

SEQUÍAS RECONSTRUIDAS EN LOS ÚLTIMOS 600 AÑOS PARA EL NORESTE DE MÉXICO*

RECONSTRUCTED DROUGHTS IN THE LAST 600 YEARS FOR NORTHEASTERN MEXICO

Julián Cerano Paredes^{1§}, José Villanueva Díaz¹, Ricardo David Valdez Cepeda², Jorge Méndez González³ y Vicenta Constante García¹

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. INIFAP. Gómez Palacio, Durango, México. C. P. 35140. Tel. 01 871 1590104 y 159 01 05. ²Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. UACH. Bermejillo, Durango. (vacrida@gmail.com.mx). ³Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. (jorgemendezgonzalez@gmail.com). [§]Autor para correspondencia: cerano.julian@inifap.gob.mx.

RESUMEN

La generación de series paleoclimáticas con base en técnicas dendrocronológicas, permite el análisis histórico de la variabilidad climática. La dendrocronología constituye una excelente alternativa cuando se dispone de bases de datos instrumentales de extensión corta, que limitan analizar históricamente su variabilidad en el tiempo. El objetivo de este trabajo fue analizar la variabilidad climática de los últimos 600 años para el noreste de México, determinar la periodicidad de eventos hidroclicmáticos extremos (sequías) y su impacto en la sociedad, empleando como *proxy* los anillos de crecimiento de las especies *Pseudotsuga menziesi* y *Pinus cembroides*. En este estudio, se analizaron series paleoclimáticas de más de 400 años para el noreste de Coahuila y de 600 años para la región sur de Nuevo León, se reconstruyeron sequías severas que tuvieron un impacto significativo en la disponibilidad de agua, producción agrícola, daños a la ganadería y por consiguiente un impacto socioeconómico. Las sequías en la región noreste de México, para el periodo 1400-2004 presentan una recurrencia de 50 años ($p < 0.05$); sin embargo, los eventos más intensos se observaron de manera significativa ($p < 0.05$) a intervalos de 100 años; 1450, 1560, 1660, 1750-1760, 1850-1870 y 1950-1960, ésta última con gran impacto social y

ABSTRACT

The generation of paleoclimate series based on dendrochronological techniques, allows the historical analysis of climatic variability. Dendrochronology is an excellent alternative when the instrumental data bases of short extension are available, that limit to historically analyze its variability over time. The aim of this paper was to analyze the climatic variability over the past 600 years in northeastern Mexico, to determine the frequency of extreme hydroclimatic events (droughts) and their impact on society, using as *proxy* the growth rings of the species *Pseudotsuga menziesi* and *Pinus cembroides*. In this paper, paleoclimate series of over 400 years for the northeastern Coahuila and of 600 years for southern Nuevo León were analyzed, there were rebuilt severe droughts that had a significant impact on water availability, agricultural production, damage to livestock and therefore, a socioeconomic impact. Droughts in the northeastern region of Mexico for the period 1400-2004, have a recurrence of 50 years ($p < 0.05$); but more intense events were observed ($p < 0.05$) at intervals of 100 years; 1450, 1560, 1660, 1750-1760, 1850-1870 and 1950-1960, the latter with great social and economic impact. The reconstruction of paleoclimate series provide basic

* Recibido: abril de 2011
Aceptado: junio de 2011

económico. La reconstrucción de series paleoclimáticas, brindan información elemental para la modelación de eventos hidrológicos extremos, que pueden ocurrir en el futuro bajo diferentes escenarios climáticos, información que permite fundamentar decisiones técnicas para el uso sustentable de los recursos hídricos en esta región.

Palabras clave: dendrocronología, reconstrucción, sequías, sociedad.

INTRODUCCIÓN

Las sequías están indisolublemente ligadas a la ausencia, retraso o déficit de lluvias, por lo que se pueden definir como la precipitación pluvial significativamente más baja que el promedio o que un valor específico durante un período de tiempo. Dada la frecuencia y la intensidad con que el fenómeno de las sequías se ha hecho presente en nuestro territorio, a lo largo de miles de años, que abarcan tanto la historia como la prehistoria del país, podríamos acotarlas como situaciones relativamente normales dentro de las oscilaciones climáticas propias de esta zona, que se detectan fácilmente en lapsos de una o dos décadas (Sánchez-Santillán, 2001).

Por otro lado, el cambio climático global en los últimos años ha producido alteraciones en los patrones generales del clima, que generan cambios en variables atmosféricas como la precipitación y la temperatura. Si bien estas alteraciones son normales en la climatología terrestre, el problema estriba en la rapidez con que estos cambios se están suscitando en los últimos años, sin dar tiempo a los seres vivos para adaptarse a ellos (Prager y Earle, 2001).

Las reconstrucciones paleoclimáticas además de permitir conocer y analizar la variabilidad hidrológica a través del tiempo, constituyen un soporte adicional para sustentar las hipótesis de las condiciones climáticas extremas que prevalecieron e interactuaron, magnificando los impactos de carencia de alimentos, brotes epidémicos, mortandad, abandono de pueblos, conflictos sociales y políticos de los grupos humanos establecidos (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Therrell *et al.*, 2006; Stahle *et al.*, 2011).

De igual manera, las series paleoclimáticas permiten analizar la variabilidad de fenómenos de circulación general como El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés),

information for modeling extreme hydroclimatic events that may occur in the future under different climatic scenarios; information for substantiating technical decisions for the sustainable use of water resources in this region.

Key words: dendrochronology, reconstruction, droughts, society.

INTRODUCTION

Droughts are inextricably linked to the absence, delay or lack of rain; so they can be defined as significantly lower rainfall than the average or a specific value for a period of time. Given the frequency and intensity of the drought phenomenon that has been present in our country over thousands of years; covering both, the history and prehistory of the country, we could define it as relatively normal situations within the climatic oscillations typical of this area, which are easily detected in periods of one or two decades (Sánchez-Santillán, 2001).

Moreover, global climate change in recent years has produced changes in the general patterns of climate, driving changes in atmospheric variables such as rainfall and temperature. While these changes are normal in terrestrial climatology, the problem lies in the rapidity with which these changes are being raised in the recent years, giving no time to living beings to adapt to them (Prager and Earle, 2001).

Paleoclimatic reconstructions allow to understand and analyze the hydroclimatic variability over time, and they also provide additional support to sustain the hypothesis of extreme weather conditions that prevailed and interacted, magnifying the impact of food shortages, disease outbreaks, mortality, abandonment of peoples, social and political conflicts of established human groups (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Therrell *et al.*, 2006; Stahle *et al.*, 2011).

Similarly, paleoclimatic series allow analyzing the variability of general circulation phenomena like El Niño Southern Oscillation (ENSO), Pacific Decadal Oscillation (PDO) and how their occurrence and effects have varied due to the global warming and in turn, how these have changed the climatic conditions, situations outside the historical climate variability.

la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y como su ocurrencia y efectos han variado a causa del calentamiento global, y a su vez, estos como han modificado las condiciones climáticas, situaciones fuera de la variabilidad climática histórica.

La dendrocronología con base en el fechado exacto de los crecimientos anuales, constituye un proxy para la reconstrucción de variables climáticas como precipitación, temperatura, flujos de ríos, regímenes ecológicos de incendios, etc.; estas reconstrucciones son tan extensas como tan longevos son los árboles. En algunos países del mundo como en los Estados Unidos de América, se han desarrollado reconstrucciones milenarias y en el caso de México, actualmente se cuenta con más de 100 series de tiempo para el norte y centro del país, algunas con extensiones de más de 500 años y un número reducido de cronologías milenarias pero de gran relevancia científica (Stahle *et al.*, 2011).

Esta técnica representa una excelente alternativa cuando se carece o dispone de bases de datos instrumentales de poca extensión, que limitan analizar históricamente esta variabilidad. Por tal razón, el presente trabajo tiene como objetivo principal, analizar la variabilidad climática de los últimos 600 años en el noreste de México, así como determinar la periodicidad de eventos hidroclimáticos extremos (sequías) y su impacto socioeconómico en las poblaciones del noreste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de variabilidad de la precipitación en el tiempo y su efecto en la sociedad del noreste de México, ha sido posible gracias a reconstrucciones paleoclimáticas generadas en la última década, con base en núcleos de crecimiento y secciones transversales de especies arbóreas como *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco y *Pinus cembroides* Zucc., distribuidas en la Sierra Madre Oriental.

En Sierra de Arteaga, se colectaron muestras de *Pseudotsuga menziesii* en las montañas El Coahuilón, La Viga, Los Pilares, El Morro y El Tarillal. En la parte media y baja de la Sierra de Zapalinamé, se tomaron núcleos de crecimiento de pino piñonero (*Pinus cembroides*) de las áreas, Cuauhtémoc, El Diamante y Huachichil. Para el estado de Nuevo León, el área de estudio se ubica en Peña Nevada, donde se trabajó con *Pseudotsuga menziesii* (Figura 1).

Dendrochronology based on the exact dating of annual growth, is a proxy for the reconstruction of climatic variables such as: precipitation, temperature, river flows, ecological fire regimes, etc.; these reconstructions are as large, as the long-lived trees themselves. In some countries, like the United States of America, millennial reconstructions have been developed, in the case of Mexico, there are currently over 100 time series for northern and central regions, some of them with extensions of more than 500 years and a few ancient chronologies with great scientific relevance (Stahle *et al.*, 2011).

This technique represents an excellent alternative in the absence or available instrumental databases of small extent, which limit the historical analysis of this variability. For this reason, this paper's main objective is to analyze the climatic variability of the last 600 years in northeastern Mexico, as well as to determining the timing of extreme hydroclimatic events (droughts) and their socioeconomic impact on the populations of Northeastern Mexico.

MATERIALS AND METHODS

The analysis of rainfall variability in time and its effect on society in Northeastern Mexico has been made possible by paleoclimatic reconstructions, generated in the last decade based on growth cores and cross sections of tree species such as *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco and *Pinus cembroides* Zucc., distributed in the Sierra Madre Oriental.

In Sierra de Arteaga, samples of *Pseudotsuga menziesii* were collected in the mountains El Coahuilón, La Viga, Los Pilares, El Morro and El Tarillal. In the middle and lower part of the Sierra of Zapaliname, growth cores were taken from pine (*Pinus cembroides*) from areas of Cuauhtémoc, El Diamante and Huachichil. For Nuevo León State, the study area is located in Peña Nevada, working with *Pseudotsuga menziesii* (Figure 1).

The growth centers were identified, assembled and glued in grooved wooden sections for easier handling; then, they were polished with different grades of sandpaper (coarse to fine, from 120 to 1 200); the same procedure was used in transverse sections to enhance their growth patterns. In the Dendrochronology Laboratory of the National Research Institute for Forestry, Agriculture and Livestock (INIFAP), National Disciplinary Research Center for Water, Soil, Plants and Atmosphere (CENID-RASPA) and using a trinocular

Los núcleos de crecimiento, se identificaron, montaron y pegaron en secciones acanaladas de madera para facilitar su manejo; posteriormente éstas se pulieron con diversos grados de lija (grano grueso a fino, de la 120 a la 1 200); el mismo procedimiento fue utilizado en las secciones transversales para resaltar sus estructuras de crecimiento. En el Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA) y con el apoyo de un estereomicroscopio trilocular de alta resolución, los anillos se contaron y fecharon al año exacto de su formación, mediante el uso de técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968). Una vez fechadas las muestras, cada crecimiento individual de *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus cembroides* se midió individualmente con un sistema de medición Velmex con una precisión de 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980).

El fechado, la calidad de la respuesta climática y la exactitud de la medición de cada anillo se verificó con el programa Cofecha (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con el 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, maximizando la señal climática (Cook, 1987).

Una vez desarrolladas las cronologías o series de tiempo para cada uno de los diferentes sitios en Sierra de Arteaga (El Coahuilón, La Viga, Los Pilares, El Morro y El Tarillal), Sierra de Zapalinamé en Coahuila (Cuauhtémoc, Diamante y Huachichil) y Peña Nevada, en Nuevo León, se corrió un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) empleando el software Statistica, con el objeto de determinar la variabilidad común entre las series y optar por trabajar con series individuales o regionales.

Las cronologías se calibraron con datos climáticos de precipitación de las estaciones más cercanas, datos obtenidos del software Eric III (IMTA, 2000). Se generó un modelo lineal entre índice de anillo y la precipitación observada que, permitió reconstruir la variabilidad de la precipitación para la longitud total de la cronología.

Para un análisis detallado de la variabilidad climática histórica de la región, se siguieron tres etapas: 1) se desarrolló un análisis comparativo entre las series de precipitación

stereomicroscope of high resolution, the rings were counted and dated to the exact year of its formation, by using standard dendrochronological techniques (Stokes and Smiley, 1968). Once the samples were dated, each individual growth of *Pseudotsuga menziesii* and *Pinus cembroides* was measured individually with a Velmex measurement system with an accuracy of 0.001 mm (Robinson and Evans, 1980).

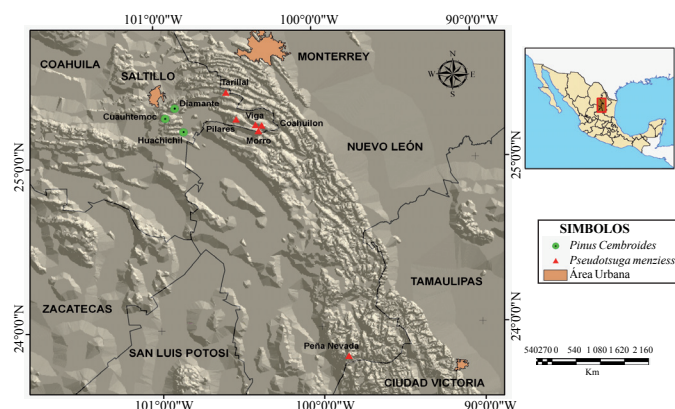


Figura 1. Distribución geográfica de las áreas de estudio, *Pseudotsuga menziesii* en Sierra de Arteaga, Coahuila; Peña Nevada en Nuevo León y *Pinus cembroides* en la Sierra de Zapalinamé en el estado de Coahuila.

Figure 1. Geographic distribution of the studied areas, *Pseudotsuga menziesii* in Sierra de Arteaga, Coahuila; Peña Nevada in Nuevo León and *Pinus cembroides* in the Sierra of Zapaliname in Coahuila State.

The dating, the quality of the climatic response and accuracy of measurement of each ring was verified with the program Cofecha (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001). Biological and geometric trends unrelated to climate, were removed using the Arstan program by inserting a negative exponential curve or straight line to the test series and then by dividing each annual value of measurement between the values obtained from the curve, maximizing the climate signal (Cook, 1987).

Once the chronologies or time series were developed for each one of the different sites in the Sierra of Arteaga (El Coahuilón, La Viga, Los Pilares, El Morro and El Tarillal), Sierra of Zapalinamé in Coahuila (Cuauhtémoc, Diamante and Huachichil) and Peña Nevada, in Nuevo León, a principal components analysis (PCA) using the Statistica software was performed, in order to determine the common variability between series and choose to work with individual or regional series.

reconstruidas; 2) con base en archivos históricos y reconstrucciones paleoclimáticas tanto para el centro como para el norte del país, se analizó el impacto de fenómenos extremos tales como sequías y sus estragos económicos, políticos y sociales producidos en la población del noreste de México; y 3) basados en esta información, la intensidad (precipitación por debajo de la media) y amplitud (número de años sin lluvia por arriba de la media) de las sequías reconstruidas para el noreste de México, se definió el grado de severidad de las sequías.

Finalmente se aplicó un análisis espectral a las series de precipitación reconstruida y por medio de gráficos de densidad espectral versus frecuencia, se identificaron las frecuencias dominantes o recurrencias de anomalías en las series paleoclimáticas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se desarrollaron nueve cronologías de diferente extensión y alta variabilidad interanual y multianual. Seis de las cronologías fueron de *Pseudotsuga menziesii* y tres más de *Pinus cembroides* (Cuadro 1).

Cuadro 1. Cronologías desarrolladas en la Sierra Madre Oriental, región noreste de México.
Table 1. Chronologies developed in the Sierra Madre Oriental, northeastern Mexico.

Estado	Cronología	Especie	Longitud	Años
Coahuila	La Viga	<i>P. menziesii</i>	1659-2001	343
	El Coahuilón	<i>P. menziesii</i>	1700-2001	302
	Los Pilares	<i>P. menziesii</i>	1775-2000	226
	El Morro	<i>P. menziesii</i>	1855-2000	146
	El Tarilla	<i>P. menziesii</i>	1872-2000	129
	Cuauhtémoc	<i>P. cembroides</i>	1595-2004	410
	Diamante	<i>P. cembroides</i>	1845-2006	162
	Huachichil	<i>P. cembroides</i>	1869-2006	138
Nuevo León	Peña Nevada	<i>P. menziesii</i>	1396-2002	607

El PCA indicó, que todas las cronologías de *P. menziesii* presentan una misma variabilidad común (PC 1), lo cual puede atribuirse que son áreas en un rango de elevación similar, donde fenómenos climáticos comunes modulan la variabilidad de la precipitación en toda esta región del noreste de México (Figura 2). De igual manera, se observa una misma variabilidad entre las series de *P. cembroides*

The chronologies were calibrated with climatic data of precipitation of the nearest stations, where the data was obtained from Eric III software (IMTA, 2000). A linear model was generated between the ring index and observed precipitation which allowed to reconstruct the precipitation variability for the total length of the chronology.

For a detailed analysis of historical climate variability in the region, three stages were carried out: 1) a comparative analysis was developed between the reconstructed precipitation series; 2) based on historical records and paleoclimatic reconstructions for both the center and the north of the country, the impact of extreme events such as droughts was analyzed and, also its economic, political and social damage produced in the population of northeastern Mexico; and 3) based on this information, the intensity (precipitation below the mean) and amplitude (number of years without rain above the mean) of reconstructed drought for northeastern Mexico, the severity degree of droughts was defined.

Finally, a spectral analysis was applied to the reconstructed precipitation series and through spectral density plots versus frequency, the dominant frequencies or anomalies recurrence in paleoclimate series were identified.

RESULTS AND DISCUSSION

Nine chronologies of varying size and high interannual and multi-year variability were developed. Six of the chronologies were of *Pseudotsuga menziesii* and three more of *Pinus cembroides* (Table 1).

(PC 2), debido que son áreas de menor elevación y la especie se desarrolla en condiciones climáticas similares, normalmente de precipitaciones inferiores a 500 mm anuales (Figura 2). Aun cuando se trata de diferentes especies y que se desarrollan en regiones distantes, se observa una misma variabilidad entre las series ($r = 0.56$; $p < 0.0001$, $n = 302$), con mayor relación en periodos específicos, eventos modulados por fenómenos que se extendieron en una mega región.

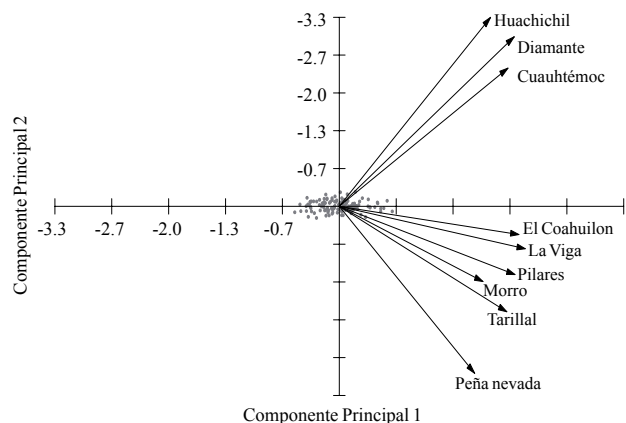


Figura 2. Análisis de componentes principales, que muestra la agrupación de las series paleoclimáticas en dos grupos, implica misma variabilidad entre series de la misma especie, como *Pseudotsuga menziesii* para el componente 1 (PC 1) y *Pinus cembroides* para el componente 2 (PC 2).

Figure 2. Principal component analysis, which shows the grouping of paleoclimatic series into two groups, it implies variability between series of the same species as *Pseudotsuga menziesii* for component 1 (PC 1) and *Pinus cembroides* for component 2 (PC 2).

La variabilidad común entre las cronologías permitió desarrollar series regionales, para Sierra de Arteaga y una más para Sierra Zapalinamé. Aún cuando la cronología de Peña Nevada mostró una variabilidad similar con las series de Sierra de Arteaga, se consideró por separado, dado que representa la serie más extensa. De esta manera, se generaron tres reconstrucciones regionales para analizar la variabilidad climática para el noreste de México (Figura 3).

Las tres series de la Figura 3, muestran alta variabilidad interanual, las áreas rellenas en color oscuro indican las sequías severas y su sincronía en ambas series y las áreas en color rojo indican las sequías denominadas megasequías por su extensión e impacto producido en la sociedad.

The PCA indicated that all the chronologies of *P. menziesii* have one common variation (PC 1), which can be due the similar elevation range areas in which they are, where common climatic events modulate rainfall variability across this region of northeastern Mexico (Figure 2). Similarly, a common variability is observed between series of *P. cembroides* (PC 2), because they are in areas of lower elevation and species grows in similar climatic conditions, usually with less than 500 mm rainfall per year (Figure 2). Even when it comes to different species that are developed in distant regions, there is variability among the same series ($r = 0.56$; $p < 0.0001$, $n = 302$), more related in specific periods, modulated events by phenomena spread in a mega region.

The common variability between chronologies allowed the development of regional series for Sierra of Arteaga and one more to Sierra Zapaliname. Although, the chronology of Peña Nevada showed a similar variability with the series of Sierra de Arteaga, it was considered separately, since it represents the longest series. Thus, three reconstructions were generated in order to analyze regional climate variability for northeastern Mexico (Figure 3).

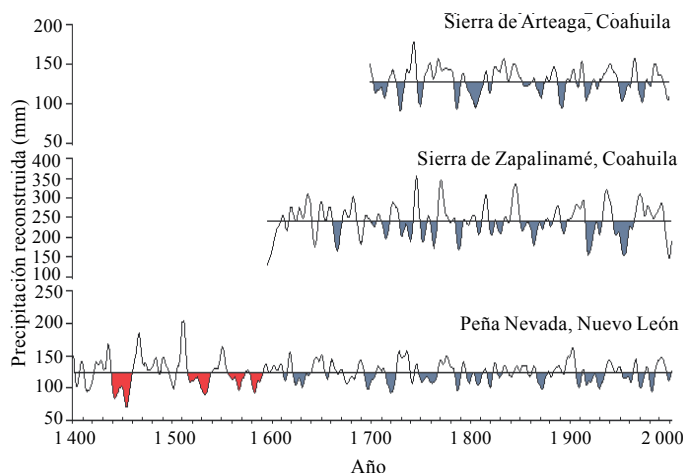


Figura 3. Series de precipitación reconstruida con base en anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Sierra de Arteaga y Peña Nevada) y *Pinus cembroides* (Sierra de Zapalinamé), con una longitud de 300, 400 y 600 años, respectivamente.

Figure 3. Reconstructed precipitation series based on growth rings of *Pseudotsuga menziesii* (Sierra of Arteaga and Peña Nevada) and *Pinus cembroides* (Sierra de Zapaliname) with a length of 300, 400 and 600 years respectively.

La reconstrucción de la precipitación para Sierra de Arteaga con una extensión de 302 años (1700-2001), indica alta variabilidad interanual y multianual que ha caracterizado la precipitación en los pasados tres siglos en esta región (Figura 3). La reconstrucción de precipitación de 410 años (1595-2004) para Sierra de Zapalinamé, permite observar que esta zona ha estado sujeta a una alta variabilidad hidroclimática histórica (Figura 3). Ambas con una variabilidad común en precipitación ($r=0.6$; $p<0.0001$).

La reconstrucción de precipitación generada para Peña Nevada, Nuevo León, con una extensión de 603 años (1400-2002), presenta una variabilidad similar a las series de precipitación reconstruidas para el sureste de Coahuila (Figura 3). La extensión de esta serie paleoclimática permite el análisis de sequías de diferente intensidad registradas en el centro del país y su extensión hasta el noreste de México, así como el efecto que produjeron en la sociedad.

Megasequías en el siglo XV y XVI en México

En los últimos seis siglos en el norte de México, se reconstruyeron cinco sequías intensas en los periodos 1438-1460, 1517-1538, 1714-1723, 1866-1876 y 1968-1986 (Figura 4). La longitud de la serie reconstruida permitió determinar la presencia de sequías ocurridas a principios de la época colonial. La sequía reconstruida para el noreste del país a mediados del siglo XV (1438-1460), es conocida para el centro de México como “Megasequía” (Therrell *et al.*, 2004; Stahle *et al.*, 2011) (Figura 4a y b). Esta sequía se inició en 1454 durante el reinado de Moctezuma Ilhuicamina, provocó pérdida de cosechas, hambre y mortandad; el emperador autorizó a sus súbditos emigrar, acción inusual en la estricta sociedad azteca (Sánchez-Santillán, 2001).

The three series in Figure 3 show high interannual variability, the dark colored filled-areas indicate severe droughts and synchrony in both series and, red areas indicate the so-called mega-droughts because of its extension and impact on society.

The reconstruction of the Sierra de Arteaga precipitation for an extension of 302 years (1700-2001), indicates the high interannual and multi-year variability of precipitation that has been a characteristic of the past three centuries in this region (Figure 3). Reconstruction of precipitation of 410 years (1595-2004) for Sierra of Zapalinamé allows knowing that, this area has been subject to high hydroclimate historical variability (Figure 3). Both have a common variability in precipitation ($r=0.6$; $p<0.0001$).

Reconstruction of precipitation generated for Peña Nevada, Nuevo León, with an extension of 603 years (1400-2002), have a similar variability to the reconstructed precipitation series for southeastern Coahuila (Figure 3). The extension of this paleoclimatic series allows the drought analysis of varying intensity, recorded in the center of the country and its extension into northeastern Mexico, as well as its effect on society.

Megadroughts in the XV and XVI century in Mexico

In the last six centuries in northern Mexico, five severe droughts were rebuilt in the periods 1438-1460, 1517-1538, 1714-1723, 1866-1876 and 1968-1986 (Figure 4). The length of the reconstructed series allowed to determining the presence of droughts in the early colonial period. The drought reconstructed for the Northeast in mid-fifteenth

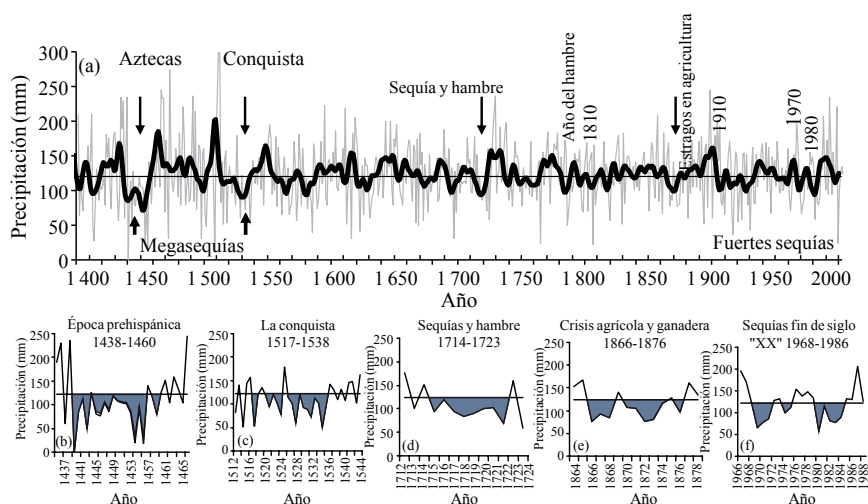


Figura 4. Análisis de la variabilidad de la precipitación en la región noreste de México en los últimos seis siglos.
Figure 4. Analysis of variability of precipitation in northeastern of Mexico in the last six centuries.

En la Figura 4, la línea gris de fondo indica la variabilidad anual, la línea horizontal en negro indica la precipitación promedio y la línea flexible de color negro intenso es un spline ajustado a 10 años, que permite observar los períodos secos (precipitación por abajo de la media) y los períodos húmedos (precipitaciones por arriba de la media) (a). Las sequías más intensas y los estragos en la sociedad, se analizan de manera individual para los períodos de la época prehispánica (b), la conquista (c) y otras sequías severas de los últimos tres siglos que han impactado al sector agrícola del noreste de México (d, e y f).

El impacto social de esta sequía durante la expansión del estado Azteca se desconoce, pero sequías reconstruidas a mediados del siglo XV (1452-1455) para el centro de México, la catalogan como una de las mayores calamidades sociales reportadas en la historia azteca, lo cual evidencia la vulnerabilidad de los cultivos y la producción de alimentos en esa época (Therrell *et al.*, 2004; Stahle *et al.*, 2011). La reconstrucción de precipitación para la región noreste de México (Figura 4a y 4b), permite corroborar la intensidad de la sequía y sus efectos hasta el norte del país, estragos similares o mayores a los registrados en el centro de México.

Sequías adicionales se reconstruyeron a principios del siglo XVI (1517-1538) para el noreste de México (Figura 4a y 4c); archivos históricos y estudios paleoclimáticos han determinado el impacto social de esta sequía en el centro del país. El colapso del estado Azteca se dio con la conquista de los españoles en 1521. La intensa sequía en Mesoamérica a principios del siglo XVI (principios de la era colonial) precedida por la llegada de Cortés y que se extendió por 26 años (1514-1539), interactuó con epidemias y favoreció la catastrófica mortandad de la población azteca a consecuencia de la conquista (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Stahle *et al.*, 2011).

La población nativa de México experimentó una epidemia tras la conquista europea, la epidemia de viruela de 1519 a 1520, provocó la muerte de 5 a 8 millones de personas (Acuña-Soto *et al.*, 2002). Lo anterior se agudizó ante las condiciones extremas de sequía que asolaban al centro de México y cuyos efectos se extendieron hasta el noreste del país (Figura 4c), donde se reconstruyeron condiciones adversas de sequía durante 22 años (1517-1538), muy similar a lo registrado en la región centro y cuyos efectos pudieron ser de consecuencias graves.

century (1438-1460), is known for the center of Mexico as “Megadrought” (Therrell *et al.*, 2004; Stahle *et al.*, 2011) (Figure 4a and 4b). This drought started in 1454 during the reign of Moctezuma Ilhuicamina, causing crop-failures, famine and death; the emperor allowed his subjects to emigrate, which was an unusual action in the strict Aztec society (Sánchez-Santillán, 2001).

In Figure 4, the background gray line indicates the annual variability, black horizontal line indicates the average rainfall and flexible deep black color line is a spline set to 10 years which allows to observe dry periods (precipitation below average) and wet periods (precipitation above average) (a). The more intensive droughts and havoc in society are individually analyzed for the pre-hispanic times (b), conquest (c) and other severe droughts of the last three centuries that have impacted the agricultural sector of northeast Mexico (d, e and f).

The social impact of this drought during the expansion of the Aztec State is unknown, but reconstructed droughts from the mid-fifteenth century (1452-1455) for the center of Mexico, ranked it as one of the greatest social disasters reported in Aztec history, which demonstrates the vulnerability of crops and food production at that time (Therrell *et al.*, 2004; Stahle *et al.*, 2011). The precipitation reconstruction for the northeastern of Mexico (Figure 4a and 4b), corroborates the intensity of drought and its effects on the north of the country, similar or greater damage than those recorded in central Mexico.

Additional droughts were rebuilt in the early XVI century (1517-1538) for northeastern Mexico (Figure 4a and 4c); historical records and paleoclimatic studies have determined the social impact of this drought in central Mexico. The collapse of the Aztec State came with the Spanish conquest in 1521. The intense drought in Mesoamerica in the early XVI century (early colonial), was preceded by the arrival of Cortes and extended for 26 years (1514-1539), it also interacted with epidemics and favored the catastrophic death of the Aztec people as a result of the conquest (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Stahle *et al.*, 2011).

The native population of Mexico experienced an epidemic after the European conquest; the smallpox epidemic of 1519 to 1520, killed 5 to 8 million people (Acuña-Soto *et al.*, 2002). This was exacerbated due to the extreme drought that devastated central Mexico and whose effects extended

El colapso de la población en México como causa del “cocoliztli” (peste en Náhuatl) enfermedad letal, fue rápido, el cual se puede dividir en dos etapas, la primera que inicia en 1545 con la muerte estimada de 5 a 15 millones de personas, más de 80% de la población nativa de México. Una segunda etapa inicia en 1576 matando adicionalmente de 2 a 2.5 millones de personas, alrededor de 50% de la población nativa restante, lo anterior magnificado por la pobre producción de alimento ante las extremas condiciones climáticas (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Therrell *et al.*, 2006).

El centro del país presentó una de las megasequías más intensas y uno de los períodos más prolongados de una pobre producción de maíz y de otros alimentos (Florescano, 1980; 1986; Therrell *et al.*, 2006). Para el noreste de México, 1554 marcó el inicio de una disminución en la precipitación, agudizándose en el periodo 1566-1570, posteriormente, el año de 1576 muestra el menor registro de precipitación y el inicio de un intervalo de sequía que se extendió hasta 1585 (Figura 4a). La falta de archivos históricos para la región noreste del país no permite conocer los efectos de estos fenómenos en la población, pero reconstrucciones paleoclimáticas permiten determinar la magnitud de éstas megasequías, las cuales no fueron eventos localizados en el centro del país, si no que los efectos se extendieron hasta el noreste de México.

Sequías en el siglo XVIII e inicio y mediados del siglo XIX

El periodo de 1714-1723, representa el tercer período seco de cinco eventos de extrema sequía reconstruidos en los últimos 600 años para el noreste de México (Figura 4a y d), que aunque no se dispone de información histórica para conocer el impacto social, se extendió desde el centro del país, donde se reportan sequías severas, hambre y una pobre producción de maíz, en la mayor parte del periodo, y cuyos efectos pudieron ser similares para el noreste de México (Florescano, 1980; 1986; Therrell *et al.*, 2006).

Aún cuando es muy difícil precisar temporalmente el inicio de una sequía, se puede partir de 1785, por ser éste uno de los momentos en que se inició un periodo de malas cosechas en la región del sureste de Coahuila y centro-oeste de Nuevo León, que parece disminuir hasta la mitad de la segunda década del siglo XIX (García-Hernández, 1997) (Figuras 3 y 4), y que además, a partir de este período, se dispone de información histórica documentada para el noreste de México, que permite analizar el impacto de fenómenos climáticos extremos en la población (Figura 4a).

to the northeast (Figure 4c), where the adverse conditions of drought were rebuilt for 22 years (1517-1538), and they were very similar to those recorded in the central region and whose effects could have had severe consequences.

The collapse of Mexico's population because of the “cocoliztli” (plague in Nahuatl) lethal disease was fast and it can be divided into two stages. The first one begins in 1545 with the estimated death of 5 to 15 million people, more than 80% of the native population of Mexico. A second phase began in 1576, killing an additional 2 to 2.5 million people, about 50% of the remaining native population, this worsened due to the poor food production caused by the extreme climatic conditions (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Therrell *et al.*, 2006).

The center of the country had one of the most intense mega-droughts and, one of the most prolonged periods of poor production of maize and other foods (Florescano, 1980 and 1986; Therrell *et al.*, 2006). For Mexico's northeast, 1554 set the beginning of a decline in rainfall, becoming more acute in the period of 1566-1570, subsequently, 1576 showed the lowest value of precipitation and the beginning of a drought interval which lasted until 1585 (Figure 4a). The lack of historical records for northeastern region does not reveal the effects of these phenomena in the population, but the paleoclimatic reconstructions allow to determining the magnitude of these mega-droughts, which were events not located in the center of the country, since its effects extended to northeastern Mexico.

Droughts in the XVIII century and early to mid XIX century

The period 1714-1723 represents the third dry period of five extreme drought events reconstructed in the last 600 years to northeastern Mexico (Figure 4a and 4d). Although, there is no historical information to knowing the social impact, it extended from the center of the country, where severe droughts are reported, hunger and poor production of maize in most of the period and, whose effects could be similar to northeast Mexico (Florescano, 1980; 1986; Therrell *et al.*, 2006).

Even though, it is quite difficult to specify the beginning of a drought, 1785 can be taken as reference, since in this year began a period of bad harvests in the southeast region of Coahuila and central-west Nuevo León, which seems to

En este intervalo de falta de alimento, destaca el periodo 1785-1786, donde se registró una de las sequías más intensas que asoló el centro de México y que provocó escasez de cosechas y de alimentos, periodo conocido como “El Año del Hambre” (Swam, 1981; Florescano, 1986) (Figura 4A). Este evento se describe como el mayor desastre en la historia de la agricultura colonial, registrándose impactos severos no solo en México, si no que se extendió hasta el suroeste de los Estados Unidos de América (Florescano, 1980; Therrell *et al.*, 2006).

Florescano y Swam (1995) mencionan que antes de la guerra de independencia en 1810, el descontento social aumentaba en el norte y centro de México, debido a los altos precios del maíz, sequías y hambre, lo cual contribuyó como un posible detonante de la guerra de independencia.

Sequías en la segunda mitad del siglo XIX

El periodo de 1850-1884 reconstruido como una intensa sequía con impacto en gran parte del país, pero con efectos drásticos principalmente en la parte norte de México (Figuras 3 y 4a y e). Durante los años cincuenta, los periódicos difundían información como la noticia procedente de Sinaloa, sobre la muerte diaria de 500 cabezas de ganado por la sequía, la década de los sesentas parece más prodiga que las anteriores en lo que se refiere a fenómenos climatológicos adversos (Figura 4), durante este periodo, los estados de Nuevo León, Coahuila, San Luis Potosí, Aguascalientes y Durango, comunicaron carestía de semillas (Escobar-Ohmstede, 1997).

Sequías en el siglo XX

Uno de los periodos más importantes de analizar por sus efectos ocasionados, por las intensas sequías en el noreste y en general en todo el país, es la sequía de mediados del siglo XX (Stahle *et al.*, 2009). Las intensas sequías de la década de 1950 y mediados de 1960 (1945-1965), fueron eventos secos igual periodo 1850-1884, han impactado severamente la región norte de México (Seager *et al.*, 2009) (Figuras 3, 4a y 4f). La década de 1950, se considera como sequía extrema que impactó a México y gran parte del suroeste de los Estados Unidos de América (Florescano, 1980).

Sequías severas reportadas a mediados del siglo XX (1945-1960), también se han observado para Texas, Estados Unidos de América, en periodos similares a los registrados para México (Stahle y Malcolm, 1988). La sequía reportada para Durango en el periodo 1950-1965, ha sido una de las sequías más extensas (Stahle *et al.*, 1999; Cleaveland *et al.*, 2003),

decrease until the middle of the second decade of the XIX century (García-Hernández, 1997) (Figures 3 and 4). Moreover, from this period there are documented historical data for northeast Mexico, allowing to analyzing the impact that, the extreme weather events had in general population (Figure 4a).

In this period of lack of food, the period of 1785-1786 highlights, which recorded one of the most intense drought that struck central Mexico and resulted in poor harvests and lack of food, a period known as “The Year of Hunger” (Swam, 1981; Florescano, 1986) (Figure 4A). This event is described as the greatest disaster in the history of colonial agriculture; severe impacts were recorded not only in Mexico, but it also extended into the southwestern United States (Florescano, 1980; Therrell *et al.*, 2006).

Florescano and Swam (1995), mention that, before the Independence war in 1810, there was an increasing social unrest in northern and central Mexico, due to high maize prices, droughts and famine, which may have been a trigger for the independence war.

Droughts in the second half of XIX century

The 1850-1884 period, has been reconstructed as a severe drought impacting much of the country, but with drastic effects mainly in the northern part of Mexico (Figures 3, 4a and 4e). During the fifties, the newspapers spread information like the news from Sinaloa, about the daily deaths of 500 cattle due to the drought. The sixties seem more lavish than the previous ones in terms of weather events (Figure 4), during this period, the states of Nuevo León, Coahuila, San Luis Potosí, Aguascalientes and Durango, reported shortages of seeds (Escobar-Ohmstede, 1997).

Drought in the XX century

One of the most important periods to analyze because of the severe droughts in the Northeast and in general throughout the country, is the drought of the mid-twentieth century (Stahle *et al.*, 2009). The severe droughts of the 1950s and mid 1960s (1945-1965), were dry events like the ones in the 1850-1884 period, which severely impacted the northern region of Mexico (Seager *et al.*, 2009) (Figures 3, 4a and 4f). The 1950 is regarded as extreme drought that hit Mexico and southwestern United States (Florescano, 1980).

que también ocurrió en Sonora y Nuevo Mexico durante 1950-1960, y para este último estado, se considera el periodo de sequía más extremo durante los últimos 1 000 años (Grissino-Mayer, 1995). En reconstrucciones realizadas para Coahuila (Cerano-Paredes, 2004; Villanueva-Díaz *et al.*, 2008) y Chihuahua (Cerano-Paredes *et al.*, 2009), indican que el periodo (1945-1960) ha sido de mayor intensidad para la región norte de México.

Recurrencia de sequías en los últimos 600 años

Con base en el análisis de las series de precipitación reconstruida para Sierra de Arteaga y Sierra de Zapalinamé en el estado de Coahuila, y Peña Nevada en el estado de Nuevo León, se observa una frecuencia de sequías severas cada 100 años (1450, 1550, 1650, 1750, 1850 y 1950), durante los últimos 600 años y sequías menos intensas cada final de siglo (Figura 5); sin embargo, al considerar ambas frecuencias, los eventos registran una recurrencia de 50 años en promedio.

En Sierra de Arteaga, Coahuila (a); Sierra de Zapalinamé, Coahuila (b); y Peña Nevada, Nuevo León (c) de la Figura 5, muestran una variabilidad común en la precipitación y permiten analizar la recurrencia de extensas e intensas sequías cada mediado de siglo, con un fuerte impacto social y económico en la población.

Un análisis espectral permitió identificar a las frecuencias significativas ($p < 0.05$) de 52, 59 y 100 años, al involucrar las series de precipitación reconstruidas que comprenden los últimos 600 años (Figuras 6). En la Figura 6a del estado de Coahuila, indican frecuencias significativas ($p < 0.05$) de eventos ocurridos durante los últimos 400 años (1600-2004); y la Figura 6b de Peña Nevada, Nuevo León, indica frecuencias significativas ($p < 0.05$) durante los últimos 600 años (1400-2002).

Estudios para el centro de México, sobre las sequías en el periodo azteca mediante la interpretación de los códices, han permitido conocer el gran énfasis de la cosmología azteca en predecir eventos naturales en su calendario, asignando un nombre a un evento importante, destacando “El Año del Conejo”, evento asociado con la presencia de eventos catastróficos tales como hambre y muerte, con un ciclo identificado en su calendario de 52 años (Therrell *et al.*, 2004).

Durante el imperio azteca se identificaron 13 eventos de El Año del Conejo (882, 934, 986, 1038, 1090, 1142, 1194, 1246, 1298, 1402, 1454, 1505 y 1558) entre 882

Severe droughts reported in the mid-twentieth century (1945-1960), have also been observed in Texas, United States of America, in similar periods to those reported for Mexico (Stahle and Malcolm, 1988). The drought reported for Durango in the 1950-1965 period, has been one of the longest ones (Stahle *et al.*, 1999; Cleaveland *et al.*, 2003), which also occurred in Sonora and New Mexico during 1950-1960 and for the latter state, it is considered as the most extreme drought in the last 1000 years (Grissino-Mayer, 1995). In reconstructions performed for Coahuila (Cerano-Paredes, 2004; Villanueva-Díaz *et al.*, 2008) and Chihuahua (Cerano-Paredes *et al.*, 2009) indicate that the period (1945-1960) has been more intense for northern Mexico.

Recurrence of droughts in the last 600 years

Based on the analysis of the reconstructed precipitation series for Sierra of Arteaga and Sierra of Zapalinamé in the State of Coahuila, and Pena Nevada in the state of Nuevo León; a frequency of severe droughts every 100 years is observed (1450, 1550, 1650, 1750, 1850 and 1950), during the last 600 years and less severe droughts at the end of each century (Figure 5); however, considering both frequencies, the events show a recurrence of 50 years on average.

Sierra de Arteaga, Coahuila (a); Sierra of Zapalinamé, Coahuila (b) and Pena Nevada, Nuevo León (c) of Figure 5 show a common variability in precipitation and, allow to analyze the recurrence of widespread and intense drought every half century, with a strong social and economic impact in the population.

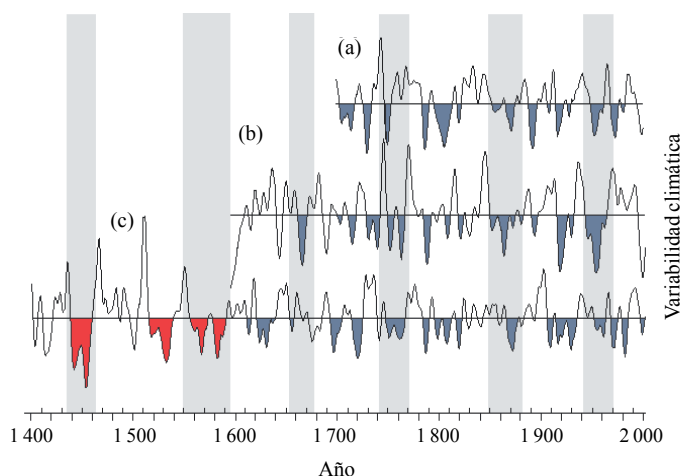


Figura 5. Reconstrucciones de la precipitación para el noreste de México.

Figure 5. Reconstructions of precipitation for northeastern Mexico.

y 1558. Series de índice anillo de crecimiento tanto del norte (Cleaveland *et al.*, 2003) como del centro del país (Therrell *et al.*, 2004), indican que el valor promedio de los años anteriores a El Año del Conejo fueron significativamente menores de lo normal, que indica sequías y una pobre producción de maíz. El ciclo de los años El Conejo puede coincidir con el fin de la era de los aztecas.

A spectral analysis identified a significant frequency ($p < 0.05$) of 52, 59 and 100 years, by involving the reconstructed precipitation series covering the last 600 years (Figure 6). In Figure 6a of the State of Coahuila, significant frequencies are indicated ($p < 0.05$) of events occurred during the past 400 years (1600-2004); and Figure 6b of Peña Nevada, Nuevo León, significant frequencies are indicated ($p < 0.05$) during the last 600 years (1400-2002).

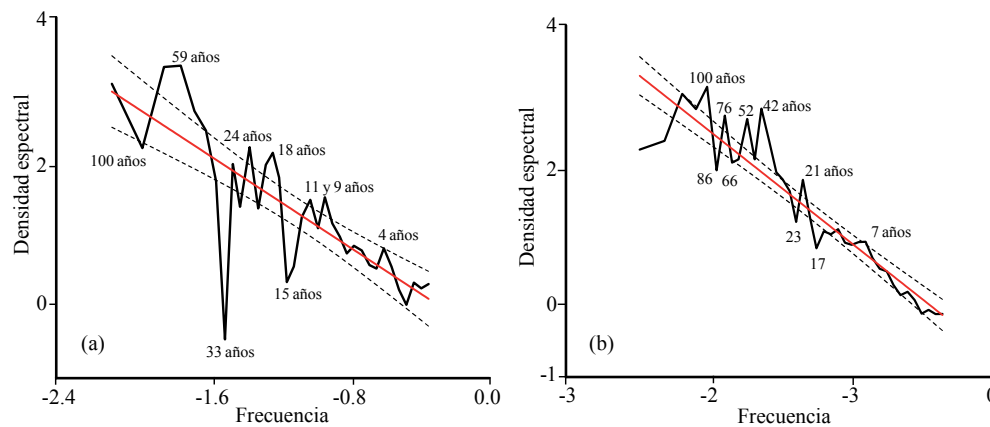


Figura 6. Análisis espectral de las series regionales de precipitación reconstruidas para las Sierras de Arteaga y Zapalinamé en Coahuila (a) y Peña Nevada, Nuevo León (b).

Figure 6. Spectral analysis of the regional precipitation series reconstructed for Sierra of Arteaga and Zapaliname in Coahuila (a) and Peña Nevada, Nuevo León (b).

Para el noreste de México, la serie de precipitación reconstruida que comprende el periodo de 1400-2004, muestra claramente una disminución significativa de la precipitación en los años 1402, 1454, 1505 y 1558 (Años del Conejo), lo que representa evidencia que los fenómenos extremos como sequías, no han sido eventos localizados en el centro del país, por ser donde se dispone de la mayor información histórica, sino que se extendieron hasta el noreste de México y hasta la fecha se registran en periodos que fluctúan de 52 a 59 años (Figuras 6a y 6b).

Las otras frecuencias significativas de 9, 11, 21, 22, 23, 24, 33, 42, 66, 76 y 86 años evidentes en las Figuras 6a y 6b, pueden estar asociadas a la actividad solar, ya que el ciclo de mancha solares varía de 8 a 14 años con un promedio de 11.3 años (Blanco-Macías *et al.*, 2011), mientras que el ciclo magnético solar promedio es de 22 años, e inclusive el ciclo magnético del sol es de 22 años (Babcock, 1961). Coincidiendo con los años 1790 y 1990 (Figura 5), que fueron años con sequías severas de los periodos de máxima actividad solar de los ciclos solares 14 y 22.

Studies on central Mexico about droughts in the Aztec period by interpreting codices, have shed the heavy emphasis of Aztec cosmology to predict natural events in their calendar, assigning a name to each important event, noting “The Rabbit Year” which is an event associated with the presence of catastrophic events such as famine and death, with a 52-year cycle identified in their calendar (Therrell *et al.*, 2004).

During the Aztec empire, 13 events of The Rabbit Year were identified (882, 934, 986, 1038, 1090, 1142, 1194, 1246, 1298, 1402, 1454, 1505 and 1558) between 882 and 1558. The growth ring index series in both the north (Cleaveland *et al.*, 2003), as in the center of the country (Therrell *et al.*, 2004) indicate that the average value of the years prior to The Rabbit Year were significantly lower than normal, indicating drought and poor maize production. The cycle of The Rabbit Years, may coincide with the end of the Aztecs era.

For Mexico’s northeast, the reconstructed precipitation series covering the period of 1400-2004, clearly shows a significant decrease in rainfall in the years 1402, 1454,

Las frecuencias de 4 y 7 años (Figuras 6a y 6b) son asociadas al fenómeno El Niño Oscilación del Sur, pues se presenta con un periodo errático de 2 a 7 años (MacMinowski y Tziperman, 2008), fenómeno de impacto global que provoca sequía e inundaciones en diferentes regiones cuando ocurre.

CONCLUSIONES

La reconstrucción de la variabilidad de la precipitación para los últimos 600 años en el noreste del país, permitió determinar una recurrencia significativa ($p < 0.05$) de eventos hidroclimáticos extremos (sequías) en frecuencias de 50 y 100 años, estas últimas con efectos más severos en la disponibilidad de agua, disminución de la producción agrícola y por consiguiente estragos económicos y sociales significativos en la población. De igual manera, se determinaron frecuencias significativas ($p < 0.05$) de eventos extremos que pueden estar asociadas a la actividad solar y otras a la variabilidad de El Niño Oscilación del Sur.

Es importante considerar los períodos de recurrencia observados en la variabilidad climática reconstruida, ya que estos eventos se han presentado desde inicios del siglo XV a finales del siglo XX. Si las tendencias observadas continúan como en los últimos seis siglos, existe la posibilidad de que el país se vea asolado por una nueva sequía a mediados del siglo XXI, sin dejar de lado, que estos fenómenos se pudieran magnificar y presentarse de manera prematura influenciados por el cambio climático.

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

Acuña-Soto, R.; Stahle, D. W.; Cleaveland, M. K. and Therrell, M. D. 2002. Megadrought and megadeath in 16th Century Mexico. *Emerging Infectious Diseases*. 8(4):360-362.

1505 and 1558 (Rabbit Year), which represents evidence that extreme events like droughts, have not only been located in the center of the country, where there is the largest historical information, but they extended to northeastern Mexico and so far they are recorded in periods ranging from 52 to 59 years (Figures 6a and 6b).

The other significant frequencies of 9, 11, 21, 22, 23, 24, 33, 42, 66, 76 and 86 years evident in Figures 6a and 6b, may be associated with solar activity, as the sunspot cycle varies from 8 to 14 years with an average of 11.3 years (Blanco-Macías *et al.*, 2011); while the average solar magnetic cycle is 22 years (Babcock, 1961). Coinciding with 1790 and 1990 (Figure 5), which were years with severe drought of maximum solar activity periods of solar cycles 14 and 22.

The frequencies of 4 and 7 years (Figures 6a and 6b) may be associated with El Niño Southern Oscillation, as it occurs with erratic period of 2 to 7 years (MacMinowski and Tziperman, 2008), this is a phenomenon of global impact, causing drought and floods in different regions.

CONCLUSIONS

The reconstruction of the precipitation variability for the last 600 years in the northeast, revealed a significant recurrence ($p < 0.05$) of extreme hydroclimatic events (droughts), at frequencies of 50 and 100 years, the latter with more severe effects on water availability, declining agricultural production and thus, significant economic and social havoc in the population. Similarly, significant frequencies were determined ($p < 0.05$) of extreme events that may be associated with solar activity and, others to the variability of El Niño Southern Oscillation.

It is important to consider the recurrence periods observed in the reconstructed climatic variability, as these events have occurred since the early XV century to the late XX century. If trends continue as in the last six centuries, there is a possibility that the country will be ravaged by a drought in the mid-XXI century; without forgetting that these phenomena could be magnified and presented in prematurely, influenced by the climate change.

End of the English version



- Babcock, H. W. 1961. The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-Year Cycle. *Astrophys. J.* 133(2):572-587.
- Blanco-Macías, R.; Valdez-Cepeda, R. D. and Magallanes-Quintanar, R. 2011. Pan evaporation analysis in Central Mexico: trends, self-affinity and important frequencies. *Int. J. Phys. Sci.* 6(3):540-549.
- Cerano-Paredes, J.; Villanueva-Díaz, J.; Fulé, P. Z.; Arreola-Ávila, J. G.; Sánchez-Cohen, I. y Valdez-Cepeda, R. D. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques.* 15(2):27-44.
- Cerano-Paredes, J. 2004. Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. Tesis Profesional. Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila. 152 pp.
- Cleaveland, K. M.; Stahle, D. W.; Therrell, M. D.; Villanueva-Díaz, J. and Burns, B. T. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico. *Climatic Change.* 59:369-388.
- Cook, R. E. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin.* 47:37-59.
- Escobar-Ohmstede, A. 1997. Las sequías y sus impactos en la sociedad del México decimonónico, 1856-1900. Historia y Desastres en América Latina. Volumen II. LA RED. García, A. V. (Coord.). 191-213 pp.
- Florescano, M. E. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), D. F., México, 123 pp.
- Florescano, M. E. 1986. Precios del maíz y crisis agrícolas en México: 1708-1810. Ediciones Era. Distrito Federal, México, 236 pp.
- Florescano, M. E. y Swan, S. 1995. Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana. México. 246 pp.
- García-Hernández, A. 1997. Alternativas ante las sequías de 1789-1810 en la Villa de Saltillo. Coahuila, México. In: García, A. V. (Coord.). Historia y desastres en América Latina. Volumen II. Red de Estudios Sociales en América Latina. D. F., México. 22 pp.
- Grissino-Mayer, H. D. 1995. Tree-ring reconstruction of climate and fire history at El Malpais National Monument New Mexico. Ph. D. Dissertation, The University of Arizona. Tucson, USA. 407 pp.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research.* 57(2):205-221.
- Holmes, L. R. 1983. Computer-assited quality control in tree-ring dating and mesurement. *Tree-Ring Bulletin.* 43:69-78.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2000. Extractor rápido de información climatológica III (ERIC). Software. Jiutepec, Morelos, México.
- MacMynowski, D. G. and Tziperman, E. 2008. Factors affecting ENSO's period. *J. Atmosph. Sci.* 65:1570-1586.
- Prager, E. J. y Earle, S. A. 2001. Los océanos. Un llamado a la conciencia mundial. McGraw Hill. España, 382 pp.
- Robinson, W. J. and Evans, R. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin.* 40:59-64.
- Sánchez-Santillán, N. 2001. Las sequías en México: un breve esbozo. Teorema ambiente. *Revista Técnica Ambiente.* Núm. 30. 1-12 pp.
- Seager, R. T.; Davis, M.; Cane, M.; Naik, N.; Nakamura, J.; Li, C.; Cook, E. and Stahle, D. W. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera.* 22(1):1-31.
- Stahle, W. D. and Malcolm, K. C. 1988. Texas drought history reconstructed and analyzed from 1698 to 1980. *J. Clim.* 1:59-74.
- Stahle, W. D.; Cleaveland, M. K.; Therrell, M. D. and Villanueva-Díaz, J. 1999. Tree-ring reconstruction of Winter and Summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years. 10th Conference of Global Change Studies. Preprint volume, American Meteorological Society, 79th Annual Meeting. January 10-15. Dallas, Texas, USA. 205-211 pp.
- Stahle, W. D.; Cook, E. R.; Villanueva-Díaz, J.; Fye, F. K.; Burnette, D. J.; Griffin, D.; Acuña-Soto, R.; Seager, R. and Heim, R. R. 2009. Early 21st Century Drought in Mexico. *EOS*, 90(11):89-90.
- Stahle, D. W.; Villanueva-Díaz, J.; Burnette, D. J.; Cerano-Paredes, J.; Heim Jr., R. R.; Fye, F. K.; Acuña-Soto, R.; Therrell, M. D.; Cleaveland, M. K. and Stahle, D. K.. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters.* Vol. 38, L05703. 1-4 pp.

- Stokes, A. M. and Smiley, T. L. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press. Chicago. 73 p.
- Swan, S. L. 1981. Mexico in the little ice age. *J. Interdiscipl. Hist.* 11:633-648.
- Therrell, M. D.; Stahle, D. W. and Acuña-Soto, R. 2004. Aztec drought and the "Curse of One Rabbit," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 85, 1263-1272, doi:10.1175/BAMS-85-9-1263.
- Therrell, D. M.; Stahle, D. W.; Villanueva-Díaz, J.; Cornejo-Oviedo, E. and Cleaveland, M. K. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474-2001. *Clim. Change.* 74:493-504.
- Villanueva-Díaz, J.; Cerano-Paredes, J. y Estrada-Ávalos, J. 2008. Reconstrucción de precipitación estacional de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Sierra la Madera. Cuatro Ciénegas, Coahuila. *Rev. Cienc. For. Méx.* 33(104):17-35.