



ARTÍCULO / ARTICLE

RECONSTRUCCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ANUAL PARA LA REGIÓN ORIENTAL DEL ESTADO DE TLAXCALA

ANNUAL PRECIPITATION RECONSTRUCTION OF THE EASTERN REGION OF TLAXCALA STATE

Gabriel F. Cardoza Martínez¹, Julián Cerano Paredes², José Villanueva Díaz², Rosalinda Cervantes Martínez², Vidal Guerra de la Cruz³ y Juan Estrada Ávalos²

RESUMEN

Los anillos de crecimiento de *Pinus cembroides* se emplearon como *proxy* para reconstruir la variabilidad histórica de la precipitación anual durante 159 años (1850 a 2008) en la región oriental del estado de Tlaxcala. La reconstrucción mostró alta variación interanual y entre décadas en las lluvias. Las sequías más intensas se registraron para los periodos de 1887 a 1904, de 1969 a 1975 y de 1982 a 1991; de igual manera, se detectaron lapsos con precipitaciones superiores a la media regional de 1860 a 1863, de 1867 a 1876, de 1905 a 1909, de 1934 a 1940, de 1967 a 1969, de 1981 a 1982, de 1992 a 1993 y de 2000 a 2001. De mediados del siglo XX a principios del XXI se observó una influencia positiva de la Oscilación del Sur El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) sobre la alteración de la precipitación en años específicos, así como en la aparición tardía del Monzón de Norteamérica (NAMS, por sus siglas en inglés), particularmente, de 1970 a 1974, de 1988 a 1989 y de 1998 a 1999, lo que provocó fuertes periodos secos, que tuvieron un impacto social y económico importante; un ejemplo claro es el que aconteció en los años 70, cuando la interacción de ambos fenómenos dio origen al agostamiento más intenso en el periodo analizado para esta zona del estado.

Palabras clave: Dendrocronología, ENSO, NAMS, *Pinus cembroides* Zucc., reconstrucción de precipitación, Tlaxcala.

ABSTRACT

The ring-width index of *Pinus cembroides* was taken as "proxy" to reconstructed historical precipitation variability in eastern Tlaxcala region. The annual precipitation was reconstructed for 159 years (1850-2008) and indicated high inter-annual and decadal variability. The most intense droughts were reconstructed for the 1887 to 1904, 1969 to 1975, and 1982 to 1991 periods. Wet episodes occurred from 1860 to 1863, 1867 to 1876, 1905 to 1909, 1934 to 1940, 1967 to 1969, 1981 to 1982, 1992 to 1993, and 2000 to 2001. From the middle of the 20th century to the early years of 21st century, the ENSO phenomenon showed a significant influence on the precipitation variability, for intense ENSO years, in particular. Likewise, severe ENSO events were also related to the late start of NAMS, particularly for the 1970 - 1974, 1988 - 1989 and 1998- 1999 periods, causing decrease in rainfall (severe droughts), a situation that affected agriculture production, which provoked an intense social and economic impact; a clear example is the severe drought of the 1970's, when the interaction of both phenomena gave rise to the worst drought in the last 159 years for the eastern region of Tlaxcala state.

Key words: Dendrochronology, ENSO, NAMS *Pinus cembroides* Zucc., reconstructed precipitation, Tlaxcala state.

Fecha de recepción/date of receipt: 25 de septiembre de 2012; Fecha de aceptación/date of acceptance: 20 de agosto de 2013.

¹ Facultad de Agricultura y Zootecnia. Universidad Juárez del Estado de Durango.

² Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. INIFAP. Correo-e: cerano,julian@inifap.gob.mx

³ Sitio Experimental Tlaxcala, CIR Centro, INIFAP.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un creciente interés por el estudio de los cambios del clima global a través del tiempo y su posible comportamiento futuro; para lograr una mayor comprensión del tema es necesario utilizar los datos climáticos, tanto procedentes de registros instrumentales como de los *proxy* (Méndez *et al.*, 2008).

En México y, en particular en el estado de Tlaxcala, las referencias de lluvia que se han registrado en las estaciones meteorológicas son de corta extensión (en la mayoría de los casos, apenas superan los 60 años) y pobre calidad (IMTA, 2000); ante esta situación es importante reconstruir periodos más extensos (cientos o miles de años) que permitan examinar de manera confiable la variabilidad histórica de las lluvias (Scott, 1966; O'Hara y Metcalfe, 1997); una de las fuentes indirectas más seguras para conocerla son los anillos de crecimiento de árboles (Cerano *et al.*, 2011).

El pino piñonero (*Pinus cembroides* Zucc.), por sus adaptaciones morfológicas, fisiológicas y de distribución posee características idóneas para reconstruir la información paleoclimática (Constante *et al.*, 2009). A pesar de lo anterior, en el país aún son escasas las investigaciones dendroclimáticas que utilizan piñoneros para modelar la variación hidroclimática (Constante *et al.*, 2009; Santillán-Hernández *et al.*, 2010) como sucede en el centro de México (Cortés, 2010); uno de los primeros estudios se desarrolló en el área natural protegida Sierra de Zapalinamé, en el estado de Coahuila, donde se determinó el potencial de la especie para registrar estas modificaciones (Constante *et al.*, 2009).

Por lo tanto, con el presente trabajo se pretende contribuir a la integración de una red dendrocronológica para determinar las fluctuaciones en la precipitación y los patrones de circulación general que más influyen en su comportamiento a nivel regional, lo cual redundará en una mejor planeación del uso del agua. Así, los objetivos planteados consistieron en generar una cronología de anillo total de *P. cembroides* para reconstruir los cambios de las lluvias de la zona oriental del estado de Tlaxcala; y analizar la influencia de fenómenos de circulación general como El Niño Oscilación del Sur y El Monzón de Norteamérica sobre la variabilidad de la precipitación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio

Santa María de las Cuevas se localiza en el municipio Alzayanca, en la parte oriental del estado de Tlaxcala (Figura 1). El sitio seleccionado presenta una altitud promedio de 2 582 m, en las coordenadas geográficas 19° 23' 41.4" N y 97° 43' 34.5" O.

INTRODUCTION

At present, there is a growing interest in global climate change through the years and its probable future behavior; to accomplish a better understanding of the topic, it is necessary to use the climatic data, both, from records as well as from proxy (Méndez *et al.*, 2008).

In Mexico and particularly in the state of Tlaxcala, the rain references that have been recorded in the meteorological stations are of short length (in most cases they are almost over 60 years) and poor quality (IMTA, 2009); on the face of this situation, it is important to restore longer periods (hundreds or thousands of years) that allow a reliable examination of the historic variation of rains (Scott, 1966; O'Hara and Metcalfe, 1997); one of the most secure indirect sources to approach it are tree rings (Cerano *et al.*, 2011).

Pinyon pine (*Pinus cembroides* Zucc.) has ideal characteristics to reconstruct the paleoclimatic information (Constante *et al.*, 2009), from their morphological and physiological adaptations and distribution. Notwithstanding the foregoing, in the country there is still scarce dendroclimatic research that uses these pines for modeling hydroclimatic variation (Constante *et al.*, 2009; Santillán-Hernández *et al.*, 2010), as it happens in central Mexico (Cortés, 2010); one of the first ones was developed in the Sierra de Zapalinamé, a natural protected area in Coahuila state, where the potential of this species to record these changes was determined (Constante *et al.*, 2009).

Therefore, the actual work intends to contribute to the integration of a dendrochronological network, which will determine fluctuations in precipitation and general circulation patterns that influence their behavior at the regional level, which will result in a better planning in the use of water. Thus, the objectives considered the generation of a total ring chronology of *P. cembroides* that will make it possible to reconstruct changes in rainfall for the eastern part of the state of Tlaxcala; and to analyze the influence of phenomena on rainfall variability in general circulation as El Niño Southern Oscillation and the North American Monsoon.

MATERIALS AND METHODS

The study area

Santa María de las Cuevas is located in Alzayanca municipality at the east of Tlaxcala state (Figure 1). The selected place has an average altitude of 2 582 m asl, between 19° 23' 41.4" N and 97° 43' 34.5" W.

The prevailing weather is semi-dry and the warmest season takes place from March to May; the annual average minimal temperature is 6.3 °C and maximum, 22.3 °C; the average

El clima predominante es semiseco y la época más calurosa ocurre de marzo a mayo; la temperatura promedio mínima anual es de 6.3 °C y la máxima de 22.3 °C; la precipitación media en el año fluctúa de 400 a 700 mm, con mayor incidencia en julio, agosto y septiembre (IMTA, 2009).

El tipo de vegetación en la localidad es una asociación de especies dominado fisonómicamente por palma (*Yucca carnerosana* auct. non (Trel.) McKelvey) y pino piñonero (*P. cembroides*), restringidas a microclimas húmedos en el oriente del estado, en colindancia con Puebla (Rzedowski, 1986; Perry, 1991).

rainfall during the year varies from 400 to 700 mm, with greater income in July, August and September (IMTA, 2009).

The vegetation type in the locality is a species association physiognomically dominated by palm (*Yucca carnerosana* auct. non (Trel.) McKelvey) and pinyon pine (*P. cembroides*), restricted to humid microclimates at the east of the state, where Puebla is a neighboring state (Rzedowski, 1986; Perry, 1991).

Selective sampling under the criterion of choosing the mature and over-mature trees to generate large sets of time as

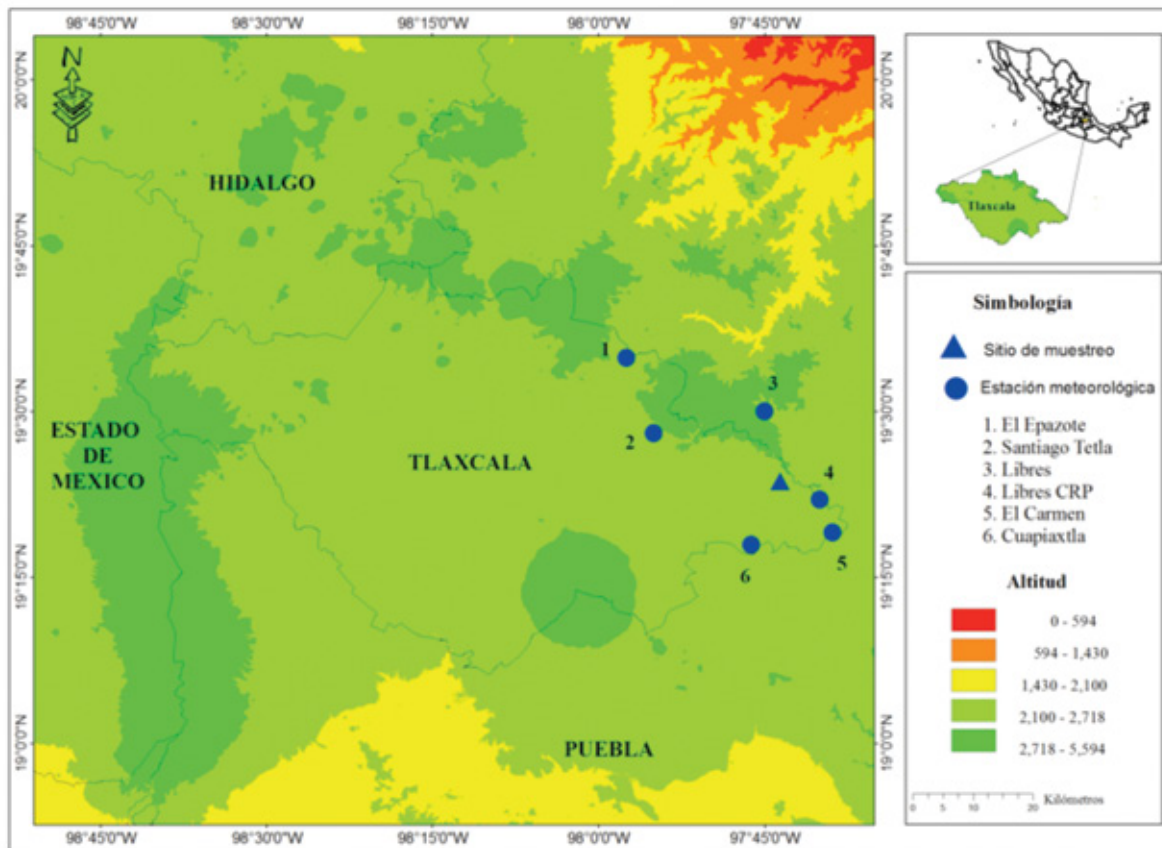


Figura 1. Localización del sitio de muestreo denominado “El Piñonal”, en Santa María de las Cuevas, municipio Altzayanca, Tlaxcala, y las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis dendroclimático.

Figure 1. Location of the sampling site known as “El Piñonal”, in Santa María de las Cuevas, Altzayanca municipality, Tlaxcala, and the weather stations used for the dendroclimatic analysis.

Se utilizó el muestreo selectivo bajo el criterio de elegir el arbolado maduro y sobremaduro para generar series de tiempo lo más extensas posible. Los núcleos de crecimiento o virutas se sacaron con un taladro Pressler de diferentes longitudes y diámetros de barrena (Stokes y Smiley, 1968), a razón de dos muestras por árbol como mínimo, a 1.30 m de altura; dichas muestras se colocaron en popotes y fueron etiquetadas para su traslado al Laboratorio de Dendrocronología del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación

possible was used. Growth cores or chips were removed with a drill Pressler of different lengths and diameters bit (Stokes and Smiley, 1968), at the rate of two samples per tree at least, at 1.30 m high; the samples were placed in straws and were labeled for shipment to the Laboratory of Dendrochronology Cenid-RASPA in Gómez Palacio, Durango, where they were processed.

The samples were exposed at room temperature to favor the loss of moisture; they were mounted on wooden moldings and

Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (Cenid-RASPA) en Gómez Palacio, Durango, donde se procesaron.

Las muestras se expusieron a temperatura ambiente para propiciar la pérdida de humedad, se montaron en molduras de madera y se pulieron con lijas de diferente textura (granos progresivos de 120 a 1 200) para resaltar las estructuras de incremento al año, se midieron con un micrómetro Velmex con precisión de 0.001 mm (Robinson y Evans, 1980). El fechado de cada una de las muestras se llevó a cabo mediante técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968). La calidad del fechado y medición de las series de crecimiento se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983).

Los índices dendrocronológicos se generaron con el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1984), que estandariza las secuencias individuales al ajustar diferentes curvas (exponencial negativa, lineal, etcétera) según el desarrollo de cada individuo: se divide cada valor anual de medición por el que se obtiene de la curva, lo que elimina la varianza derivada de factores como la edad, la competencia, la diferencia de productividad entre micrositos y los cambios en el ambiente que no se relacionan con el clima, y al mismo tiempo, se maximiza la señal climática (Fritts, 1976; Cook, 1987).

Con base en los índices de crecimiento (cronología) y los registros de precipitación regional las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio de 1966 a 2002 (37 años): Libres, 97° 45' 00" O, 19° 30' 00" N; Libres CRP, 97° 40' 00" O, 19° 22' 01" N; El Epazote, 97° 57' 28" O, 19° 34' 51" N; El Carmen, 97° 38' 49" O, 19° 19' 04" N; Santiago Tetla, 97° 55' 01" O, 19° 28' 01" N y Cuapixtla, 97° 46' 12" O, 19° 17' 56.4" N (Figura 1); se desarrolló una función de respuesta que permitió conocer la época del año en la cual influye la lluvia en el desarrollo del árbol, a partir de un análisis de correlación y su verificación con PRECON (Fritts, 1999).

Se generó una ecuación de transferencia entre los datos observados de precipitación y el índice de anillo total, mediante el uso del programa SAS versión 9 (SAS, 1988). Con el modelo se reconstruyó la precipitación para el período que cubren estos datos, y, con la subrutina VERIFY5 del paquete de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés) se validó con las pruebas de calibración, mismas que se aplicaron a la mitad de los datos, y de verificación que se les practicó a la mitad restante (Fritts, 1999).

La prueba de calibración se utilizó para examinar la relación entre ambas variables, mientras que con la verificación se validó la reconstrucción (Fritts, 1976). Finalmente, la ecuación de transferencia se validó para el período total de datos de precipitación disponibles. Esta expresión se usó para desarrollar la reconstrucción de precipitación en la longitud total de la serie dendrocronológica generada.

polished with sandpaper of different texture (progressive grain from 120 to 1 200 (Cerano, 2004) to highlight the structures of annual increment; they were measured with a 0.001 mm Velmex accuracy micrometer (Robinson and Evans, 1980). The dating of each of the samples was carried out by standard dendrochronological techniques (Smiley and Stokes, 1968). The quality of dating and the measurement of growth series was made with the COFECHA program (Holmes, 1983).

The dendrochronological indexes were generated with the ARSTAN program (Cook and Holmes, 1984), that puts into standard the individual sequences when different curves are fitted (negative exponential, lineal, etc), according to the development of each individual: every annual measurement is divided by what is obtained from the curve, which eliminates the variance derived from the factors such as age, competition, the difference in the productivity of the microsites and the changes in the environment that do not relate with climate, and at the same time, the climate signal is maximized (Fritts, 1976; Cook, 1987).

Based upon the growth indexes (chronology) and the records of regional precipitation of the weather stations near the study area, from 1966 to 2002 (37 years): Libres, 97° 45' 00" O, 19° 30' 00" N; Libres CRP, 97° 40' 00" O, 19° 22' 01" N; El Epazote, 97° 57' 28" O, 19° 34' 51" N; El Carmen, 97° 38' 49" O, 19° 19' 04" N; Santiago Tetla, 97° 55' 01" O, 19° 28' 01" N and Cuapixtla, 97° 46' 12" O, 19° 17' 56.4" N (Figure 1), a response equation was prepared which made it possible to know the time of the year in which rain influences the development of the tree, from a correlation analysis and its verification with PRECON (Fritts, 1999).

A transference equation was made between the observed rain data and the total ring index by using the SAS program 9th version (SAS, 1998). Precipitation for the period covered by these data was reconstructed with the model, and with the VERIFY5 of the Dendrochronological Programs of the University of Arizona (DPL), it was validated through the calibration tests, which were applied to half of the data and of verification, which used the rest of the data.

The calibration test helped to examine the relationship between the two variables, while verification validated the reconstruction (Fritts, 1976). Finally, the transfer equation was ratified for the total period of available precipitation data, as it enabled to implement rain reconstruction in the total length of the dendrochronological series.

To highlight the presence of low-frequency events (dry and wet phases), the reconstructed data were smoothed with a flexible 10 years curve with the FMT subroutine DPL (Cook and Peters, 1981), which was confirmed with historical and paleoclimatic series generated in central and northern Mexico.

Para destacar la presencia de eventos de baja frecuencia (fases secas y húmedas), los datos reconstruidos se suavizaron con una curva flexible de 10 años con la subrutina FMT del DPL (Cook y Peters, 1981), lo cual se constató con archivos históricos y series paleoclimáticas procedentes del centro y norte de México.

Finalmente, se analizó el impacto de eventos extremos de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y se verificó mediante un análisis espectral con base en gráficos de coherencia de ondeleta, al comparar la precipitación reconstruida y el Índice de Lluvia Tropical (TRI, por sus siglas en inglés), estimativo de la variabilidad del ENSO.

Para determinar la influencia del Monzón de Norteamérica (NAMS, por sus siglas en inglés) sobre la variabilidad de la lluvias de la parte oriental del estado de Tlaxcala, se trabajó sobre la diferencia mensual en la región de 1960 a 2002 (Gochis *et al.*, 2006).

RESULTADOS

Se obtuvo un total de 369 muestras selectivas o núcleos de crecimiento, que pertenecieron a 129 árboles de *P. cembroides*; de ellas, 94.5 % de los ejemplares considerados se incluyen en el intervalo de edad entre 50 y 130 años y un pequeño porcentaje de ellos (3.8 %) cubrió el total del periodo reconstruido (Figura 2c). Lo anterior sugiere que el rodal de esta especie en Tlaxcala es joven, en comparación con otras poblaciones del norte de México, donde se desarrollan individuos que superan los 400 años (Constante *et al.*, 2009); se separaron 51 ejemplares (aquellos que mostraron mayor correlación entre ellos y los más longevos) con el objetivo de obtener la cronología más extensa posible y, que a su vez estuviera apoyada con un buen tamaño de muestra.

Las diferentes series de ancho de anillo exhibieron una correlación significativa ($r = 0.67$, $p < 0.05$) y el programa COFECHA indica que para que exista, se debe obtener como mínimo $r = 0.328$ ($p < 0.01$); por lo tanto, hay una respuesta climática común aceptable entre los árboles (Holmes, 1983). Por último, se generó una serie dendrocronológica de índice de anillo con una longitud total de 159 años (1850-2008) (Figura 2). Este gráfico consiste en una serie promedio de las mediciones de ancho de anillo después del proceso de estandarización y muestra la variabilidad ambiental a lo largo del periodo de 1850 a 2008; la línea en color rojo representa el ajuste de una curva exponencial negativa (a); una línea suavizada de 10 años para resaltar los eventos de baja frecuencia (b); y (c) el tamaño de muestra en los diferentes segmentos de la cronología.

Finally, the impact of extreme events of El Niño Southern Oscillation (ENSO) was analyzed and verified by spectral analysis based on wavelet coherence graphs, comparing the reconstructed precipitation and Tropical Rain Index (TRI, for its acronym in English), which is an estimate of ENSO variability.

In order to determine the influence of the North American Monsoon (NAMS) on the variability of rainfall in the eastern part of the state of Tlaxcala, the monthly difference in the region from 1960 to 2002 (Gochis *et al.*, 2006) was considered.

RESULTS

A total of 369 selective samples or growth cores, that belonged to 129 *P. cembroides* trees; 94.5 % of them were in the 50 to 130 year range and a small percentage (3.8 %) covered the whole reconstructed period (Figure 2c), which means that this stand is made up of young trees of this species in Tlaxcala compared to other populations of northern Mexico, where some individuals can be elder than 400 years old (Constante *et al.*, 2009); 51 trees were chosen (those which showed greater correlation among them and the eldest) in order to have the longest possible chronology, and that it could be supported by a good sample size.

The different tree ring series showed a significant correlation ($r = 0.67$, $p < 0.05$) and COFECHA program indicates that it necessary to have $r = 0.328$ ($p < 0.01$) minimum; therefore, there is an acceptable regular climatic response among trees (Holmes, 1983). Finally, a tree ring index dendrochronological series of a total length of 159 years (1850-2008) was generated (Figure 2). This is an average number of the ring width measurements after standardization process and showing environmental variability throughout the period from 1850 to 2008; the red line represents the fit of a negative exponential curve (a) and a smoothed line 10 years to highlight the low-frequency events (b) and (c) the sample size in the different segments of the timeline.

Answer Function

To determine the rainy phase in which the growth of *P. cembroides* occurs, data from the six weather stations closest to the study area (Figure 1), with the regional average were considered from 1966 to 2002.

The cycle with the highest correlation with the chronology ($r = 0.71$, $p < 0.001$) was that from January to December, which means that the development of *P. cembroides* in the area is a response to the total annual precipitation (Figure 3), and has the potential to rebuild the rain variation.



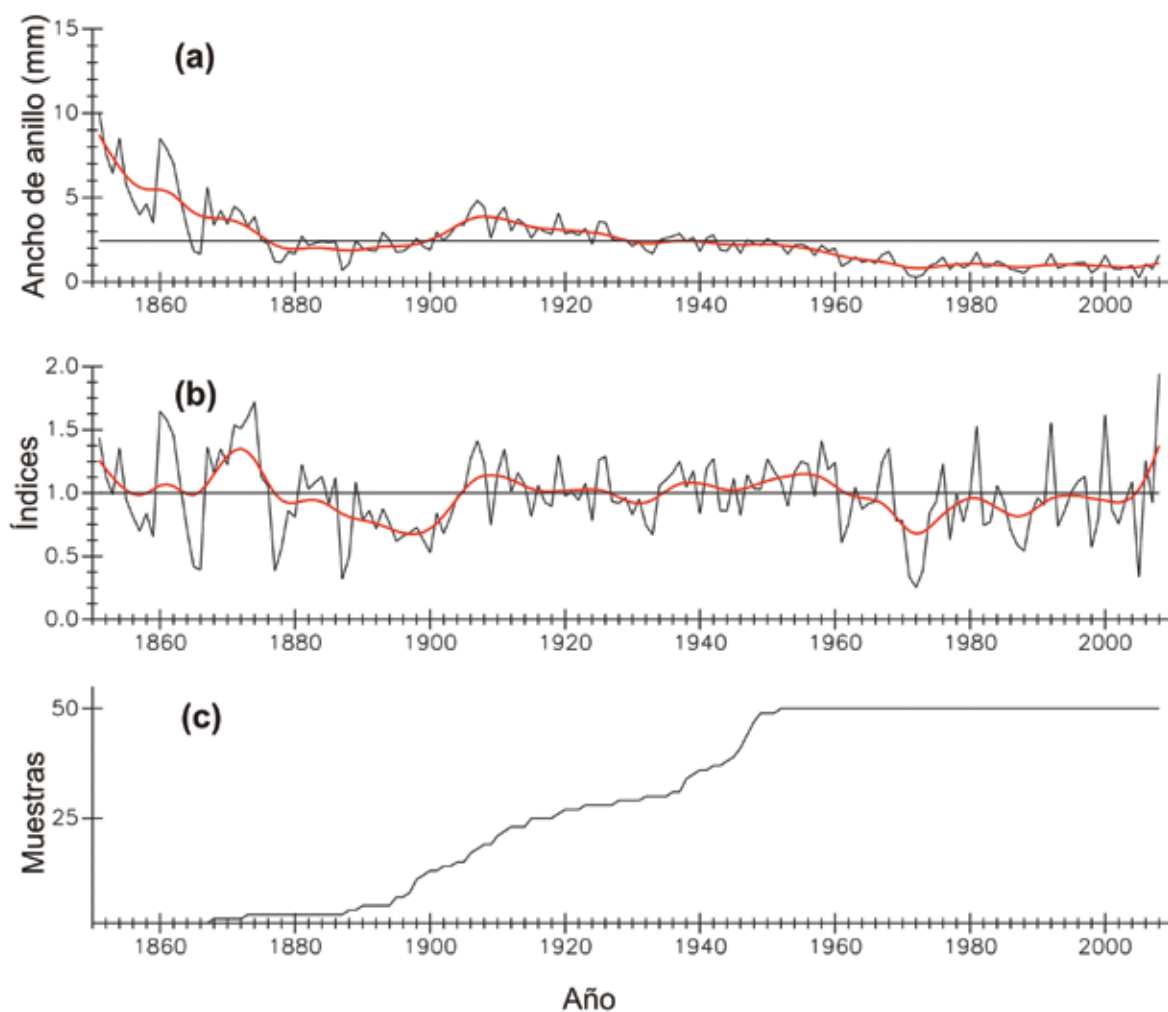


Figura 2. Cronología de índice de ancho de anillo para *Pinus cembroides* Zucc.
 Figura 2. Chronology of the ring width index for *Pinus cembroides* Zucc.

Función de respuesta

Para precisar la fase de lluvias en la que ocurre el crecimiento de *P. cembroides*, se consideraron los datos de las seis estaciones climáticas más cercanas al área de estudio (Figura 1), con el promedio regional desde 1966 hasta 2002.

El ciclo que tuvo mayor correlación con la cronología ($r = 0.71$, $p < 0.001$) fue el de enero a diciembre, lo cual sugiere que el desarrollo de *P. cembroides* en la zona responde a la precipitación total anual (Figura 3), y tiene potencial para reconstruir la variación pluvial.

Reconstrucción de la precipitación anual

Al comparar la serie de ancho de anillo con los datos de lluvia acumulada en el año durante el intervalo comprendido entre 1966 y 2002 (Figura 4), se obtuvo una correlación de 0.74

Reconstruction of annual rainfall

By comparing the number of ring width data accumulated rainfall in the year during the interval between 1966 and 2002 (Figure 4), a correlation of 0.74 ($p < 0.01$) was obtained, this is a significant potential for response and generate a regression model designed to show the variation in rainfall total length of the chronology (tables 1 and 2). The year 2000 was removed as it represents an abnormal value.

The regression model that was obtained from the tree ring index and precipitation in the common period was considered statistically acceptable ($p < 0.001$) to do the restoration of rains when considering the common range (1966-2002).



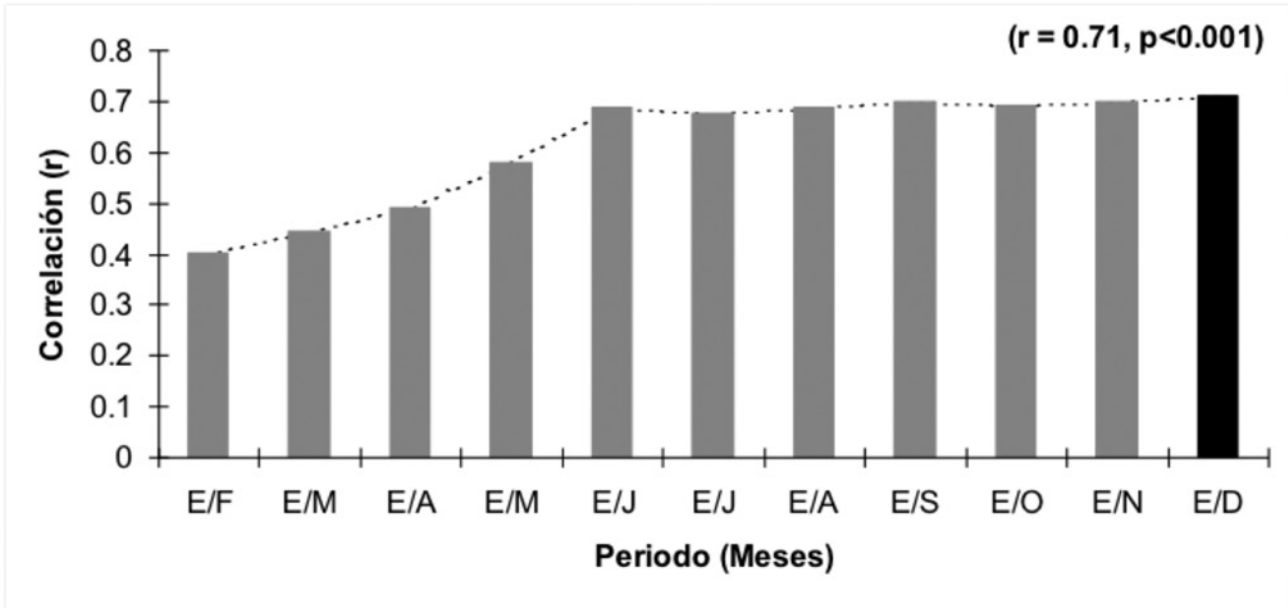


Figura 3. Función de respuesta entre el índice de ancho de anillo de *Pinus cembroides* Zucc. y la precipitación regional para el periodo de 1966 a 2002.

Figure 3. Response function between ring width index of *Pinus cembroides* Zucc. and regional precipitation for the 1966-2002 period.

($p < 0.01$), esto es una respuesta significativa y potencial para generar un modelo de regresión que permita conocer la variación pluvial en la longitud total de la cronología (cuadros 1 y 2). Se eliminó el año 2000 por representar un valor anormal.

The linear model generated for the reconstruction was the following:

$$Y_t = 254.7054 + 298.1782 * X_t$$

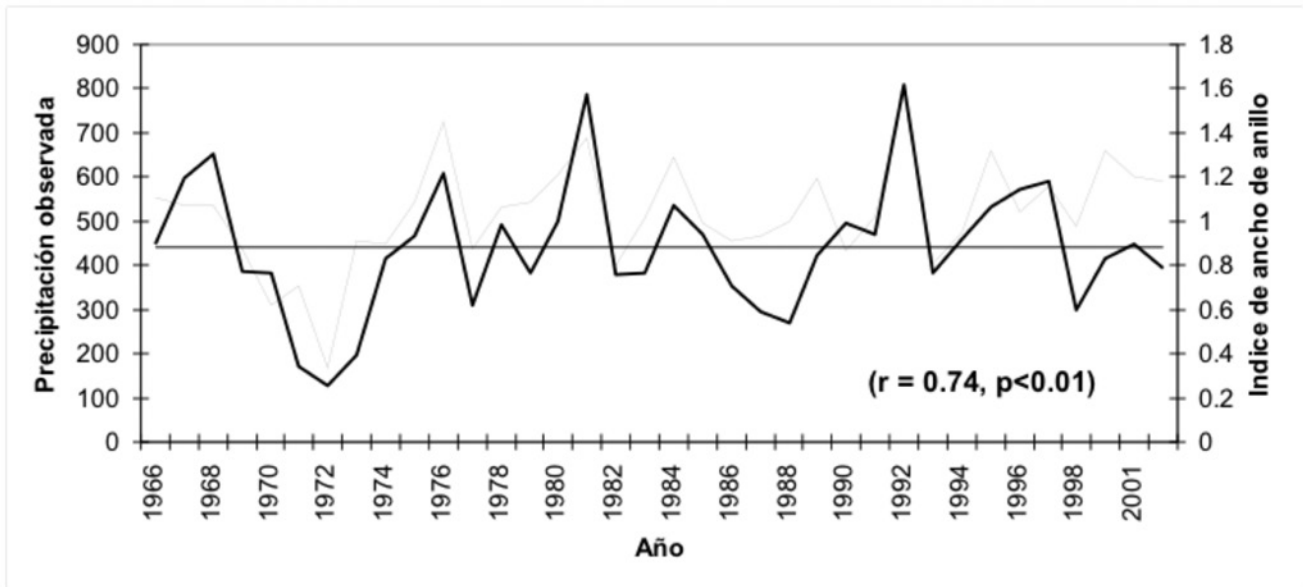


Figura 4. Relación entre el índice de ancho de anillo (línea continua) y la precipitación regional anual observada (línea punteada).

Figure 4. Relation between the tree ring width index (solid line) and the annual and observed regional rain fall (dotted line).

Cuadro 1. Modelo generado para la reconstrucción de la precipitación total anual.

Table 1. Generated model for the reconstruction of the annual total precipitation.

Período	r ²	Coefficientes	Error estándar	Prueba de t	Probabilidad
1966-2002	0.55	a 254.7054	42.6213	5.9760	0.000001
		b 298.1782	45.8090	6.5091	0.000001

r² = Variabilidad de la precipitación explicada por el modelo; a y b = Coeficientes del modelo de regresión significativos a P<0.01

r² = Variability of the precipitation explained by the model; a and b = Significant coefficients of the regression model at P<0.01

Cuadro 2. Análisis de varianza para el modelo obtenido.

Table 2. Analysis of variance for the obtained model.

Fuente de Variación	Suma de cuadrados	DF	Cuadrados medios	f	p
Regresión	273 591.2	1	273 591.2	42.3690	0.000001
Residual	219 549.7	34	6 457.3		
Total	493 140.9				

El modelo de regresión es significativo a P<0.01

The regression model is significant at P<0.01

El modelo de regresión que se obtuvo a partir del índice de anillo y la precipitación en el periodo común se consideró estadísticamente aceptable (p<0.001) para realizar la restauración de las lluvias al considerar el intervalo común (1966-2002).

El modelo lineal generado para la reconstrucción fue el siguiente:

$$Y_t = 254.7054 + 298.1782 * X_t$$

Donde:

Y_t = Valor de precipitación total anual (mm) reconstruido en el año t

X_t = Índice de ancho de anillo en el año t.

Calibración y verificación

Se requirió sustentar estadísticamente el prototipo con dos procesos fundamentales: la calibración y la verificación de los datos observados y reconstruidos. La primera, se realizó en la mitad de los registros climáticos disponibles más recientes (1979 a 2002), mientras que la segunda, en la mitad restante (1966 a 1978) (Fritts, 1976).

La calibración obtuvo una correlación altamente significativa, r = 0.69 (r² = 0.48, p<0.001), que explica 48 % de la variación pluvial (Figura 5) y la verificación arrojó r = 0.76 (r² = 0.58, p<0.0001), que justifica 58 % de los cambios en la lluvia (Figura 5). Dado que ambos subperiodos mostraron correspondencias importantes (p<0.001), el modelo generado para el total de los datos disponibles (1966-2002; r² = 0.55, p<0.0001) se utilizó con el fin de reconstruir la variabilidad de la precipitación en la cronología (1850-2008).



Where:

Y_t = Annual total precipitation value (mm) reconstructed in the t year

X_t = Tree ring width index in the t year

Calibration and verification

It was necessary to statistically support the prototype of two basic processes: calibration and the verification of the observed and reconstructed data. The first one was made with half of the most recent available climatic data (1979 to 2002), while in the second, in the other half (1966 to 1978) (Fritts, 1976).

Calibration had a highly significant correlation, r = 0.69 (r² = 0.48, p<0.001) which explains 48 % of the rain variation and verification, with r = 0.76 (r² = 0.58, p<0.0001), which proves 58 % of the changes in rain (Figure 5). Since both subperiods showed important connections (p<0.001), the generated model for the total of the available data (1966-2002; r² = 0.55, p<0.0001) was used in order to reconstruct the variability of precipitation in the chronology (1850-2008).

Variability of the reconstructed precipitation

The annual rainfall variation for the Eastern region of Tlaxcala state from 1850 to 2008 was reconstructed; the paleoclimatic series showed intense changes between years, in which droughts were identified from 1856 to 1859, 1864 to 1867, 1877 to 1904, 1928 to 1934, 1961 to 1966, 1969 to 1975, 1982 to 1991 and 2001 to 2005 (Figure 6). Likewise, there were abundant rain phases (over the average), in periods such as 1860 to 1863, 1868 to 1876, 1905 to 1908, 1910 to 1914, 1935 to 1939, 1947 to 1960, 1967 to 1969, 1981 to 1982, 1992 to 1993,

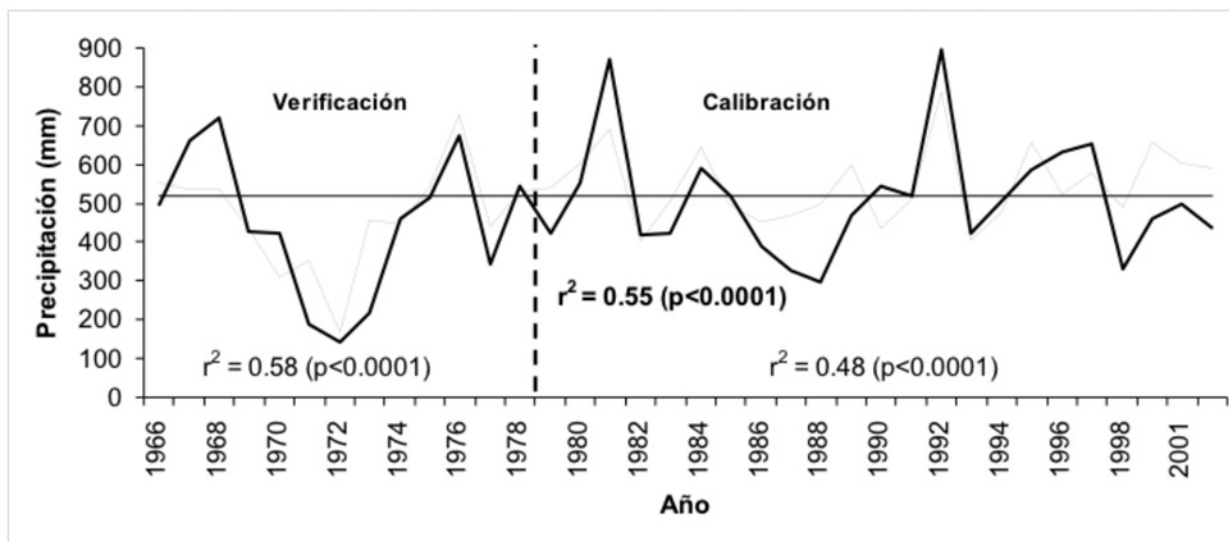


Figura 5. Calibración y verificación entre la precipitación total anual reconstruida (línea continua) y la regional observada (línea punteada).

Figure 5. Calibration and verification between total annual reconstructed precipitation (solid line) and the regional observed (dotted line).

Variabilidad de la precipitación reconstruida

Se reconstruyó la variación pluvial anual para la región oriental del estado de Tlaxcala de 1850 a 2008, lapso en el cual la serie paleoclimática reveló una gran variabilidad interanual de la precipitación. Se reconstruyeron sequías prolongadas para los periodos 1856 a 1859, 1864 a 1867, 1877 a 1904, 1928 a 1934, 1961 a 1966, 1969 a 1975, 1982 a 1991 y 2001 a 2005 (Figura 6). De igual manera, existieron fases con lluvia abundante (superior a la media) de 1860 a 1863, 1868 a 1876, 1905 a 1908, 1910 a 1914, 1935 a 1939, 1947 a 1960, 1967 a 1969, 1981 a 1982, 1992 a 1993, 1995 a 1997 y 2000 a 2001, como se ilustra en la Figura 6. En ella, la línea gris indica la variabilidad anual de la precipitación (a); la línea negra es suavizada de las tendencias en décadas. La línea punteada en forma horizontal corresponde al promedio de la precipitación anual para el período 1850-2008 (547 mm). Las figuras inferiores indican las sequías más intensas en los últimos 159 años (b, c, d y e). Los intervalos de extrema sequía tuvieron efectos negativos sobre la población en lo económico, político y social (Florescano, 1980; Castorena *et al.*, 1983; Therrel *et al.*, 2002).

Influencia del ENSO y NAMS sobre la variabilidad de la precipitación

El análisis de asociación entre la precipitación reconstruida y el TRI para la región oriental de Tlaxcala evidenció que no existe una influencia significativa ($p > 0.05$) de este fenómeno sobre la variabilidad de precipitación para el período total analizado; sin embargo, fue importante para años específicos.

1995 to 1997 and 2000 to 2001, as shown in Figure 6. In this graphic, the grey line indicates the annual precipitation variability (a), the black line is softened by the tendencies in decades. The horizontal dotted line refers to the annual precipitation for the 1850-2008 period (547 mm). The figures below point at the most intense droughts in the last 159 years (b, c, d and e). The ranges of extreme drought had negative impact upon the population in economic, political and social terms (Florescano, 1980; Castorena *et al.*, 1983; Therrel *et al.*, 2002).

Influence of ENSO and NAMS over the variability of precipitation

The association analysis between rain restoration and TRI in the region revealed that this phenomenon has no significant relation ($p > 0.05$) over the precipitation variability for the total analyzed period; however, this influence was important for specific years.

The cold phase of ENSO (*La Niña*) in the years from 1970 to 1974, 1988 to 1989 and 1998 to 1999 provoked severe droughts. On the other hand, intense ENSO events in its hot phase (*El Niño*), in the years 1958, 1968, 1976, 1982, 1986, 1997 and 2000 produced higher humidity (Figure 7).

Spectral analysis

Based on a spectral analysis of wavelets coherence, the influence of ENSO over the variability of rainfall for the eastern region of Tlaxcala state was analyzed, when comparing the reconstructed precipitation series and the TRI (Figure 8).

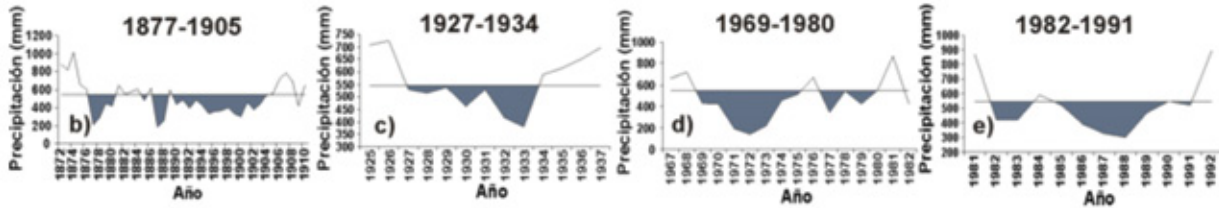
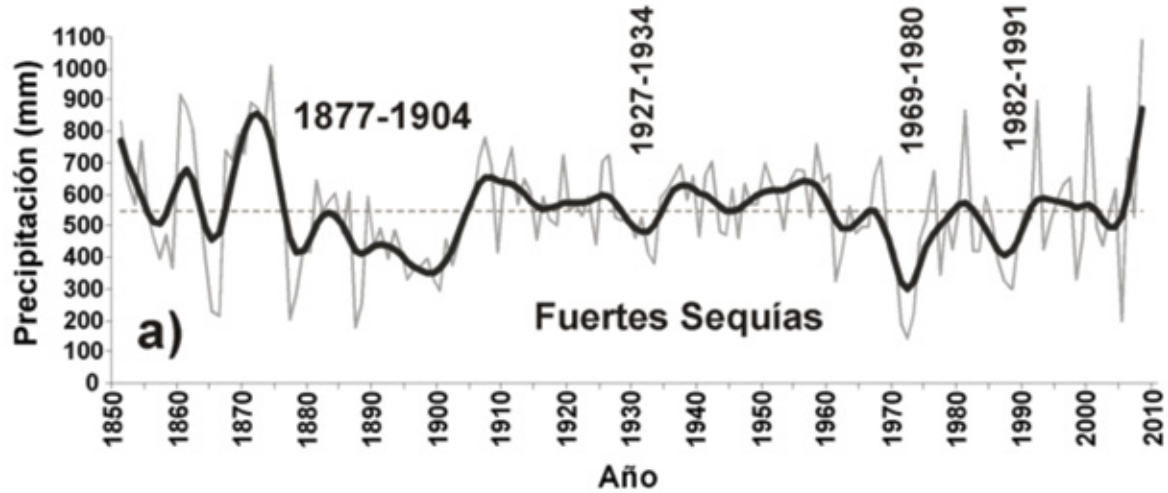


Figura 6. Precipitación total anual reconstruida para el oriente del estado de Tlaxcala.
 Figure 6. Annual total reconstructed precipitation for the Eastern part of Tlaxcala state.

El ENSO en su fase fría (La Niña) en los lapsos de 1970 a 1974, 1988 a 1989 y 1998 a 1999 provocó severas sequías. Por el contrario, eventos intensos del ENSO en su fase cálida (El Niño), en los años 1958, 1968, 1976, 1982, 1986, 1997 y 2000 generaron mayor humedad (Figura 7).

In Figure 8, the red spots limited by the black line indicate a significant relation ($p < 0.05$) between both variables; the black arrows and in different position, if the relation is positive or negative: horizontal or parallel arrows to the right mean that both phenomena are in phase (positive); on the contrary, when they

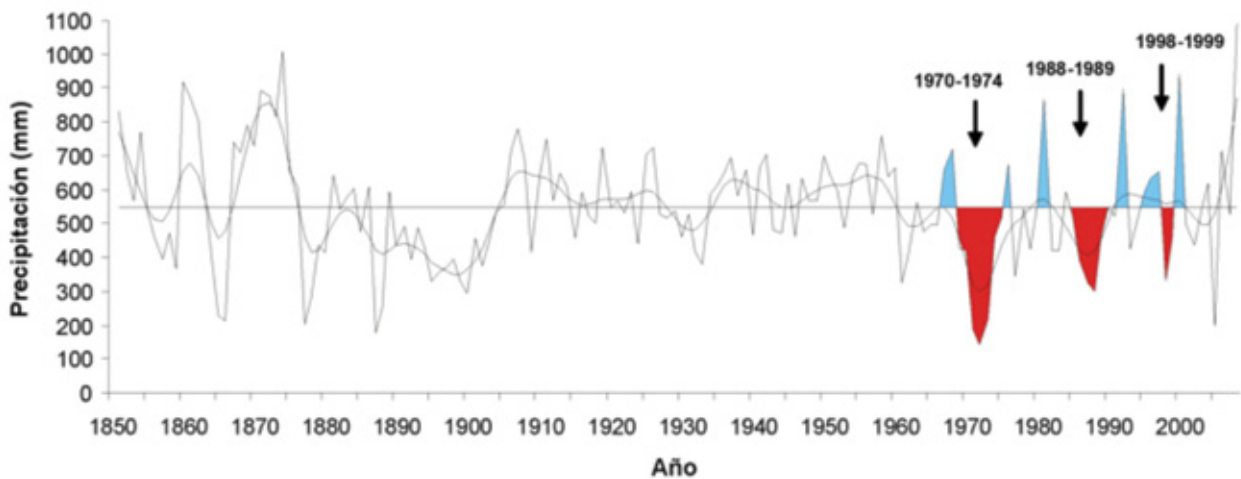


Figura 7. ENSO en sus diferentes fases, La Niña (color rojo) y El Niño (color azul).
 Figure 7. ENSO in its different phases, *La Niña* (red color) and *El Niño* (blue color).

Análisis espectral

Con base en un análisis espectral de coherencia de ondeletas, se analizó la influencia del ENSO sobre la variabilidad de la precipitación para la región oriental de Tlaxcala, al comparar la serie de precipitación reconstruida y el TRI (Figura 8).

are to the left, phenomena are in antiphase (negative) and the oval marked with a black line refers to the area of the significance level ($p < 0.05$).

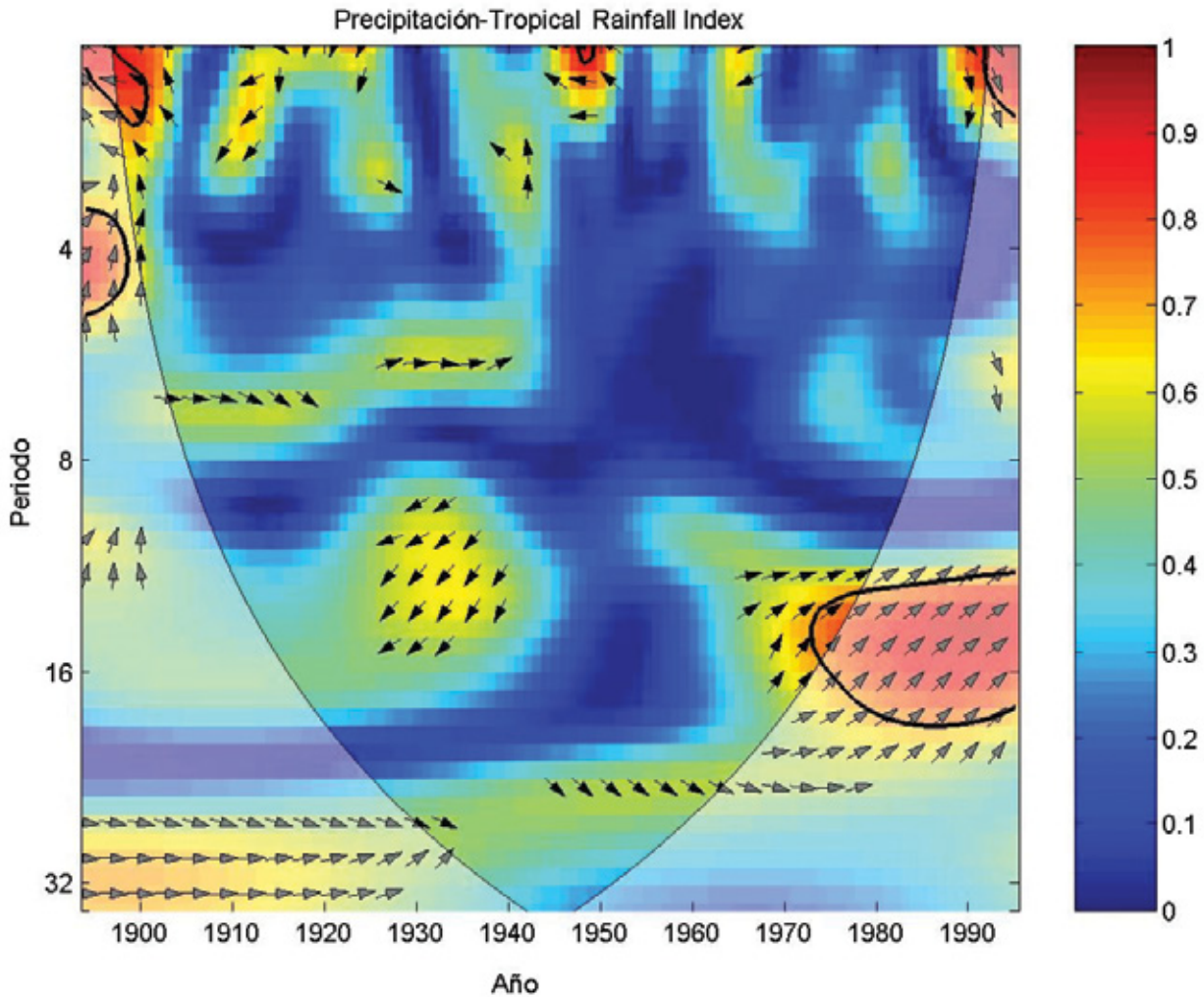


Figura 8. Dominio de coherencia de ondeleta entre la precipitación reconstruida y el TRI.
Figure 8. Dominion of wavelet coherence between the reconstructed precipitation and TRI.

En la Figura 8, las manchas rojas delimitadas por la línea negra designan una relación significativa ($p < 0.05$) entre ambas variables; las flechas en negro y en diferente posición señalan si la relación es positiva o negativa: flechas horizontales o paralelas hacia la derecha significan que ambos fenómenos están en fase (positiva); por el contrario, cuando se orientan a la izquierda, los fenómenos están en antifase (negativa) y el óvalo marcado por una línea negra corresponde al área de nivel de significancia ($p < 0.05$).

This analysis allowed to statistically that ENSO influenced in a positive way over the rain changes since 1970 and has a periodicity of 12 to 19 years. It is worth noticing that, in particular, from 1971 to 1974, its action was significant ($p < 0.05$) (Figure 8) and was the most intense drought in the last 159 years for east Tlaxcala; these events are considered of high intensity.



A partir de este análisis se corroboró de manera estadística que el ENSO influyó de forma positiva sobre los cambios pluviales desde 1970 y tiene una periodicidad de 12 a 19 años. Cabe señalar que, en particular, de 1971 a 1974, su acción fue significativa ($p < 0.05$) (Figura 8) y constituyó la sequía más intensa de los últimos 159 años para el oriente de Tlaxcala; esos eventos son considerados de alta intensidad.

Influencia del NAMS

La presencia de NAMS, con su intensidad y variabilidad en el tiempo y el espacio, interviene directamente en el crecimiento de los árboles en el centro de México (Martínez, 1963; Higgins *et al.*, 1999; Therrell *et al.*, 2002) y se ha consignado que, si ocurre más tarde en el año, habrá menor precipitación anual (Magaña *et al.*, 1999; Conde *et al.*, 1999a), lo que propicia menor incremento anual de los individuos. Por el contrario, un comienzo temprano del NAMS genera lluvias superiores a la media anual y mayor crecimiento de los árboles (Therrell *et al.*, 2002).

El NAMS mostró cierta influencia en la variación pluvial de la parte oriental del estado de Tlaxcala, ya que se correlacionó positivamente con la reconstrucción ($r = 0.34$), pero no de manera significativa ($p > 0.05$) con los meses de más lluvia, observada en julio, agosto y septiembre, que representan los cambios de NAMS.

De 1969 a 1973, el inicio del Monzón se presentó relativamente tarde en el año (a los 170-180 días) y generó menor desarrollo de los árboles (Therrell *et al.*, 2002); esto coincide con los resultados de la restauración pluvial para Santa María de las Cuevas que, en el mismo periodo, presentó anillos de crecimiento de menor tamaño en *P. cembroides*, en comparación al promedio (Figura 9).

Un análisis detallado de la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas más cercanas a Santa María de las Cuevas (Figura 1), corrobora que en los periodos de 1969 a 1973 y 1986 a 1989, los meses de mayor influencia del NAMS (julio, agosto y septiembre) disminuyó, en comparación con el promedio de 1966 a 2002; esta extrema sequía se atribuye a la presencia tardía del NAMS en la zona. Registros con la misma severidad se tuvieron para Chihuahua, Durango, Coahuila y Nuevo León (Florescano, 1980; Cenapred, 2001; Cerano *et al.*, 2009).

De manera inversa, el registro instrumental muestra años con precipitaciones abundantes en julio, agosto y septiembre en 1967, 1968, 1981, 1992 y 2000 a 2001 y se puede justificar con el comienzo temprano del fenómeno del Monzón (figuras 7 y 9).

Influence of NAMS

The presence of NAMS, its intensity and variation along time and in space, intervenes directly on the growth of trees in central Mexico (Martínez, 1963; Higgins *et al.*, 1999; Therrell *et al.*, 2002) and it has been reported that if it takes place later in the year, there will be a lower annual precipitation (Magaña *et al.*, 1999; Conde *et al.*, 1999a). On the other side, an early start of NAMS provokes more rains than the annual average and a greater growth in trees (Therrell *et al.*, 2002).

NAMS showed some influence upon the rain variation of the eastern part of Tlaxcala, since it correlated positively with the reconstruction ($r = 0.34$), but not significantly ($p > 0.05$) with the most rainy months, which occurs in July, August and September, that represent NAMS changes.

From 1969 to 1973, the Monsoon started rather late in the year (170-180 days) and produced a smaller tree development (Therrell *et al.*, 2002); this is coincidental with the results of rain restoration of Santa María de las Cuevas, which, at the same time, showed smaller tree-rings in *P. cembroides*, compared to the average (Figure 9).

A detailed analysis of the registered rainfall in the closest weather stations to Santa María de las Cuevas (Figure 1) confirms that in the 1969 to 1973 and 1986 to 1989 periods, the months of greater influence of NAMS (July, August and September) lowered in this parameter, compared to the average from 1966 to 2002; this severe drought is attributed to the late presence of NAMS in the zone and are as intense in the states of Chihuahua, Durango, Coahuila and Nuevo Leon (Florescano, 1980; Cenapred, 2001; Cerano *et al.*, 2009).

Conversely, the instrumental record shows years with abundant rain in July, August and September of 1967, 1968, 1981, 1992 and 2000 to 2001 and it can be justified with the early beginning of the Monsoon phenomenon (figures 7 and 9).

DISCUSSION

Climatic response of *Pinus cembroides*

It was determined that the annual growth of *P. cembroides* at the east of Tlaxcala state reacts significantly ($p < 0.001$) to the total rainfall in the year (January-December), in contrast to this species and *Pinus piniceana* Gordon for the north of Mexico where paleoclimatic studies have determined that this species respond to the rains from January to July (Constante *et al.*, 2009; Santillán *et al.*, 2010). The annual growth of the first species is a useful proxy to reconstruct the humidity variation from winter to spring at the north of Mexico, while the chronologies of the development of *P. cembroides* at the center of the country could be used to reconstruct the rain changes every year.

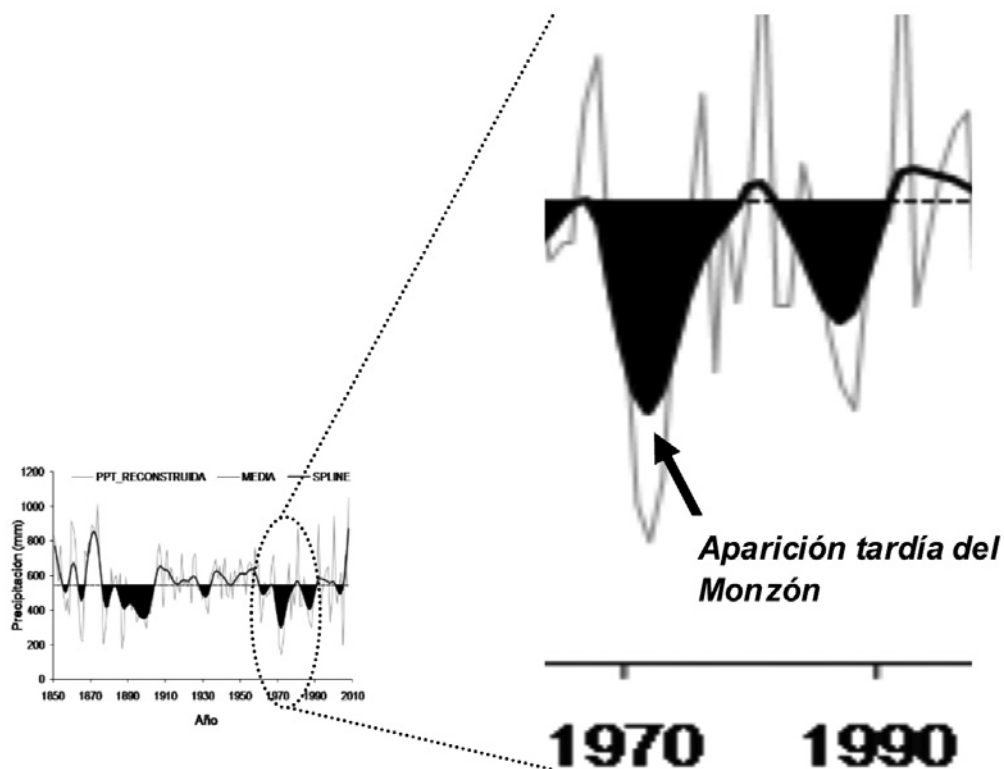


Figura 9. Esquemización de tres años continuos de extrema sequía a principios de la década de 1970, fenómeno atribuido al inicio tardío de NAMS.
 Figure 9. Scheme of the three continuous years of extreme drought at the beginning of the 70's, a phenomenon attributed to the NAMS late start.

DISCUSIÓN

Respuesta climática de *Pinus cembroides*

Se determinó que el crecimiento anual de *P. cembroides* en la región oriental del estado de Tlaxcala responde de manera significativa ($p < 0.001$) a la precipitación total en el año (enero-diciembre), a diferencia de lo que ocurre en el norte de México para esta especie y *Pinus pinceana* Gordon, donde estudios paleoclimáticos han determinado que ambas tienen una respuesta significativa al lapso de lluvias de enero a julio (Constante *et al.*, 2009; Santillán-Hernández *et al.*, 2010). El crecimiento anual de *P. cembroides* es un *proxy* útil para reconstruir la variabilidad de humedad de invierno a primavera en esa región del país; mientras que sus cronologías en el centro de México podrían emplearse para reconstruir los cambios pluviales anuales.

Variabilidad de la precipitación

La reconstrucción de la variación en la precipitación en el área permitió detectar fuertes sequías. Se cuenta con evidencia de que en los periodos 1877 a 1904, 1927 a 1934, 1969 a 1980 y 1982 a 1991 hubo estragos en la agricultura y

Precipitation variability

The reconstruction of the variation in rains in the area allowed to detect important droughts. There is a record that in the following periods, 1877 to 1904, 1927 to 1934, 1969 to 1980 and 1982 to 1991 agriculture and livestock suffered devastation; there were crop losses and even the inhabitants were unable to get any harvest for several continuous years (Florescano, 1980; Florescano and Swan, 1995). These results are similar to those in record for other states of Mexico like Durango and Querétaro (Castorena *et al.*, 1983).

Between 1875 and 1910, 17 dry years in the region were detected, as well as in Guanajuato, Hidalgo, Puebla and Tlaxcala (Castorena *et al.*, 1983); in some historic archives a reduction in the national production of maize, wheat and beans from 1877 to 1908 can be confirmed, with the worst seige in 1892 and 1896, when there was a very low humidity; this is notably coincidental with the dryness range from 1877 to 1904 that was detected in the reconstruction (Figure 6).

ganadería, se presentaron numerosas pérdidas de los cultivos e incluso los pobladores no pudieron obtener ninguna cosecha por varios años consecutivos (Florescano, 1980; Florescano y Swan, 1995); estos resultados son similares a los consignados para otros estados de la república mexicana, como Durango y Querétaro (Castorena *et al.*, 1983).

Entre 1875 y 1910 se detectaron 17 años secos en la región de estudio, así como en Guanajuato, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala (Castorena *et al.*, 1983); en algunos archivos históricos se constata una disminución en la producción nacional de maíz, trigo y frijol de 1877 a 1908, con la peor cosecha en 1892 y 1896, cuando hubo muy poca humedad; lo anterior coincide de manera notable con el intervalo de aridez de 1877 a 1904 que se observó en la reconstrucción (Figura 6).

Otros estudios describen el período de 1890 a 1903 como de prolongada hambruna en el centro de México, debido a la sequía que impidió el desarrollo adecuado de los cultivos (Florescano y Swan, 1995; Therrell *et al.*, 2006); fenómeno que tuvo efectos nacionales y se hace referencia a él en otras reconstrucciones de Coahuila, Durango, Chihuahua, Baja California Sur y Sonora (García, 1997; Stahle *et al.*, 1999; Villanueva y McPherson, 1999; Díaz *et al.*, 2001; Cleaveland *et al.*, 2003; Endfield y Tejedo, 2006; Cerano *et al.*, 2009). También, en Tlaxcala se reconstruyó un importante lapso seco de 1961 a 1991, en el cual, solo durante 1967, 1968, 1969, 1976, 1977, 1981, 1982 y 1984 se rebasó la media de precipitación de los últimos 37 años, lo que coincide con los resultados obtenidos para Chihuahua, Coahuila, Durango, Hidalgo, Nuevo León y Querétaro (Castorena *et al.*, 1983; Cenapred, 2001).

En particular, la década de 1970 es considerada como de sequía extrema en el norte de México que se extendió hasta el centro del país (Florescano, 1980; Cenapred, 2001; Villanueva *et al.*, 2007; Cerano *et al.*, 2009, 2011), y fue el más intenso de los últimos 159 años en la región (Figura 9).

Relación ENSO-NAMS

El impacto de los fenómenos ENSO y NAMS sobre la variabilidad de las lluvias en el oriente del estado de Tlaxcala, específicamente en los períodos secos de las décadas de 1970 y 1980, puede atribuirse a la influencia que ejerce el ENSO sobre el NAMS. Eventos intensos del ENSO generalmente propician un retraso en las fechas de inicio del NAMS, lo que provoca sequías de diferentes intensidades e impactos, con comportamientos diversos en cada una de las regiones del país (Carleton *et al.*, 1990; Stahle *et al.*, 1998; Villanueva y McPherson, 1999; Higgins *et al.*, 1999; Cerano *et al.*, 2009). La relación entre los eventos

Other studies describe the period from 1890 to 1903 as a very long famine at central Mexico from a drought that hampered the right development of crops (Florescano and Swan, 1995; Therrell *et al.*, 2006); this phenomenon had national consequences and is referred to in other reconstructions of the states of Coahuila, Durango, Chihuahua, Baja California Sur and Sonora (García, 1997; Stahle *et al.*, 1999; Villanueva and McPherson, 1999; Díaz *et al.*, 2001; Cleaveland *et al.*, 2003; Endfield and Tejedo, 2006; Cerano *et al.*, 2009). In Tlaxcala, too, an important dry period from 1961 to 1991 was reconstructed and in it, only in 1967, 1968, 1969, 1976, 1977, 1981, 1982 and 1984 the precipitation mean of the last 37 years was surpassed, which is coincidental with the results of Chihuahua, Coahuila, Durango, Hidalgo, Nuevo León and Querétaro (Castorena *et al.*, 1983; Cenapred, 2001).

The 1970's in particular is considered as of extreme drought at the north of Mexico and extended to the center of the country (Florescano, 1980; Cenapred, 2001; Villanueva *et al.*, 2007; Cerano *et al.*, 2009, 2011) and extended to the center of the country, and being the most intense of the last 159 years in the region (Figure 9).

ENSO-NAMS relation

The impact of ENSO and NAMS upon the variability of rains in eastern Tlaxcala, particularly in the droughts of the 70's and 80's, can be explained by the influence of ENSO over NAMS. Intense ENSO events generally favor a delay in the dates when NAMS starts, which provokes droughts of different intensities and impacts, which behave in a different way in each of the regions of Mexico (Carleton *et al.*, 1990; Stahle *et al.*, 1998; Villanueva and McPherson, 1999; Higgins *et al.*, 1999; Cerano *et al.*, 2009). The relation between ENSO events and the rain deficit in the north and center of the country has been studied with events in record since 1524, which include information of the biophysical impacts (Jáuregui, 1995) and historic archives (Florescano, 1980).

At the beginning of the 70's occurred an ENSO occurrence that affected significantly rain variation, delayed NAMS start and gave birth to the driest period reconstructed at east Tlaxcala in the last 159 years (figures 8 and 9); not all the events from 1970 to 2008 caused these variations but this phenomenon may be the major factor that has delayed NAMS in specific seasons and has helped to explain the driest time intervals of the region. These results were based upon ENSO published by Jáuregui (1995) at the center and north of the country and highlight a significant influence between it and the reduction of rainfall for certain cycles, with greater frequency of happenings during the XXth century (Figure 10). On the other hand, the results of this study agree with those of Jáuregui (1995), who stated that in 452 years (1535-1987), almost half of the series (233) refer to dry conditions, even though the correlations of droughts



del ENSO y el déficit pluviométrico en regiones del norte y centro del país se ha estudiado con sucesos registrados desde 1524, que incluyen información de los impactos biofísicos (Jáuregui, 1995), y archivos históricos (Florescano, 1980).

A principios de la década de 1970 ocurrió un evento del ENSO que influyó de manera significativa en la variación de las lluvias, retrasó el inicio de NAMS y originó el periodo más seco que se reconstruyó en el oriente de Tlaxcala en los últimos 159 años (figuras 8 y 9); no todos los eventos de 1970 a 2008 causaron ese tipo de variantes, pero este fenómeno puede ser el principal factor que ha retardado NAMS en temporadas específicas y ha coadyuvado en los intervalos de tiempo más secos de la región. En el presente estudio se tomaron como base los acontecimientos del ENSO publicados por Jáuregui (1995) en el centro y norte del país y denotan una influencia significativa entre este fenómeno y la disminución de la precipitación para ciertos ciclos, con mayor frecuencia de eventos durante el siglo XX (Figura 10); por otro lado, los resultados que se documentan coincidieron con los de Jáuregui (1995), quien consigna que en 452 años (1535-1987), casi la mitad de la serie (233) corresponde a condiciones secas, aunque la correlación entre sequías y la presencia de ENSO no es significativa en todo el periodo. Al reducir el intervalo analizado (1822 - 1987), se constató que en el siglo XX la frecuencia de los fenómenos de ENSO y las sequías aumentaron al doble, en comparación con la frecuencia observada durante el siglo XIX, por lo cual, la sequía en regiones tanto del norte como del centro de México pudieran estar ligadas al fenómeno ENSO.

and the presence of ENSO is not significant in the whole period. When the analyzed interval (1822 - 1987) was shortened it was confirmed that in the XXth century the frequency of ENSO and the droughts doubled, compared to the observed frequency during the XIXth century, which suggests the droughts in northern and central regions of Mexico could be linked to ENSO.

The rains of July, August and September for each classified years as of high ENSO intensity in its cold phase (*La Niña*) records minor levels to the regional mean from 1966 to 2002, which implies that ENSO dominates over NAMS and, consequently, over rain changes and rainfed crops (Conde *et al.*, 1999a).

In Tlaxcala state there are severe problems related to erosion and soil degradation, as well as to the lowering of water availability, conditions that become even worse from the competence generated from the growing population that demands more water resources for human, industrial and agricultural use; there is an estimation that 82 % of the state area belongs to agriculture, and of it, a great per cent (92 %) is seasonal, which makes it very vulnerable to weather variation (Conde *et al.*, 1999b).

A clear example of the importance of ENSO was the event that started in 1997 which extended to the middle of 1998 and provoked a descent in the accumulated precipitation at a national level, from January to May (40 % less than the historic mean) (Sagar, 1998). The delay in the beginning of rainfall

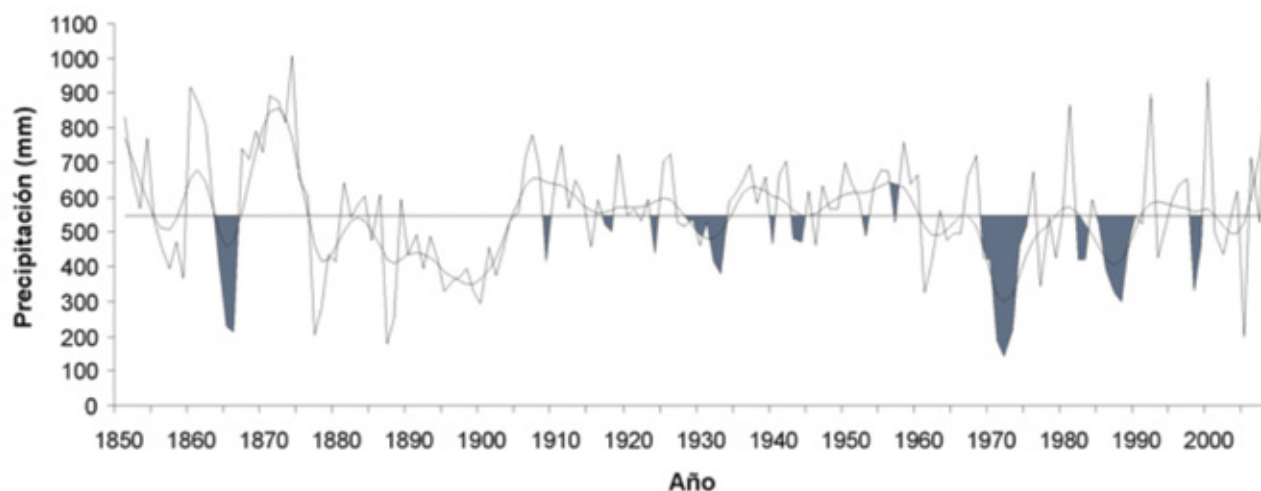


Figura 10. Periodos con disminución de la precipitación (áreas oscuras) como consecuencia de eventos del ENSO.
 Figure 10. Periods with precipitation reduction (dark areas) as a result of ENSO events.

Las lluvias en julio, agosto y septiembre para cada año clasificado como de alta intensidad de ENSO en su fase fría (La Niña) registran niveles menores a la media regional de 1966 a 2002, lo que implica que ENSO domina sobre NAMS y por consiguiente, en los cambios de la precipitación y la producción de cultivos de temporal (Conde *et al.*, 1999a).

En el estado de Tlaxcala existen severos problemas relacionados con la erosión y la degradación del suelo, así como con la merma en la disponibilidad de agua; condiciones que se maximizan por la competencia que genera la población creciente que demanda más recursos hídricos para consumo humano, industrial y agrícola. Se estima que 82 % de la superficie del estado se dedica a la agricultura y, de ella, un alto porcentaje (92 %) es de temporal, lo que la hace muy vulnerable a la variabilidad del clima (Conde *et al.*, 1999b).

Un claro ejemplo de la importancia del ENSO es el evento que inició en 1997, se prolongó hasta mediados de 1998 y provocó el descenso de la precipitación acumulada, a nivel nacional, de enero a mayo (40 % menor a la media histórica) (Sagar, 1998). El retraso del inicio de las lluvias provocó el establecimiento tardío de las siembras en los valles altos de la región centro del país (Estado de México, Puebla, Hidalgo, Guanajuato, Tlaxcala, Morelos y Querétaro); tal situación derivó en la disminución de 14 % en la producción agrícola del ciclo primavera-verano de 1998 y representó una reducción de 14.7 millones de toneladas de granos, lo que pone de manifiesto la importancia de abordar a ENSO en el área de estudio y otras partes del país (Conde *et al.*, 1999b).

El estado de Tlaxcala destina un alto porcentaje de su superficie a las actividades agrícolas de temporal, cuyas prácticas son poco eficientes y vulnerables a extremos climáticos; el uso de pronósticos y diagnósticos del clima es sumamente útil (Legorreta-Padilla, 1998; Conde *et al.*, 1999b). La fuerte relación entre la producción de maíz de temporal y la precipitación hacen de esta región del país una zona en la que se deben conocer a fondo los fenómenos ambientales como el ENSO, para con base en ese conocimiento predecir su incidencia e impacto en el cambio de las lluvias para, así, lograr una mejor planeación del uso de los recursos hídricos.

CONCLUSIONES

El crecimiento anual de *Pinus cembroides* en la región oriental del estado de Tlaxcala responde a la incidencia pluvial en el año, lo que confirma su potencial para emplearse como proxy con el fin de reconstruir la precipitación y entender su variabilidad histórica.

Las lluvias que fueron reconstruidas para los últimos 159 años (1850-2008) mostraron gran variación periódica; se detectaron fuertes sequías para los intervalos: 1856 a 1859, 1864 a 1867, 1877 a 1904, 1928 a 1934, 1961 a 1966, 1969

favoreó a late establishment of sowings in the high valleys of the central region of the country (Mexico, Puebla, Hidalgo, Guanajuato, Tlaxcala, Morelos and Queretaro states); such a situation resulted in a 14 % reduction in the agriculture production of the 1998 spring-summer cycle and meant a reduction of 14.7 million tons of grains, which makes evident the importance to approach ENSO in the study area as well as in other parts of the country (Conde *et al.*, 1999b).

Tlaxcala state assigns a high percent of its territory to rainfed agricultural activities and its practice is rather inefficient and vulnerable to weather extreme events; the use of weather forecasts and diagnosis is very useful (Legorreta, 1998; Conde *et al.*, 1999b). The strong relation between season maize production and rainfall makes of this region a zone where it is important to know phenomena like ENSO, that allow to predict its incidence and impact on rainfall change to accomplish a better planning of water resources.

CONCLUSIONS

Pinus cembroides annual growth at the Eastern region of Tlaxcala state, responds to the annual rain incidence, which confirms its potential to be used as proxy in order to reconstruct precipitation and to understand its historic variability.

The rains that were reconstructed for the last 159 years (1850-2008) showed great periodical variation; intense droughts were detected for the following intervals: 1856 to 1859, 1864 to 1867, 1877 to 1904, 1928 to 1934, 1961 to 1966, 1969 to 1975, 1982 to 1991 and 2001 to 2005 and at the same time, humid periods were observed from: 1860 to 1863, 1868 to 1876, 1905 to 1908, 1910 to 1914, 1935 to 1939, 1947 to 1960, 1967 to 1969, 1981 to 1982, 1992 to 1993, 1995 to 1997 and 2000 to 2001.

When relating the ENSO indexes to the reconstructed rain phenomena, there was not an important link for the total period; nevertheless, the influence was significant for specific years or intense ENSO events, some of them since the middle of the XXth century to now a days, favored increments during the warm phase (*El Niño*), and *La Niña*, by itself, provoked important decrease.

NAMS showed a positive relation, even if it was not significant, with the accumulated precipitation from July to September, and a delay when it started produces a smaller amount of water. The presence of an intense ENSO produced another delay in NAMS, and therefore, of summer rains. One of the most intense droughts in the last 159 years was registered in the 70's, and was attributed to an important ENSO event and a late start of NAMS. 🌱



a 1975, 1982 a 1991 y 2001 a 2005 y de igual manera, se observaron periodos húmedos de: 1860 a 1863, 1868 a 1876, 1905 a 1908, 1910 a 1914, 1935 a 1939, 1947 a 1960, 1967 a 1969, 1981 a 1982, 1992 a 1993, 1995 a 1997 y 2000 a 2001.

Al buscar una asociación entre los índices del ENSO con los fenómenos pluviales reconstruidos, no hubo relación importante para el periodo total; no obstante, la influencia sí fue significativa para años específicos o eventos intensos del ENSO, algunos de ellos desde mediados del siglo XX a la fecha propiciaron incrementos durante su fase cálida (El Niño) y por su lado, la Niña provocó decrementos importantes.

El NAMS exhibió una relación positiva, aunque no significativa, con la precipitación acumulada de julio a septiembre, y un retraso en su inicio se traduce en una menor intensidad de la misma. La presencia de ENSO intenso retardó la aparición de NAMS y, por consiguiente, de las lluvias de verano. Una de las sequías más intensas de los últimos 159 años, se registró en la década de 1970, atribuible a un evento importante del ENSO e inicio tardío de NAMS. 🌱

AGRADECIMIENTOS

Al Gobierno del Estado de Tlaxcala y al Grupo Fems-Coca Cola por el apoyo financiero otorgado como parte del macroproyecto denominado "Manejo Integral de los Recursos Naturales en la Cuenca del Río Zahuapan, en el estado de Tlaxcala".

REFERENCIAS

- Carleton, A. M., D. A. Carpenter and P. J. Webster. 1990. Mechanisms of interannual variability of the southwest United States summer rainfall maximum. *J. Climate* 3: 999-1015.
- Castorena, G., E. Sánchez, E. Florescano, G. Padilla y L. Rodríguez. 1983. Análisis histórico de las sequías en México. Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F. México. 137 p.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred). 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. In: Atlas Nacional de Riesgo de la República Mexicana. Secretaría de Gobernación, México, D.F. México. 232 p.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., J. G. Arreola Á., I. Sánchez C., R. D. Valdez C. y G. García H. 2009. Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 15 (2):27-44.
- Cerano P., J., J. Villanueva D., R. D. Valdez C., J. Méndez G. y V. Constante G. 2011. Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (2): 235-249.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Díaz and B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388.
- Conde, C., V. Magaña and R. M. Ferrer. 1999a. On the use of a climate forecast in the planning of agricultural activities in the state of Tlaxcala, Mexico. Preprints. In: 11th Conference on Applied Climatology. January 10th-15th, 1999. American Meteorological Society, Dallas, TX. USA. pp. 101 - 102

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their gratitude to the Government of the State of Tlaxcala and Coca-Cola FEMSA Group for the financial support granted as part of the larger project entitled "Integrated Management of Natural Resources in Zahuapan River Basin, in the state of Tlaxcala".

End of the English version



- Conde, C., R. M. Ferrer, R. Araujo, C. Gay, V. Magaña, J. L. Pérez, T. Morales, y S. Orozco. 1999b. El Niño y la agricultura. In: V. Magaña (ed.). Los impactos de El Niño en México. SEP-Conacyt. México, D.F. México. pp. 103-135.
- Constante, V., J. Villanueva D., J. Cerano P., E. H. Cornejo y S. Valencia. 2009. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Rev. Cien. For. en Méx.* 34 (106):17-39.
- Cortés B., E. N. 2010. Reconstrucción hidroclimática histórica con anillos de árboles para la región de León, Guanajuato. Tesis de Maestría. Postgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de Tlaxcala. Ixtacuixtla, Tlax. México 89 p.
- Cook, E. R. and K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41: 45-53.
- Cook, E. R. and R. H. Holmes. 1984. Program ARSTAN and user's manual. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ. USA. 15 p.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree Ring Bulletin* 47: 37-59.
- Díaz, S., M. D. Therrell, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland. 2001. Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647- 1992. *Climate Research* 22: 237-244.
- Endfield, G. H. and H. I. Tejedo. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climatic Change* 75: 391-419.

- Florescano, E. M. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F. México. pp. 39-46.
- Florescano, E. M. y S. Swan. 1995. Breve historia de la sequía en México. Universidad Veracruzana. México, D.F. México. 246 p.
- Fritts, H. C. 1976. Tree-rings and climate. Academic Press. London-New York-San Francisco. USA. 567 p.
- Fritts, H. C. 1999. An empirical model of the tree-ring response to monthly variations in climate. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona. Tucson, AZ. USA. 6 p.
- García, A. V. 1997. Las "sequías" y sus impactos en las sociedades del México decimonónico. 1856-1900. CIESAS, México, D.F. México. 32 p.
- Gochis, D. J., L. Brito-Castillo and W. J. Shuttleworth. 2006. Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. *J. Hydrol.* 316: 53-70.
- Higgins, R. W., Y. Chen and A. V. Douglas. 1999. Interannual variability of the North American warm season precipitation regime. *J. Climate* 12: 653-680.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC). Software. Jiutepec, Mor., México. s/p.
- Jáuregui, E. 1995. Rainfall fluctuations and tropical storm activity in Mexico. *Erkunde. Archiv Für Wissenschaftliche Geographie* 49: 39-48.
- Legorreta P., F. 1998. Conversión productiva del temporal para Tlaxcala. Opciones para reducir el impacto de eventos climáticos en el agro. Tríptico de divulgación. SAGAR, AGROTILAX e INIFAP. Fundación Produce. Tlaxcala, Tlax. México. 6 p.
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez. 1999. Los impactos del Niño en México. Secretaría de Educación Pública. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D. F. México. 229 p.
- Martínez, M. 1963. Las Pináceas Mexicanas. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. México D.F. México. 400 p.
- Méndez, J., J. J. Nívar y V. González. 2008. Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 65: 38-55.
- O'Hara S. L. and S. E. Metcalfe. 1997. The climate of Mexico since the Aztec period. *Quatern. Int.* 43 (44): 25-31.
- Perry, P. J. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press, Inc. Portland, OR. USA. 231 p.
- Robinson, W. J. and R. Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin* 40: 59-64.
- Rzedowski, J. 1986. Vegetación de México. Ed. LIMUSA. México, D.F. México. 432 p.
- Santillán H., M., E. Cornejo O., J. Villanueva D., J. Cerano P., S. Valencia M. y M. Capó A. 2010. Potencial dendroclimático de *Pinus pincheana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques* 16 (1): 17-30.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (Sagar). 1998. El impacto del clima en el sector agropecuario. Taller de Prevención de Desastres. Mayo de 1998 en Lázaro Cárdenas, Michoacán. México. 14 p.
- Statistical Analysis System (SAS) 1988. Statistical Analysis System version 9. Statistical Analysis System Institute Inc. Cary, NC USA. s/p.
- Scott, S. D. 1966. Dendrochronology in México. Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona Press. Tucson, AZ. USA. 80 p.
- Stahle, D., W. D'Arrigo, P. J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. B. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Gay, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva-Díaz and L. G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *B. Am. Meteorol. Soc.* 79 (10): 2137-2152.
- Stahle, D. W., M. K. Cleaveland, M. D. Therrell and J. Villanueva-Díaz. 1999. Tree-ring reconstruction of winter and summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years. 10th Conference of Global Change Studies. 79th Annual Meeting. January 10 - 15. Preprint volume.. American Meteorological Society, Dallas, TX. USA. pp. 205-211
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. An introduction to the tree-ring dating. The University of Arizona Press. Tucson, AZ. USA. 73 p.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland and J. Villanueva D. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *J. Geophys. Res.* 107 (D14): 6-8.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, J. Villanueva, E. Cornejo and M. K. Cleaveland. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474 - 2001. *Climate Change* 74: 493-504.
- Villanueva D., J. y G. R. McPherson. 1999. Estudios dendroclimáticos en montañas del suroeste de los Estados Unidos de América y del Norte de México. *Rev. Cien. For. en Méx.* 4 (86): 37-62.
- Villanueva D., J., D. W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano, M. D. Therrell and M. K. Cleaveland. 2007. Winter-spring precipitation reconstruction for tree rings for northeast Mexico. *Climate Change* 83: 117-131.

