independencia de México fue precedido por sequías y malas cosechas en 1807, 1808 y 1809, las cuales, en 1810, originaron precios del maíz elevados excesivamente, escasez de alimentos y crisis en todo el virreinato (O’Hara & Metcalfe, 1997).

Mexican Revolution, key locations where insurrection took place.

The droughts of the 1930s, 1950s and 1990s have been recorded in other paleoclimatic reconstructions of Chihuahua (Cerano-Paredes et al., 2009; Irby et al., 2013; Villanueva-Díaz et al., 2015) recording water shortages, crop and livestock loss. Spatial correlation analysis (Figure 7D) shows that the mid-20th century drought impacted much of the southwestern United States and northern Mexico (Cleaveland et al., 2003; O'Hara & Metcalfe, 1997). This episode caused a great economic crisis in the rural areas of northern Mexico, causing tens of thousands of farmers to migrate to large Mexican cities and to the United States in search of opportunities (Florescano, 1980).

Severe droughts have been observed every mid-century and between the end or beginning of each century, a recurrence of 50 years (Figure 6), which synchronizes with results from other studies for both central (Therrell et al., 2006) and northern Mexico (Cerano-Paredes et al., 2011b, 2012; Chávez-Gándara et al., 2017). The most severe drought episodes reconstructed for the western part of Chihuahua synchronize with events recorded in most of northern and central Mexico and southern United States, with variations in intensity between regions. This can be attributed to large-scale climate phenomena affecting geographic regions with different intensity.

ENSO impact on precipitation

ENSO strongly influences the interannual variability of the winter-spring climate of northern Mexico (Magaña-Rueda, 1999; Stahle et al., 1998). The prolonged dry and wet regimes in this region reflect the high relationship between decadal variability and annual variance in both cool and warm season precipitation (Cleaveland et al., 2003). Cool-season precipitation in northern Mexico and the southwestern United States correlates significantly with ENSO (Magaña-Rueda, Vázquez, Pérez, & Pérez, 2003). This teleconnection of ENSO with the climate of northern Mexico is clearly recorded in the growth of trees in the Sierra Madre Occidental (Cerano-Paredes et al., 2009; Chávez-Gándara et al., 2017; Cleaveland et al., 2003).

The October-June precipitation reconstruction contains a strong ENSO signal in the time and frequency domains. Spectral coherence analysis shows that the precipitation variability is significantly modulated by ENSO at different time and frequency scales over the last 100 years (Figure 8). Significant coherence was determined between the reconstructed precipitation and the Niño 3.4 index. According to Gergis and Fowler (2009), the last three

Esto creó desempleo en el campo y en las ciudades, tensión social en las poblaciones, epidemias y motines populares (Florescano, 1980). La reconstrucción de la variabilidad de lluvia para el oeste de Chihuahua, así como el análisis de correlación espacial con el PDSI (Figura 7C) confirman esta información, ya que muestra que todo el territorio de la Nueva España fue severamente afectado.

Para los últimos años del periodo conocido como "El Porfiriato" (1908-1911), nuevamente se reconstruyó una precipitación por debajo de la media. Esta sequía causó escasez masiva de alimentos, lo que llevó posteriormente al descontento social (Irby et al., 2013). Florescano (1980) señala relación estrecha entre las condiciones de sequía que afectaron principalmente Querétaro e Hidalgo en el centro del país y Chihuahua, Coahuila y Nuevo León en la parte norte, con el estallido de la Revolución Mexicana, lugares clave donde se gestó dicha insurrección.

Las sequías de las décadas de 1930, 1950 y 1990 han sido registradas en otras reconstrucciones paleoclimáticas de Chihuahua (Cerano-Paredes et al., 2009; Irby et al., 2013; Villanueva-Díaz et al., 2015) documentando escasez de agua, pérdida de cosechas y ganado. El análisis de correlación espacial (Figura 7D) muestra que la sequía de mediados del siglo XX impactó gran parte del suroeste de Estados Unidos y la región norte de México (Cleaveland et al., 2003; O'Hara & Metcalfe, 1997). Este episodio ocasionó gran crisis económica en el medio rural del norte del país, provocando que decenas de miles de campesinos emigraran a las grandes ciudades mexicanas y a Estados Unidos en búsqueda de oportunidades (Florescano, 1980).

Las sequías severas se han observado cada mediados de siglo y entre finales o inicio de cada siglo, una recurrencia de 50 años (Figura 6), lo cual sincroniza con resultados de otros estudios tanto para el centro (Therrell et al., 2006) como para el norte del país (Cerano-Paredes et al., 2011b, 2012; Chávez-Gándara et al., 2017). Los episodios más severos de sequías reconstruidos para la zona oeste de Chihuahua sincronizan con eventos registrados en la mayor parte del norte y centro de México y sur de Estados Unidos, con variaciones de intensidad entre regiones. Lo anterior se puede atribuir a fenómenos climáticos de gran escala que afectan con diferente intensidad las regiones geográficas.

Influencia de ENSO sobre la precipitación

ENSO influye fuertemente en la variabilidad interanual del clima invierno-primavera del norte de México (Magaña-Rueda, 1999; Stahle et al., 1998). Los regímenes prolongados de sequía y humedad en esta

most important drought events in this northern region of the country at the beginning, middle and end of the 20th century and the beginning of the 21st century are significantly related to ENSO. Trenberth (1997) notes that two of the most intense ENSO events in its cold phase occurred in the mid-20th century (1950-1951 and 1954-1956) and caused significant reductions in precipitation and severe droughts in a large part of northern Mexico, forcing tens of thousands of farmers to migrate (Florescano, 1980).

Conclusions

The reconstruction of 359 years of October-June precipitation variability for the western part of Chihuahua has provide an analysis of the recurrence of extreme events every 50 years and the influence of ENSO on the hydroclimatology of the region. Currently, thanks to technological advances in ENSO monitoring, its behavior can be known in advance and, consequently, the positive or negative impact it will have on the region, which is related to a greater or lesser recharge of aquifers. The generation of knowledge on climate variability for this region provides greater elements on an annual and multidecadal scale to contribute to the sustainable management of natural resources, especially the water that is captured in these forests and drains to the Yaqui river basin, a necessary resource for the agricultural and livestock development of the region which thousands of people need for their survival.

Acknowledgments

This research was funded under the project “Procesos de mitigación del impacto por cambio climático en la agricultura del sur de Sonora” with code 1450034669. Thanks to Área de Protección de Flora y Fauna “Campo Verde” for granting permission to access and for helping during the development of the research. Thanks to Ing. José Luis González Castañeda, Ing. Edgar Guzmán Arreola and Jorge Adrián Ochoa Chacón for their valuable collaboration during the field study.

End of English version

References / Referencias

Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Fulé, P. Z., Arreola-Ávila, J. G., Sánchez-Cohen, I., & Valdez-Cepeda, R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27–44. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712009000200002

región reflejan la alta relación entre la variabilidad decenal y la varianza anual tanto en la precipitación de la estación fría como en la cálida (Cleaveland et al., 2003). La precipitación en la estación fría en el norte de México y el suroeste de Estados Unidos se correlaciona significativamente con ENSO (Magaña-Rueda, Vázquez, Pérez, & Pérez, 2003). Esta teleconexión de ENSO con el clima del norte de México se registra claramente en el crecimiento de los árboles de la Sierra Madre Occidental (Cerano-Paredes et al., 2009; Chávez-Gándara et al., 2017; Cleaveland et al., 2003).

La reconstrucción de la precipitación octubre-junio contiene una fuerte señal de ENSO en los dominios de tiempo y frecuencia. El análisis espectral de coherencia de ondeletas muestra que la variabilidad de la precipitación es modulada de forma significativa por ENSO a diferentes escalas de tiempo y frecuencia en los últimos 100 años (Figura 8). Se determinó una coherencia significativa entre la precipitación reconstruida y el índice Niño 3.4. De acuerdo con Gergis y Fowler (2009), los últimos tres eventos de sequía más importantes en esta región del norte del país a inicio, mediados y finales del siglo XX e inicio del siglo XXI presentan relación significativa con ENSO. Trenberth (1997) señala que dos de los eventos más intensos del ENSO en su fase fría se registraron a mediados del siglo XX (1950-1951 y 1954-1956) y provocaron reducciones importantes en la precipitación y sequías severas en gran parte del norte de México, obligando a decenas de miles de campesinos a emigrar (Florescano, 1980).

Conclusiones

La reconstrucción de 359 años de la variabilidad de la precipitación octubre-junio, para la parte oeste del estado de Chihuahua, ha permitido el análisis de la recurrencia de eventos extremos cada 50 años y la influencia de ENSO en la hidroclimatología de la región. Actualmente, gracias al avance tecnológico en el monitoreo de ENSO, su comportamiento se puede conocer con antelación y, por consiguiente, el impacto positivo o negativo que tendrá en la región, lo cual está relacionado con una mayor o menor recarga de los acuíferos. La generación de conocimiento sobre la variabilidad climática para esta región brinda mayores elementos a escala anual y multidecadal para contribuir a una gestión sustentable de los recursos naturales; en especial, el agua que se capta en estos bosques y drena a la cuenca del río Yaqui, recurso necesario para el desarrollo agrícola y ganadero de la región del cual dependen miles de personas.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada a través del proyecto “Procesos de mitigación del impacto por cambio

- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Constante-García, V., González-Barrios J. L., & Estrada-Ávalos J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 7–23. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322012000200002
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Cornejo-Oviedo, H. E., Sánchez-Cohen, I., & Constante-García, V. (2011a). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 33–47. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322011000200004
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Méndez-González, J., & Constante-García, V. (2011b). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 235–249. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000800006
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., & Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387–399. doi: 10.4067/S0717-92002017000200016
- Cleaveland, M. K., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Villanueva-Díaz, J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climate Change*, 59, 369–388. doi: 10.1023/A:1024835630188
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2019). Portal de geoinformación. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cook, E. R. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37–59. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10150/261788>
- Cook, E. R., Seager, R., Heim Jr, R. R., Vose, R. S., Herweijer, C., & Woodhouse, C. (2009). Megadroughts in North America: placing IPCC projections of hydroclimatic change in a long-term palaeoclimate context. *Journal of Quaternary Science*, 25(1), 48–61. doi: 10.1002/jqs.1303
- D'Arrigo, R. D., & Jacoby, G. C. (1991). A 1000-year record of winter precipitation from northwestern New Mexico, USA: A reconstruction from tree-rings and its relation to El Niño and the Southern Oscillation. *The Holocene*, 1(2), 95–101. doi: 10.1177/095968369100100201
- Endfield, G. H., & Fernández-Tejedo, I. (2006). Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climate Change*, 75, 391–419. doi: 10.1007/s10584-006-3492-7
- climático en la agricultura del sur de Sonora” con clave 1450034669. Gracias a la dirección del Área de Protección de Flora y Fauna “Campo Verde” por el permiso para ingresar y el apoyo durante el desarrollo de la investigación. Al Ing. José Luis González Castañeda, Ing. Edgar Guzmán Arreola y Jorge Adrián Ochoa Chacón, nuestro agradecimiento por su valioso apoyo durante el trabajo de campo.

Fin de la versión en español

- Florescano, E. M. (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*. México: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Florescano, E. M. (1986). *Precios del maíz y crisis agrícolas en México: 1708-1810*. México: Editorial Era.
- Fritts, H.C. (2001). *Tree rings and climate*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press.
- García, E. (1970). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- García-Acosta, V. (1993). Las sequías históricas de México. *Desastres y sociedad*. *Desastres y Sociedad*, 1, 1–18. Retrieved from <https://www.desenredando.org/public/revistas/dys/rdys01/dys1-LSHM-oct-24-2001.pdf>
- Gergis, J. L., & Fowler, A. M. (2009). A history of ENSO events since A.D. 1525: implications for future climate change. *Climate Change*, 92, 343–387. doi: 10.1007/s10584-008-9476-z
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 351–403. doi: 10.21829/ABM100.2012.40
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57(2), 205–221. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10150/251654>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2019). *Resumen para responsables de políticas. Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. Suiza: Author. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf
- Guibal, F., & Guiot, J. (2021). Dendrochronology. In G. Ramstein, A. Landais, N. Bouttes, P. Sepulchre, & A. Govin (Eds.), *Paleoclimatology* (pp. 117–122). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-24982-3_8

- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43(1), 69–78. doi: 10.1016/j.ecoleng.2008.01.004
- Holmes, R. L. (2001). Dendrochronology program library. Retrieved from <https://www.ltrr.arizona.edu/software.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas. Retrieved from http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- Irby, C. M., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., & Villanueva-Díaz, J. (2013). Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques*, 19(1), 93–105. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61727444007>
- Lüttge, U. (2017). From dendrochronology and dendroclimatology to dendrogeochemistry. *Trees*, 31, 1743–1744. doi: 10.1007/s00468-017-1608-5
- Magaña-Rueda, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330. Retrieved from http://areas.geofisica.unam.mx/geofisica_internacional/anteriores/2003/03/magana.pdf
- Magaña-Rueda, V. O. (1999). *Los impactos de El Niño en México*. México: SEP-CONACYT. Retrieved from <http://centro.paot.org.mx/index.php/porinstituciones/otros-organismos/73-varios/745-los-impactos-de-el-nino-en-mexico>
- Magaña-Rueda, V. O., & Neri, C. (2012). Cambio climático y sequías en México. *Ciencia*, 63(4), 26–35. Retrieved from http://revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/63_4/PDF/sequiasMexico.pdf
- O'Hara, S. L., & Metcalfe, S. E. (1997). The climate of Mexico since the Aztec period. *Quaternary International*, 43/44, 25–31. doi: 10.1016/S1040-6182(97)00017-7
- Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., ...Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11, 226–233. doi: 10.1038/s41558-020-00972-w
- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., & Rowell, D. P. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, 108(D14). doi: 10.1029/2002JD002670
- Reyes-Gómez, V. M., Díaz, S. C., Brito-Castillo, L., & Núñez-López, D. (2013). ENSO drought effects and their impact in the ecology and economy of the state of Chihuahua, Mexico. In A. Yáñez-Arancibia, & R. Dávalos-Sotelo (Eds.), *Ecological dimensions for sustainable socio economic development* (pp. 102–117). USA: WIT Press. Retrieved from <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/9781845647568/9781845647568007FU1.pdf>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2019). Información climatológica. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- Speer, J. H. (2010). *Fundamentals of tree-ring research*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press. doi: 10.1002/gea.20357
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Burns, J. N., ...Howard, I. M. (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., D'Arrigo, R. D., Krusic, P. J., Cleaveland, M. K., Cook, E. R., Allan, R. J., ...Thompson, L. G. (1998). Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2137–2152. doi: 10.1175/1520-0477(1998)079<2137:EDROTS>2.0.CO;2
- Stahle, D. W., Villanueva-Díaz, J., Burnette, D. J., Cerano-Paredes, J., Heim Jr., R. R., Fye, F. K., ...Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38(5), L05703. doi: 10.1029/2010GL046472
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. Tucson, AZ, USA: The University of Arizona Press.
- Terán-Cuevas, A. R., Gutiérrez-Castillo, M. E., & Davydova-Belitskaya, V. (2010). *Escenarios de lluvia en México*. México: Instituto Politécnico Nacional. Retrieved from <https://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/23294>
- The MathWorks Inc. (2015). MATLAB. Natick, MA, USA: The MathWorks Inc.
- Therrell, M. D., Stahle, D. W., Villanueva-Díaz, J., Cornejo-Oviedo, H. E., & Cleaveland, M. K. (2006). Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474–2001. *Climate Change*, 74, 493–504. doi: 10.1007/s10584-006-6865-z
- Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771–2777. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Fulé, P. Z., Cortés-Montano, C., Vázquez-Selem, L., Yocom, L. L., & Ruiz-Corral, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas*, 87, 141–153. doi: 10.14350/ig.44485
- Zywiec, M., Muter, E., Zielonka, T., Delibes, M., Calvo, G., & Fedriani, J. M. (2017). Long-term effect of temperature and precipitation on radial growth in a threatened thermo-Mediterranean tree population. *Trees*, 31, 491–501. doi: 10.1007/s00468-016-1472-8