

VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA HISTÓRICA DEL NORTE DE MÉXICO INFERIDA CON ANILLOS DE CRECIMIENTO DE DOUGLAS-FIR*

DOUGLAS-FIR'S HISTORICAL HYDROCLIMATIC VARIABILITY IN NORTHERN MEXICO INFERRED WITH GROWTH RINGS

José Villanueva Díaz^{1§}, Julián Cerano Paredes¹, Vicenta Constante García¹, D. W. Stahle², Juan Estrada Ávalos¹ y Miriam Marcela Tostado Plascencia¹

¹CENID-RASPA. INIFAP. Margen derecha del canal sacramento, km 6.5. Gómez Palacio, Durango. C. P. 35140. (cerano.julian@inifap.gob.mx), (constante.garcia@inifap.gob.mx), (estrada.juan@inifap.gob.mx). ²Departamento de Geociencias. Universidad de Arkansas. Fayetteville, Arizona, EUA. (dstahle@uark.edu). [§]Autor para correspondencia: villanueva.jose@inifap.gob.mx.

RESUMEN

El entendimiento de la variabilidad hidroclimática en México, para periodos superiores a la extensión de los registros meteorológicos, está limitada por la duración y calidad de los mismos, una alternativa es el uso de fuentes “proxy” como los anillos de árboles. El objetivo de este trabajo fue determinar con técnicas dendrocronológicas, la variabilidad hidroclimática histórica en el norte de México para 500 años y analizar el impacto de patrones atmosféricos circulatorios como El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). Cronologías regionales de anillos de Douglas-fir se generaron para los estados de Durango y Chihuahua y la región noreste de México. La cronología regional de Chihuahua superó los 500 años de extensión y estuvo influenciada significativamente por la fase cálida de ENSO, durante la estación invierno-primavera en periodos de 4 a 16 años, mientras que la PDO influyó en frecuencias de 4 a 8 años durante el verano (junio-agosto). La asociación de estos patrones con la cronología regional de Durango fue también significativa, aunque en menor magnitud. Para el noreste de México la asociación con estos patrones circulatorios fue aún menor, por lo que probablemente otros fenómenos atmosféricos pudieran tener mayor influencia. No obstante, fenómenos intensos de ENSO

ABSTRACT

The understanding of hydroclimatic variability in Mexico for periods longer than the length of weather records is limited by its length and quality; an alternative is the use of “proxy” sources such as tree rings. The aim of this paper was to determine with dendrochronological techniques, the historical hydroclimatic variability in northern Mexico for 500 years and, to analyze the impact of the atmospheric circulation patterns such as El Niño Southern Oscillation (ENSO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO). Regional chronologies of Douglas-fir's rings were generated for Durango, Chihuahua and the Mexico's northeast region. The regional chronology of Chihuahua exceeded the 500-year extension and was significantly influenced by the ENSO warm phase, during the winter-spring season in periods of 4 to 16 years, while the PDO influenced on frequency of 4 to 8 years during the summer (June-August). The combination of these patterns with Durango's regional chronology was also significant, although, on a lesser scale. For the Mexico's northeast, the association with these circulation patterns was even lower so, probably other atmospheric phenomena may have had more influence. However, intense ENSO events affected the north of the country, manifesting

* Recibido: febrero de 2011
Aceptado: julio de 2011

afectaron el norte del país, manifestándose con sequías severas o periodos muy húmedos; caso específico las sequías de las décadas de 1440, 1520, 1630, 1700, 1790, 1800, 1820, 1870, 1890 y 1970. Una red dendrocronológica más completa, contribuiría a mejorar el entendimiento de la variabilidad hidroclimática en esta región, la cual se pronostica se torne más seca en años venideros debido al calentamiento global.

Palabras clave: dendrocronología, ENSO, paleoclima, PDO, sequías.

INTRODUCCIÓN

El entendimiento del clima del pasado es importante para determinar la variabilidad hidroclimática natural, analizar tendencias y examinar escenarios climáticos venideros bajo la influencia del cambio climático global. La forma más común de estudiar la variabilidad del clima es a través del uso de registros instrumentales procedentes de estaciones climáticas; sin embargo, estos registros tienen la limitante de su corta extensión (generalmente con menos de 70 años), calidad dudosa (datos perdidos, registros incongruentes) y algunas veces con poca representatividad local o regional.

La experiencia indica que la disponibilidad de información climática por períodos de siglos o milenios soporta de mejor manera decisiones técnicas fundamentadas en un conocimiento más profundo de la variabilidad climática natural y de la frecuencia e intensidad de eventos hidroclimáticos extremos. La falta de esta información, conlleva a que se diseñen estructuras hidráulicas o se realice un uso no sustentable de los recursos naturales, particularmente los hídricos (Woodhouse y Lukas, 2006).

El estudio del calentamiento global, también requiere de información histórica de largo plazo para discernir la variabilidad climática natural, de aquella atribuida a acciones de origen antropogénico; así mismo, el conocimiento de esta variabilidad permite identificar periodos o eventos hidroclimáticos extremos, que se pueden presentar en escenarios climáticos venideros. Esta información sólo puede ser obtenida de fuentes indirectas o mejor conocidas como fuentes “proxy”, una de las cuales está representada por el incremento radial anual de los árboles a través de los anillos de crecimiento, técnica mejor conocida como “Dendrocronología” (Fritts, 1976; Bradley, 1999).

severe droughts or extreme damp periods, specific cases are droughts of the decades of 1440, 1520, 1630, 1700, 1790, 1800, 1820, 1870, 1890 and 1970. A more complete dendrochronological network would help to improve the understanding of hydroclimatic variability in this region, which is predicted to become drier in the coming years due to global warming.

Key words: dendrochronology, ENSO, paleoclimate, PDO, droughts.

INTRODUCTION

The understanding of the past's climate is important to determining the natural hydroclimatic variability, for analyzing trends and examining future climatic scenarios under the influence of global climate change. The most common way to study climatic variability is through the use of instrumental records from weather stations but, these records have the limitation of its short length (usually less than 70 years), questionable quality (missing data, inconsistent records) and sometimes with little local or regional representation.

Experience indicates that, the availability of climatic information for periods of centuries or millennia, support better technique-decisions based on a deeper understanding of natural climatic variability and the frequency and intensity of extreme hydroclimatic events. The lack of this information, leads to the design of hydraulic structures or an unsustainable use of natural resources, particularly water (Woodhouse and Lukas, 2006).

The study of global warming also requires of long-term historical data in order to discern the natural climatic variability from that attributed to anthropogenic activities; the knowledge of this variability allows to identifying extreme hydroclimatic periods or events that may occur in future climatic scenarios. This information can only be obtained from indirect sources, better known as “proxy” sources; one of them is represented by the annual radial growth of trees across its growth rings, a technique which is known as “dendrochronology” (Fritts, 1976; Bradley, 1999).

La presencia de árboles centenarios y milenarios en México, permite generar series de tiempo de siglos o milenios, para determinar la variabilidad hidroclimática de alta y baja frecuencia y se puede analizar la influencia de patrones atmosféricos de circulación general, que impactan dicha variabilidad (Stahle *et al.*, 1998; Villanueva *et al.*, 2010).

El objetivo del presente estudio fue analizar la variabilidad hidroclimática histórica, que ha caracterizado al norte de México en los últimos 500 años y determinar la influencia que han ejercido patrones atmosféricos de circulación general, como es el Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Poblaciones de bosque templado mixto con la presencia de Douglas-fir se ubicaron en la Sierra Madre Occidental y Oriental en Chihuahua, Durango, Coahuila y Nuevo León. La especie Douglas-fir, es una de las más importantes para estudios dendrocronológicos en Norte América (Stahle *et al.*, 2000). En México, la especie ha sido ampliamente utilizada para reconstrucciones históricas de precipitación y de caudales (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2005, 2009).

De los sitios seleccionados, se llenó un formato relacionado con la información ecológica del sitio, cambio de uso del suelo, historial de aprovechamiento forestal, presencia de incendios y tenencia de la tierra. Previo a cada muestreo, se realizó un recorrido exploratorio de cada rodal para ubicar el arbolado con características deseables en términos de longevidad, sanidad, condiciones fisiográficas del sitio y mínimo grado de disturbio, con el fin de maximizar la señal climática.

En cada árbol seleccionado, con un taladro de Pressler, se extrajeron de dos a tres virutas (núcleos de crecimiento) por árbol; así mismo, con motosierra se extrajeron secciones transversales de tocones, árboles muertos o de madera semienterrada (subfósil) en el piso forestal.

Los núcleos de crecimiento y secciones trasversales, se identificaron, montaron y pegaron en secciones acanaladas de madera para facilitar su manejo; posteriormente estas se pulieron con diversos grados de lija desde grueso a fino (granos 120, 220, 360 y 400) para resaltar sus estructuras de crecimiento.

The presence of ancient and even millenarian trees in Mexico, allows to generating time series of centuries or millennia, in order to determine the hydroclimatic variability of high and low frequency so that, the influence of atmospheric circulation patterns that impact this variability can be analyzed (Stahle *et al.*, 1998; Villanueva *et al.*, 2010).

The aim of this paper was to analyze the historical hydroclimatic variability that has characterized northern Mexico in the last 500 years and to determine the influence of atmospheric general circulation patterns, such as the Niño-Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation.

MATERIALS AND METHODS

Populations of mixed temperate forest with the presence of Douglas-fir were located in the Sierra Madre Occidental and Oriental in Chihuahua, Durango, Coahuila and Nuevo Leon. Douglas-fir species is one of the most important for dendrochronological studies in North America (Stahle *et al.*, 2000). In Mexico, this species has been widely used in historical reconstructions of precipitation and flows (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2005; 2009).

Of the selected sites, a written-form related to the site's ecological information, land use change, forest harvesting history, presence of fires and land tenure, was filled. Before each sampling, an exploratory toured was performed in each stand to place the trees with desirable characteristics in terms of longevity, health, physiographic conditions of the site and minimum degree of disturbance, in order to maximize the climate signal.

In each selected tree, using a Pressler drill, from two to three slices (growth centers) per tree were extracted; using a chainsaw cross sections of stumps, dead trees or partially buried wood (subfossil) on the forestry floor, were extracted.

The growth cores and cross-sections were identified, assembled and glued in grooved wooden sections in order to facilitate its handling; later on they were polished with different grades of sandpaper, from coarse to fine (120, 220, 360 and 400 grit) to highlight their growth patterns.

En el laboratorio de dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), los anillos se contaron y fecharon al año exacto de su formación (Stokes y Smiley, 1968). La técnica del fechado cruzado consistió en la identificación de patrones comunes de la variación interanual de los anillos de crecimiento, que se repiten de una muestra a otra, de tal forma que, a cada anillo de crecimiento, se le asignó una fecha exacta de formación (Douglass, 1941).

Posterior al fechado de las muestras, cada crecimiento individual (anillo anual) se seccionó visualmente en bandas de madera temprana, madera que se caracteriza por poseer células relativamente grandes, blanquecinas con pared celular delgada y grandes vacuolas; madera tardía, constituida por células más pequeñas, de pared lignificada y mayor densidad, que confiere una coloración oscura, así como anillo total que integra tanto a la madera temprana como a la tardía (Cleaveland, 1986).

Las bandas o secciones de crecimiento se midieron individualmente con un sistema de medición VELMEX (Cleaveland, 1988). El cofechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Las tendencias biológicas (competencia, supresión, liberación) y geométricas (incremento en el área de fuste con la edad) no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN, al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y luego al dividir cada valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva. Esto creó una serie de índices normalizados (cronologías) con media 1 y varianza homogénea (Cook, 1987).

El análisis de la variabilidad común entre las cronologías involucradas, se realizó mediante un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en Inglés) con la subrutina factor analysis del programa Statistica Kernel release 5.5 (Stat Soft Inc., 2000).

La influencia del clima en el crecimiento estacional de la cronología de *Pseudotsuga* del sitio Bisaloachi, Chihuahua, se determinó al utilizar el cuadrante de precipitación regional "4 532" (Hulme *et al.*, 1998). Por otra parte, la cronología del Cócono en Guanaceví, Durango, se comparó con datos promedio mensual de una precipitación regional,

At the dendrochronology laboratory of the National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP), the rings were counted and dated in the exact year of formation (Stokes and Smiley, 1968). The cross-dating technique consisted of identifying common patterns of inter-annual variation of the growth rings, which are repeated from one sample to another so that, to each growth ring was assigned an exact formation date (Douglass, 1941).

After the samples were dated, each individual growth (annual ring) was sectioned visually earlywood bands, which is wood characterized by its relatively large cells, whitish with thin cell walls and large vacuoles; latewood, consisting of smaller cells of lignified and higher density wall, which gives a dark coloration; as well as the total ring that integrates both the earlywood and latewood (Cleaveland, 1986).

The bands or growth sections were individually measured with a VELMEX measurement system (Cleaveland, 1988). The co-dated, the quality of the climate response and the measurement accuracy of each ring were verified with the COFECHA program (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

The biological trends (competition, suppression, release) and geometric (increase of the stem area with age) unrelated to climate, were removed using the ARSTAN program by inserting a negative exponential curve or straight line to the measurement series and then, by dividing each annual measurement value between the value obtained from the curve. This created a set of standardized indicators (chronologies) with mean 1 and homogeneous variance (Cook, 1987).

The analysis of common variability between the chronologies involved was performed using a principal component analysis (PCA) with the factor analysis subroutine of the program Statistica Kernel release 5.5 (Stat Soft Inc., 2000).

The climate influence on seasonal growth of *Pseudotsuga* chronology of Bisaloachi site, Chihuahua, was determined by using the regional precipitation quadrant "4 532" (Hulme *et al.*, 1998). The chronology of Cocono in Guanaceví, Durango, was compared with the monthly average data of regional precipitation, which integrates several weather stations located on the border limits of Chihuahua, Durango and Sinaloa, in the Sierra Madre Occidental (SMO). Regarding to Durango, the weather stations were distributed in both, the upper Nazas basin and, the surrounding stations

que integra varias estaciones climáticas enclavadas en los límites fronterizos de Chihuahua, Durango y Sinaloa, dentro de la Sierra Madre Occidental (SMO). Por lo que respecta a Durango, se utilizaron estaciones climáticas distribuidas tanto en la parte alta de la cuenca del Nazas como de estaciones aledañas de Durango, Chihuahua y Sinaloa. Las cronologías del noreste de México se contrastaron con estaciones climáticas de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas.

La respuesta climática entre precipitación y crecimiento anual se investigó con la subrutina análisis de función de respuesta (RESPO), incluida en el paquete de programas dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en Inglés). Posteriormente, con la subrutina Verify5 (calibración-verificación) del paquete DPL, a la mitad de los datos climáticos disponibles se les aplicó una calibración entre la cronología y los registros estacionales de precipitación y con la mitad restante, se corrió una verificación (Fritts, 1991). Al final, se obtuvo una ecuación de transferencia para el periodo total de datos de precipitación disponibles, la cual fue utilizada para desarrollar la reconstrucción de precipitación en la longitud total de las cronologías.

A la serie de alta frecuencia (resolución anual) se les ajustó una curva decenal flexible (baja frecuencia) para resaltar eventos secos o húmedos presentes en las reconstrucciones (Cook y Peters, 1981). Los periodos de sequía detectados en las reconstrucciones se validaron con documentos históricos en la medida de lo posible.

Para analizar el impacto de patrones atmosféricos circulatorios en la variabilidad hidroclimática de la región, se compararon mediante correlaciones y análisis de ondaleta, las series dendrocronológicas regionales con el índice de lluvia tropical (TRI). Este índice constituye un estimativo de la variabilidad de ENSO al usar anomalías de precipitación en la parte central del Pacífico (Wright, 1979).

Otro de los patrones circulatorios explorados fue el PDO, fenómeno que se asemeja a ENSO aunque con un comportamiento temporal diferente, estas diferencias se centran en que PDO tiene una persistencia de 20 a 30 años, mientras que ENSO de 6 a 18 meses y el otro aspecto es el impacto del PDO evidente en el sector americano del Pacífico Norte, con un efecto menor en los trópicos; mientras que ENSO tiene mayor influencia en el Pacífico Ecuatorial con efecto secundario en el Pacífico (Mantua *et al.*, 1997).

of Durango, Chihuahua and Sinaloa were used. The chronologies of northeastern Mexico were compared with weather stations of Coahuila, Nuevo León and Tamaulipas.

The climate response between precipitation and annual growth was investigated with the subroutine response function analysis (RESPO) included in the dendrochronological programs package of the University of Arizona (DPL). Subsequently, using the subroutine Verify5 (calibration-verification) of the DPL package, a calibration between chronology and seasonal precipitation records was applied to the half of the available climate data and, to the remaining half a verification was applied (Fritts, 1991). Finally, a transfer equation for the total period of available rainfall data was obtained, which was used for developing the precipitation reconstruction in the total length of the chronologies.

To the series of high frequency (annual resolution), a flexible decennial curve (low frequency) was fitted in order to enhance dry and wet events presented in the reconstructions (Cook and Peters, 1981). Periods of drought detected in reconstructions were validated with historical documents as far as possible.

In order to analyze the impact of the atmospheric circulation patterns' for the hydroclimatic variability of the region, regional dendrochronological series were compared using correlation and wavelet analysis with the tropical rainfall index (TRI). This index provides an estimate of the variability of ENSO by using precipitation anomalies in the central Pacific (Wright, 1979).

Other circulatory patterns explored was the PDO, a phenomenon that resembles ENSO but with a different temporal behavior, the difference is that PDO has a persistence of 20 to 30 years, while ENSO's persistence are 6 to 18 months and, the other aspect is the impact of PDO which is evident in the American sector of the North Pacific, with less effect in the tropics; while ENSO has a greater influence in the Equatorial Pacific with side effects in the Pacific (Mantua *et al.*, 1997).

RESULTS AND DISCUSSION

Douglas-fir's Chronologies network

A chronologies network of *Pseudotsuga menziesii* was developed for the States of Chihuahua, Durango, Coahuila and Nuevo León, in the Sierra Madre Occidental and Oriental (Figure 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Red de cronologías de Douglas-fir

Una red de cronologías de *Pseudotsuga menziesii* se desarrolló para los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila y Nuevo León en las Sierras Madre Occidental y Oriental (Figura 1).

El PCA agrupó las cronologías de la Sierra Madre Occidental en dos componentes o eigenvalores; las cronologías del estado de Durango, se agruparon en el componente 1, integradas por las cronologías las Bayas (10), Ciénega de la Vaca (11), Cerro Bandera (12), El Cócono (13), El Tarahumar (14), San Diego de Tenzánez (15), Pitoreal (16), San Andrés (17), Chiqueros (18), Cerro Barajas (19), Cerro Huehueto (20), Puenteclillas (21) y El Brillante (22); mientras que en el componente 2 se agruparon las cronologías de Chihuahua, integradas por Bisaloachi (25), Cebadillas de Ocampo (26), Mesa de las Guacamayas (27), Madera (28) y Cerro Mohinora (29). Lo anterior implica, que para fines de analizar la variabilidad climática regional se obtiene mayor información al considerar por separado las cronologías regionales de Durango y Chihuahua.

Reconstrucción de la variabilidad climática para Chihuahua y Durango

Con el análisis de núcleos de crecimiento integradas en el componente 2 para el estado de Chihuahua, se generó una cronología regional de madera temprana, madera tardía y de anillo total, con una extensión de 466 años, que cubre el período de 1537 a 2002.

Dos reconstrucciones de precipitación se desarrollaron con base a la cronología de madera temprana, una para el noroeste de Chihuahua en el área limítrofe de los estados de Chihuahua y Sonora y otra más para el sur, que limita con los estados de Durango y Sinaloa. La reconstrucción de lluvia de la parte noroeste de Chihuahua se extendió por 531 años (1472-2002) (Figura 2).

En los 531 años de la reconstrucción, se observan sequías en los periodos 1488-496, 1552-1573, 1611-1626, 1767-1778, 1882-1887, 1945-1960 y 1993-2002; así como periodos húmedos en 1477-1486, 1531-1540, 1577-1586, 1590-1599, 1654-1663, 1741-1750, 1807-1816, 1868-1877 y 1975-1984.

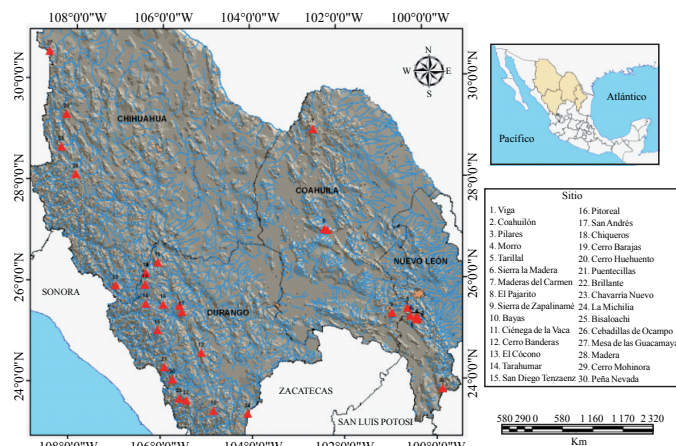


Figura 1. Distribución de cronologías de *Pseudotsuga menziesii* en el norte de México.

Figure 1. Distribution of *Pseudotsuga menziesii* chronologies in northern Mexico.

The PCA grouped the chronologies of the Sierra Madre Occidental into two components or eigenvalues; the chronologies from the Durango State, were grouped under component 1, comprising chronologies: Bayas (10), Ciénega de la vaca (11), Cerro Bandera (12), El Cócono (13), El Tarahumar (14), San Diego de Tenzanez (15), Pitoreal (16), San Andrés (17), Chiqueros (18), Cerro Barajas (19), Cerro Huehueto (20) Puenteclillas (21) and El Brillante (22); while in component 2 were grouped Chihuahua chronologies, comprising: Bisaloachi (25), Cebadillas de Ocampo (26), Mesa de las Guacamayas (27), Madera (28) and Cerro Mohinora (29). This implies that, in order to analyze the regional climatic variability, more information is obtained by considering separately the regional chronologies of Durango and Chihuahua.

Reconstruction of climatic variability for Chihuahua and Durango

With the analysis of growth cores of the component 2 for Chihuahua State, a regional chronology was generated with earlywood, latewood and the total ring, with an extent of 466 years, covering the period from 1537 to 2002.

Two precipitation reconstructions were developed based on the chronology of earlywood, one for the Chihuahua's northwest in the border area of Chihuahua and Sonora States and another for the south, in the border of Durango and Sinaloa States. The rainfall reconstruction in Chihuahua's northwestern comprised 531 years (1472-2002) (Figure 2).

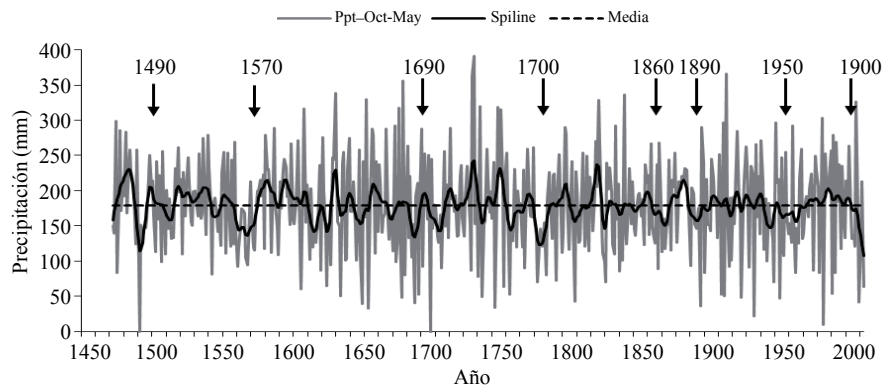


Figura 2. Precipitación reconstruida invierno-primavera (octubre-mayo) del periodo 1472-2002 para la región del noroeste de Chihuahua y noreste de Sonora.

Figure 2. Reconstructed precipitation Winter-Spring (October-May) for the period 1472-2002 for the northwestern region of Chihuahua and northeastern Sonora.

De manera similar, la reconstrucción de precipitación para la región que integra el área limítrofe entre los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa, indicó sequías continuas en más de 550 años (1450-2002). Estas sequías ocurrieron de manera simultánea en esta región del noroeste de México, situación corroborada por la alta asociación entre las reconstrucciones ($R^2 = 0.61$ ($p < 0.00001$, 1472-1999), indicativo de la influencia de patrones atmosféricos similares.

En la región de Chihuahua y Sonora la sequía de 1945 a 1960, constituye el periodo más seco del siglo XX. Los últimos 10 años de la reconstrucción (1993-2002), también fueron muy secos, similar a lo reportado para el sur de Durango (González *et al.*, 2005). No obstante, en esta reconstrucción se detectó la presencia de sequías más intensas en el siglo XVIII para el periodo 1767-1778. Estudios históricos en Chihuahua, señalan que las sequías de las décadas de 1770 y 1780 aunadas a la presencia de heladas tempranas, afectaron gran parte del país y provocaron una de las mayores crisis agrarias en México (Enfield y Fernández, 2006).

El periodo seco de 1552 a 1573 ha sido reportado por Cleaveland *et al.* (2003), como el más seco de su reconstrucción para el estado de Durango, extendiéndose hacia el norte a las regiones del noroeste y este de los Estados Unidos de América (Fye *et al.*, 2003; Endfield y Fernández, 2006).

Las sequías más devastadoras fueron aquellas que afectaron el centro y norte de México, especialmente las que ocurrieron de manera simultánea con la presencia de heladas, como fue el caso de los años de 1624, 1740, 1785, 1808 y 1810 (Florescano, 1980; Díaz *et al.*, 2002; Endfield y Fernández, 2006).

In the 531 years of the reconstruction, droughts were observed in the periods 1488-1496, 1552-1573, 1611-1626, 1767-1778, 1882-1887, 1945-1960 and 1993-2002; as well as damp periods in 1477-1486, 1531-1540, 1577-1586, 1590-1599, 1654-1663, 1741-1750, 1807-1816, 1868-1877 and 1975-1984.

Similarly, the precipitation reconstruction for the region that includes the border area between Durango, Chihuahua and Sinaloa States indicated continuous droughts in more than 550 years (1450-2002). These droughts occurred simultaneously in this region, a situation that was confirmed by the high association between the reconstructions ($R^2 = 0.61$ ($p < 0.00001$, 1472-1999), indicative of the influence of similar weather patterns.

In the region of Chihuahua and Sonora, the drought from 1945 to 1960 is the driest period of the XX century. The last 10 years of reconstruction (1993-2002), were also very dry, similar to that reported for southern Durango (González *et al.*, 2005). However, this reconstruction detected the presence of more intense droughts in the XVIII century for the period 1767-1778. Historical studies in Chihuahua indicate that, the droughts of the 1770s and 1780 joint with the early frosts affected much of the country and caused one of the biggest agricultural crises in Mexico (Enfield and Fernández, 2006).

The dry period of 1552-1573, has been reported by Cleaveland *et al.* (2003), as the driest of their reconstruction for Durango State, it extended to north and northwest regions of the United States of America (Fye *et al.*, 2003; Endfield and Fernández, 2006).

The most devastating droughts were those affecting the central and northern Mexico, especially those that occurred simultaneously with a frost, as for the case of

La reconstrucción también detectó periodos lluviosos, como el de 1477 a 1486, también presente en la reconstrucción de Durango (Cleaveland *et al.*, 2003). El periodo húmedo de 1549 a 1558 reportado por Fye *et al.* (2003) para el oeste de Estados Unidos de América, abarcó una extensa área, incluyendo el noroeste de México.

Influencia del ENSO en la variabilidad climática de Chihuahua

Para determinar la influencia del ENSO en la variabilidad climática de Chihuahua, se relacionaron los índices de madera temprana y los del TRI. La correlación entre ambas variables del periodo 1895-1995, indicó asociaciones significativas de 1895 a 1975; no obstante, de 1975 a 1995 no se encontró significancia ($p \geq 0.05$), situación que pudiera estar influenciado por acciones antropogénicas (Stahle *et al.*, 2009).

La periodicidad de ENSO, se determinó mediante un análisis de ondeleta. En La Figura 3, las manchas de color negro delimitadas por una línea en contorno del mismo color, indican que existe una relación significativa entre ambos fenómenos. Las flechas de color negro en diferente orientación, determinan si la relación es positiva o negativa; así, las flechas horizontales o paralelas apuntando hacia la derecha muestran que ambos fenómenos están en fase (relación positiva); caso contrario ocurre, cuando las flechas apuntan hacia la izquierda, en cuyo caso, ambos fenómenos están en antifase (relación negativa).

Las flechas verticales indican que los fenómenos no están en fase y se desconoce si la relación es positiva o negativa. Los límites de confianza están representados por un semióvalo, delimitado por una línea oscura delgada que une a los ejes equis superior e inferior. El análisis de ondeleta determinó asociación significativa entre ambos índices de 1905 a 1975, con una periodicidad de 0 a 16 años y dominancia de 4 a 8 años, que corresponde a la señal del ENSO; también de 1925 hasta 1960 se observa significancia en frecuencias de 20 hasta 32 años. De 1975 a la fecha no se observó significancia (Figura 3).

Análisis de la oscilación decadal del Pacífico en la región de Chihuahua

Los índices de madera temprana y los PDO tuvieron correlaciones significativas ($p < 0.05$) de 1900 a 1920 y de 1981 a 2000, y correlaciones no significativas ($p > 0.05$) de 1921 a 1940, 1941 a 1960 y de 1961 a 1980. Los resultados indican que los índices de madera temprana, tuvieron una respuesta diferente con ambos fenómenos; así periodos en que los índices de

the years 1624, 1740, 1785, 1808 and 1810 (Florescano, 1980; Díaz *et al.*, 2002; Endfield and Fernández, 2006).

The reconstruction also detected rainy periods such as the period of 1477-1486, which was also present in the Durango reconstruction (Cleaveland *et al.*, 2003). The damp period from 1549 to 1558 reported by Fye *et al.* (2003) for the western United States of America, covered a large area including the northwestern Mexico.

Influence of ENSO in Chihuahua's climatic variability

To determine the influence of ENSO in climatic variability of Chihuahua, earlywood and TRI rates were related. The correlation between both variables for the period 1895-1995, indicated significant associations from 1895 to 1975; however, from 1975 to 1995 no significance was found ($p \geq 0.05$), a situation that could be influenced by anthropogenic activities (Stahle *et al.* 2009).

The frequency of ENSO, was determined using a wavelet analysis. In Figure 3, the black spots bounded by a contour line of the same color indicated a significant relationship between both phenomena. The black arrows in a different direction determine if the relationship is positive or negative; so the horizontal or parallel arrows pointing to the right show that both phenomena are in phase (positive relationship); otherwise, when the arrows point to the left, both phenomena are in antiphase (negative relationship).

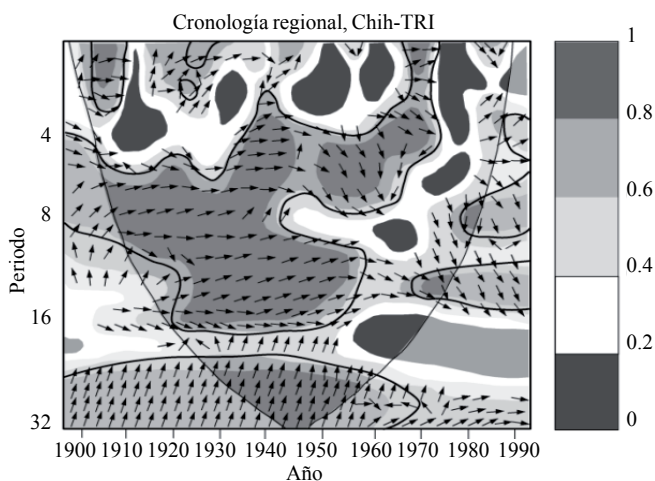


Figura 3. Relación entre índices de madera temprana (EWI) e índices ENSO (TRI). Para el noroeste de Chihuahua.

Figure 3. Relationship between earlywood indices (EWI) and ENSO indices (TRI). For Chihuahua's northwest.

madera temprana presentaron una correlación significativa con ENSO, también mostraron un comportamiento inverso con los índices PDO. La región oeste de la SMO presenta correlaciones bajas con ENSO, pero solo durante la fase positiva del PDO. Sin embargo, se presentan correlaciones significativas entre ENSO y la precipitación, durante la fase negativa del PDO.

Reconstrucción de la variabilidad climática para el estado de Durango

Con la inclusión de las cronologías del componente 1 del PCA, se generó una cronología regional de 1418 a 2007 (590 años). Para analizar la variabilidad de la precipitación en el estado de Durango, se realizaron dos reconstrucciones de lluvia, una para la región noroeste de Durango, que comprende la parte alta de la cuenca del río Nazas y otra más para la región occidental del estado, en el área limítrofe con Sinaloa.

La primera reconstrucción del periodo estacional invierno-primavera (noviembre-junio) fue de 410 años (1599-2008) y permite detectar sequías prolongadas para los periodos 1665-1688, 1695-1718, 1774-1791, 1798-1813, 1890-1896 y 1945-1963 (Figura 4). La peor sequía del siglo XX registrada en el noroeste de Durango, se reconstruyó de 1948 a 1963, periodo en el cual hubo desempleo y se favoreció el bracerismo (Florescano y Swan, 1995).

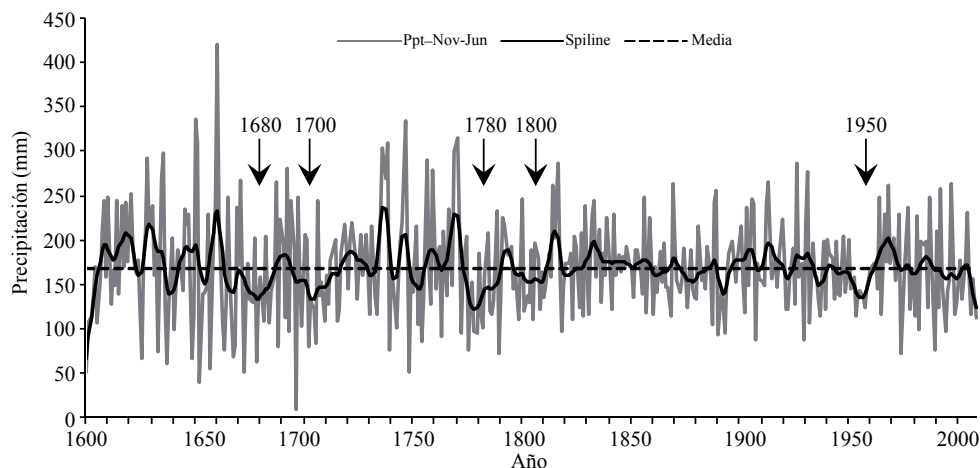


Figura 4. Precipitación reconstruida invierno-primavera (noviembre-junio) del periodo de 1599-2008 para el noroeste del estado de Durango. Las flechas verticales muestran décadas con sequías intensas.

Figure 4. Reconstructed precipitation Winter-Spring (November-June) of the 1599-2008 periods for Durango's northwestern. The vertical arrows show decades with intense droughts.

Otras de las sequías intensas registradas en esta reconstrucción fueron las de finales del siglo XVII (1665-1688) y principios del siglo XVIII (1695-1718), que por su extensión, pudieron tener un efecto marcado en la producción de alimentos. De igual manera, se

The vertical arrows indicate that, the phenomena are not in phase and it is unknown whether the relationship is positive or negative. The confidence limits are represented by a semi-oval, bounded by a thin dark line that joins the upper and lower X-axis. The wavelet analysis found a significant association between the two indices of 1905 to 1975, with a frequency of 0 to 16 years and dominance of 4 to 8 years, which corresponds to the ENSO signal; also from 1925 to 1960 a frequencies significance was observed from 20 to 32 years. From 1975 to date, no significance was observed (Figure 3).

Analysis of the Pacific Decadal Oscillation in Chihuahua region

The earlywood indices and PDO had significant correlations ($p < 0.05$) from 1900 to 1920 and from 1981 to 2000, and non-significant correlations ($p > 0.05$) from 1921 to 1940, 1941 to 1960 and from 1961 to 1980. The results indicate that earlywood indices had different response to each phenomenon; so the periods in which earlywood indices showed a significant correlation with ENSO, also showed an inverse behavior with PDO's indices. The west region of the SMO has low correlations with ENSO, but only during the positive phase of PDO. However, there are significant correlations between ENSO and rainfall during the negative phase of PDO.

Reconstruction of climatic variability for Durango State

With the inclusion of the chronologies of component 1 of PCA, a regional chronology from 1418 to 2007 (590 years) was generated. In order to analyze the precipitation

reconstruyeron periodos húmedos importantes, tales como de 1627 a 1635, 1658 a 1662, 1733 a 1740, 1744 a 1747, 1766 a 1773 y 1814 a 1818. El periodo de 1658 a 1662 sugiere ser el más húmedo de los últimos 400 años. Para el siglo XX, los años húmedos más importantes fueron 1926, 1931 y 1997, que se asocian a la influencia de ENSO en su fase cálida (Trenberth, 1997; Magaña, 1999).

La segunda reconstrucción de precipitación regional, se realizó para el occidente de Durango en sus límites estatales con el estado de Sinaloa. Esta reconstrucción estacional invierno-primavera (enero-mayo) de 1552 a 2006 (455 años), muestra sequías similares a las detectadas para el noroeste de Durango. Ambas reconstrucciones presentan una variabilidad climática común ($R^2=0.54$, $p<0.00001$, $n=405$), debido a la influencia de patrones circulatorios similares.

Influencia del ENSO en la variabilidad climática de Durango

Un análisis de espectros potenciales de ondeleta permitió ver la influencia de ENSO en el clima regional de Durango (Figura 5). ENSO impactó significativamente Durango de 1895 a 1925, en frecuencias de 5 a 13 años. De 1925 a 1930 presentó una relación positiva y significativa con una periodicidad de 0 a 4 años y de 1965 a 1975 cada 4 a 8 años. En las décadas más recientes, la relación no fue significativa, excepto para años considerados como de alta intensidad de este fenómeno.

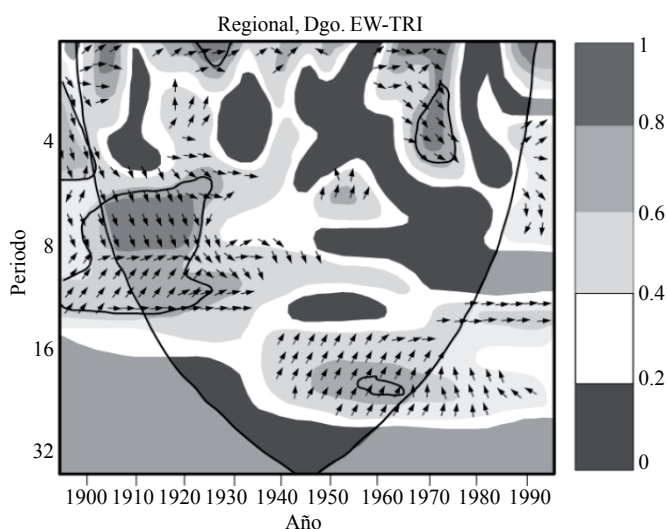


Figura 5. Análisis de coherencia de ondeleta entre índices de madera temprana de la cronología regional para Durango e índices TRI (ENSO).

Figure 5. Wavelet coherence analysis between earlywood indices of regional chronology for Durango and TRI indices (ENSO).

variability in Durango State, two rain reconstructions were made, one for Durango's northwest region, including the upper basin of Nazas River and, the another one for the western region of the State, in the area bordering Sinaloa.

The first reconstruction of the winter-spring period (November-June), was of 410 years (1599-2008) and allows to detect prolonged drought for the periods 1665-1688, 1695-1718, 1774-1791, 1798-1813, 1890-1896 and 1945-1963 (Figure 4). The worst drought of the XX century recorded in northwestern Durango was rebuilt from 1948 to 1963, which was a period with unemployment and migration was favored (Florescano and Swan, 1995).

Other severe droughts recorded in this reconstruction, were those from the late XVII century (1665-1688) and early XVIII century (1695-1718), which due to its extension may have a marked effect on food production. Similarly, major wet periods were reconstructed, such as from 1627 to 1635, 1658 to 1662, 1733 to 1740, 1744 to 1747, 1766 to 1773 and 1814 to 1818. The period from 1658 to 1662 suggested being the wettest of the past 400 years. For the XX century, major wet years were 1926, 1931 and 1997, which are associated with the influence of ENSO's warm phase (Trenberth, 1997; Magaña, 1999).

The second reconstruction of regional precipitation was performed for the west of Durango in its borders with Sinaloa State. This seasonal reconstruction, Winter-Spring (January-May) from 1552 to 2006 (455 years) shows similar droughts to those found for Durango's northwest. Both reconstructions show a common climatic variability ($R^2=0.54$, $p<0.00001$, $n=405$), due to the influence of similar circulation patterns.

Influence of ENSO in Durango's climatic variability

An analysis of potential wavelet spectrum allowed to determining the influence of ENSO on the regional climate of Durango (Figure 5). ENSO significantly impacted Durango from 1895 to 1925 at frequencies of 5 to 13 years. From 1925 to 1930 it showed a significant positive relationship with a periodicity of 0 to 4 years and from 1965 to 1975 every 4 to 8 years. In the recent decades, the relationship was not significant, except for the years considered with high intensity of this phenomenon.

Influencia de PDO en la variabilidad climática de Durango

El análisis entre índices de madera temprana y los índices de PDO de 1900 a 2000, dividido en subperiodos de 20 años, no fue significativo ($p > 0.05$) para la mayor parte del periodo de comparación. El análisis de coherencia de ondeleta, permitió evidenciar la presencia de este fenómeno con una periodicidad irregular de 9 a 11 años.

Variabilidad climática de la precipitación en el noreste de México

Para el noreste de México y mediante el PCA, se integró una cronología regional de *Pseudotsuga menziesii* de los sitios Peña Nevada (PNE), La Viga (VIG), El Coahuilón (COH), Los Pilares (PIL), El Morro (MOR), El Tarillal (TAR) y Sierra Zapalinamé (SZA). La reconstrucción de precipitación estacional invierno-primavera (diciembre-mayo), detectó sequías en los periodos 1907-1910 y 1969-1971 y sequías adicionales de 1439 a 1459, 1516 a 1537, 1629 a 1632, 1784 a 1789, 18017 a 1820 y 1867 a 1875 (Figura 6).

PDO's influence on climatic variability in Durango

The analysis between earlywood indices and PDO's indices from 1900 to 2000 divided into sub-periods of 20 years was not significant ($p > 0.05$) for most of the comparison period. The wavelet coherence analysis allowed to demonstrating the presence of this phenomenon on irregular basis from 9 to 11 years.

Climatic variability of precipitation in northeastern Mexico

For Mexico's northeast and through the PCA's, a regional chronology of *Pseudotsuga menziesii* was integrated for the sites: Peña Nevada (PNE), La Viga (VIG), El Coahuilón (COH), los Pilares (PIL), El Morro (MOR), El Tarillal (TAR) and Sierra Zapalinamé (SZA). The seasonal rainfall reconstruction of Winter-Spring (December-May) detected droughts in 1907-1910 and 1969-1971 periods and additional droughts in 1439 to 1459, 1516 to 1537, 1629 to 1632, 1784 to 1789, 1817 to 1820 and 1867 to 1875 (Figure 6).

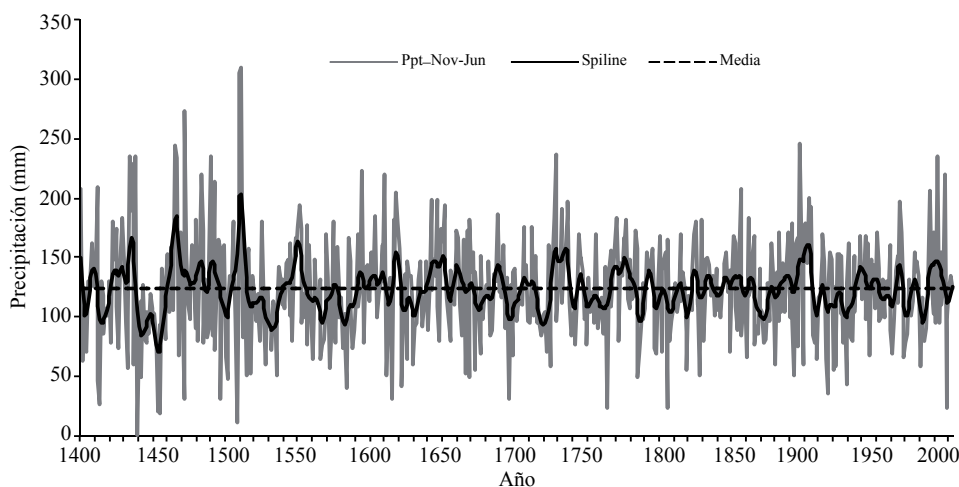


Figura 6. Serie de la precipitación reconstruida invierno-primavera (diciembre-mayo), periodo 1400 a 2002 para la región del noreste de México.

Figure 6. Reconstructed precipitation series of Winter-Spring (December-May), 1400-2002 periods for Mexico's northeastern region.

Las sequías de las décadas de 1860 y 1950, se han documentado también en otras partes del país, cuando anomalías climáticas pudieron haberse expandido desde el centro hasta el norte de México (Therrell *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2007). De los periodos húmedos reconstruidos, estos ocurrieron en las décadas de 1420, 1460, 1500, 1540, 1610, 1730, 1770, 1890, 1930 y 1980.

The droughts of 1860 and 1950 have been documented in other parts of the country, when the climatic anomalies could have been expanded from the center to the north of Mexico (Therrell *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2007). Reconstructed damp periods occurred in the decades of 1420, 1460, 1500, 1540, 1610, 1730, 1770, 1890, 1930 and 1980.

Influencia del ENSO en la variabilidad hidroclimática del noreste de México

La relación entre el ENSO y la respuesta climática de las cronologías para el noreste de México, no fue tan intensa como la registrada para la región norte. Al respecto, la relación sólo fue significativa antes de 1920, pero eventos intensos de ENSO si se han observado en esta región (Cerano *et al.*, 2010). Una explicación a lo anterior es que quizás otros fenómenos atmosféricos, tengan un mayor impacto en la variabilidad hidroclimática de esta región, como pudiera ser tormentas tropicales y huracanes en el verano y frentes fríos o nortes en invierno. Un análisis más detallado de estos eventos, arrojaría más información sobre los fenómenos atmosféricos que regulan la variabilidad climática de esta parte de México.

CONCLUSIONES

Las cronologías regionales de Chihuahua y Durango mostraron una repuesta significativa al efecto de la fase cálida de ENSO para gran parte del periodo de comparación (1895-1995) y esta influencia fue mayor en frecuencias de 4 a 16 años. La PDO del periodo estacional junio-agosto también mostró impacto significativo en frecuencias de 4 a 8 años. Las reconstrucciones regionales de precipitación para Chihuahua así como para el noroeste y el área limítrofe de Chihuahua, Durango y Sonora, estuvieron significativamente correlacionadas ($R^2=0.61$, $p<0.00001$) y mostraron sequías comunes en los periodos 1500-1517, 1566-1573, 1599-1606, 1702-1717, 1751-1768, 1785-1790, 1797-1805, 1859-1868, 1950-1957 y 1993 a 2000.

Episodios húmedos ocurrieron de 1478 a 1486, 1543 a 1556, 1474 a 1586 y de 1960 a 1970. Lo anterior indica que el clima en la región de Chihuahua y Durango está gobernado por patrones circulatorios similares y ENSO es uno de los de mayor impacto.

Para el noreste de México, la variabilidad hidroclimática detectada para el periodo invierno-primavera estuvo menos influenciada por ENSO, situación que presupone que otros fenómenos atmosféricos (nortes, tormentas tropicales, etc.) pudieran ser más importantes.

La red dendrocronológica actual en el norte de México permitió la generación de cronologías representativas de esta zona, pero requiere ser ampliada para un mejor

Influence of ENSO in hydroclimatic variability of Mexico's northeastern

The relationship between ENSO and, the climate response of the chronologies for the northeastern Mexico was not as intense as that recorded for the northern's. In this regard, the relationship was only significant before 1920, but ENSO intense events have been observed in this region as well (Cerano *et al.*, 2010). One explanation for this is that perhaps other atmospheric phenomena have a greater impact on hydroclimatic variability in this region, such as tropical storms and hurricanes in summer and cold fronts in winter. A more detailed analysis of these events would provide even more information on the atmospheric phenomena that regulate the climate variability in this part of Mexico.

CONCLUSIONS

Regional chronologies of Chihuahua and Durango showed a significant response to the effect of ENSO's warm phase for much of the comparison period (1895-1995) and this influence was greater at frequencies from 4 to 16 years. The PDO of seasonal period from June to August also showed significant impact on frequency of 4-8 years. Regional precipitation reconstructions for Chihuahua and the northwest and, the border area of Chihuahua, Durango and Sonora were significantly correlated ($R^2=0.61$, $p<0.00001$) and showed common droughts in 1500-1517, 1566-1573, 1599-1606, 1702-1717, 1751-1768, 1785-1790, 1797-1805, 1859-1868, 1950-1957 and 1993 to 2000 periods.

Damp episodes occurred from 1478 to 1486, 1543-1556, 1474-1586 and 1960 to 1970. Indicating that, the climate of Chihuahua and Durango region is governed by similar circulation patterns and ENSO is one with the most impact.

For Mexico's northeast, the hydroclimatic variability detected for the winter-spring period was less influenced by ENSO, a situation that presupposes that other atmospheric phenomena (north, tropical storms, etc.) could be even more important.

The current dendrochronological network in northern Mexico, allowed the generation of representative chronologies of this area but, it needs to be expanded in

entendimiento de la variabilidad hidroclimática en esta región, que se presume estará altamente afectada por el cambio climático global, con tendencia marcada hacia un grado mayor de aridez y por ende con una limitada disponibilidad de recursos hídricos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado gracias al financiamiento otorgado a través de fondos del Instituto Interamericano para Investigación del Cambio Climático (IAI), proyecto CRN#2047, a su vez financiado por el US/National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

LITERATURA CITADA

- Bradley, R. S. 1999. *Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary*. Second edition. Academic Press. London. 614 pp.
- Cerano, P. J.; Villanueva, D. J.; Trucios, C. R.; Rivera, G. M.; Constante, G. V. 2010. Potencial dendrocronológico de *Pseudotsuga menziesii* para la reconstrucción de precipitación invierno-primavera en el sureste de Coahuila. *Agrofaz*. 10(3):287-293.
- Cleaveland, M. K. 1986. Climatic response of densitometric properties in semiarid site tree rings. *Tree Ring Bulletin*. 46: 3-29.
- Cleaveland, M. K. 1988. Corrigendum to climate response of densitometric properties in semiarid site tree rings. *Tree Ring Bulletin*. 48:41-47.
- Cleaveland, M. K.; Stahle, D. W.; Therrell, M. D.; Villanueva, D. J. and Burns, B. T. 2003. Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Clim. Change*. 59:369-388.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*. 47:37-59.
- Cook, E. R. and Peters, K. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*. 41:45-53.
- Díaz, C. S.; Therrell, M. D.; Stahle, D. W. and Cleaveland, M. K. 2002. Chihuahua Winter-Spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Clim. Res.* 22:237-244.

order to understand better the hydroclimatic variability in this region, which is presumed to be highly affected by global climate change, with a marked tendency to a greater dryness degree and therefore, with limited water availability.

End of the English version



- Douglass, A. E. 1941. Crossdating in dendrochronology. *J. For.* 39(10):825-831.
- Endfield, G. H. and Fernández-Tejeda, I. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Clim. Change*. 75:391-419.
- Florescano, E. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Comisión del Plan Nacional Hidráulico. D. F., México.
- Florescano, E. y Swan, S. 1995. Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana. Jalapa, México. 246 pp.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree rings and climate*. London Academic Press. New York, USA. 565 pp.
- Fritts, H. C. 1991. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. University of Arizona Press. Tucson, USA. 286 pp.
- Fye, F. K.; Stahle, D. W. and Cook, E. R. 2003. Paleoclimatic analogs to twentieth-century moisture regimes across the United States. *Am. Meteorol. Soc.* 84(7):901-909.
- González-Elizondo, M.; Jurado, E.; Navar, J.; González-Elizondo, M. S.; Villanueva, J.; Aguirre, O. and Jiménez, J. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681-2001 rain reconstruction. *For. Ecol. Manage.* 213: 39-53.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res.* 57(2):205-221.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*. 43:69-78.
- Hulme, M.; Osborn, T. J. and Johns, T. C. 1998. Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulation. *Geophys. Res. Lett.* 25:3379-3382.

- Magaña, V.; Pérez, J. L.; Vázquez, J. L.; Carrizosa, E. y Pérez, J. 1999. Los impactos de El Niño en México. V Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. D. F., México, 229 p.
- Mantua, N. J.; Hare, S. R.; Wallace, J. M. and Francis, R. C. 1997. A pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Am. Meteorol. Soc.* 78:1069-1079.
- Stahle, D. W.; Dárrigo, R. D.; Krusic, P. J.; Cleaveland, M. K.; Cook, E. R.; Allan, R. J.; Cole, J. E.; Dunbar, R. B.; Therrell, M. D.; Guy, D. A.; Moore, M. D.; Stokes, M. A.; Burns, B. T.; Villanueva-Díaz, J. and Thompson, L. G. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Am. Meteorol. Soc.* 70(10):2137-2152.
- Stahle, D. W.; Villanueva, J.; Cleaveland, M. K.; Therrell, M. D.; Paull, G. J.; Burns, B. T.; Salinas, W.; Suzan, H. and Fule, P. Z. 2000. Recent tree-ring research in Mexico. *In*: Roig, F. A. (comp.). *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC. 285-306 pp.
- Stahle, D. W., Cook, E. R.; Villanueva-Díaz, J.; Fye, F. K.; Burnett, D. J.; Griffin, R. D.; Acuña-Soto, R.; Seager, R. and Heim, Jr. R. R. 2009. Early 21st-century drought in Mexico. *Eos*. 90(17):89-90.
- Stat Soft Inc. 2000. STATISTICA Kernel release 5.5. A Copyright©. 1984-2000.
- Stokes, M. A. and Smiley, T. L. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Arizona Press. Tucson, Arizona, USA. 73 pp.
- Therrell, M. D.; Stahle, D. W.; Cleaveland, M. K. and Villanueva-Díaz, J. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *J. Geophys. Res.* 107(D14):6-1-6-8.
- Trenberth, K. E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin Am. Meteorol. Soc.* 78:2771-2777.
- Villanueva, D. J.; Luckman, B. H.; Stahle, D. W.; Therrell, M. D.; Cleaveland, M. K.; Cerano-Paredes, J. Gutiérrez-García, G.; Estrada-Ávalos, J. and Jasso-Ibarra, R. 2005. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrocronología*. 22(3):215-223.
- Villanueva-Díaz, J.; Stahle, D. W.; Luckman, B. H.; Cerano-Paredes, J.; Therrell, M. D. and Cleaveland, M. K. 2007. Winter-Spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Clim. Change*. 83:117-131.
- Villanueva-Díaz, J.; Fulé, P. Z.; Cerano, P. J.; Estrada, A. J. y Sánchez, C. I. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Ciencia Forestal en México*. 34(105):37-69.
- Villanueva-Díaz, J.; Cerano, P. J.; Stahle, D. W.; Constante, G. V.; Vázquez, S. L.; Estrada, A. J. y Benavides, S. J. D. 2010. Árboles longevos de México. *Rev. Mex. Cienc. Forest.* 1(2):1-23.
- Woodhouse, C. A. and Lukas, J. J. 2006. Multi-century tree-ring reconstructions of Colorado streamflow for water resource planning. *Clima Change*. 78(2-4):293-315.
- Wright, P. B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature*. 277:371-374.