

# Reconstruction of historical precipitation (1877-2014) for the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Querétaro, Mexico

## Reconstrucción de la precipitación histórica (1877-2014) para el suroeste de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México

Omar N. Mendoza-Villa<sup>1</sup>; Víctor H. Cambrón-Sandoval<sup>1</sup>; Julián Cerano-Paredes<sup>2\*</sup>; Rosalinda Cervantes-Martínez<sup>2</sup>; José C. Soto-Correa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales. Av. de las Ciencias s/n, delegación Santa Rosa Jáuregui. C. P. 76230. Juriquilla, Querétaro, México.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), km 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento. C. P. 35150. Gómez Palacio, Durango, México.

\*Corresponding author: cerano.julian@inifap.gob.mx, tel.: +52 (871) 159 0104.

### Abstract

**Introduction:** Historical analysis of climate variability represents a first approach to know the recurrence of events such as droughts and floods, as well as to infer possible climate trends. This study is the first historical analysis in the Sierra Gorda Biosphere Reserve (SGBR).

**Objectives:** To develop dendrochronological series with the ring width of *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. and *P. montezumae* Lamb., determine their potential to reconstruct rainfall variability, and reconstruct, minimally, precipitation variability and its relationship with the El Niño Southern Oscillation (ENSO) for the last century.

**Materials and methods:** In the southwest of the SGBR, 87 samples were extracted from 29 trees, of which 15 (45 rays) corresponded to *P. greggii* and 14 (42 rays) to *P. montezumae*. The growths were dated using dendrochronological techniques.

**Results and discussion:** The generated chronology, composed of 138 years (1877-2014), was significantly correlated ( $P < 0.01$ ) with the January-May rainfall. The reconstruction of the winter-spring seasonal precipitation variability indicates that there is interannual and interdecadal variation. Four severe droughts were identified (1887, 1951-1956, 1969-1972 and 2012) and two periods with excellent precipitation (1962-1967 and 1983-1993). The severest droughts in the southwest of the SGBR synchronize with extreme events reconstructed for the north of the country with a 50-year recurrence interval.

**Conclusion:** *Pinus greggii* and *P. montezumae* responded significantly to the precipitation of the winter-spring period, which allowed the reconstruction of rainfall variability over a period of 138 years. Variability has been significantly modulated by ENSO.

### Resumen

**Introducción:** El análisis histórico de la variabilidad climática representa un primer acercamiento para conocer la recurrencia de eventos como sequías e inundaciones, así como inferir posibles tendencias climáticas. Este estudio representa el primer análisis histórico en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda (RBSG).

**Objetivos:** Desarrollar series dendrocronológicas con el ancho de anillo de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. y *P. montezumae* Lamb., determinar su potencial para reconstruir la variabilidad de la lluvia, y reconstruir, mínimamente, la variabilidad de la precipitación y su relación con *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) para el último siglo.

**Materiales y métodos:** En el suroeste de la RBSG se extrajeron 87 muestras de 29 árboles, de las cuales 15 (45 radios) correspondieron a *P. greggii* y 14 (42 radios) a *P. montezumae*. Los crecimientos se fecharon empleando técnicas dendrocronológicas.

**Resultados y discusión:** La cronología generada, compuesta de 138 años (1877-2014), se correlacionó significativamente ( $P < 0.01$ ) con la lluvia de enero-mayo. La reconstrucción de la variabilidad de precipitación estacional invierno-primavera indica que hay variación interanual e interdecadal. Se identificaron cuatro fuertes sequías (1887, 1951-1956, 1969-1972 y 2012) y dos periodos con excelente precipitación (1962-1967 y 1983-1993). Las sequías más fuertes en el suroeste de la RBSG sincronizan con eventos extremos reconstruidos para el norte del país con una recurrencia de 50 años.

**Conclusión:** *Pinus greggii* y *P. montezumae* respondieron significativamente a la precipitación del periodo invierno-primavera, lo que permitió reconstruir la variabilidad de la lluvia en un periodo de 138 años. La variabilidad ha sido modulada de manera significativa por ENSO.

**Keywords:** Growth rings; *Pinus greggii*; *Pinus montezumae*; dendrochronology; drought; rain.

**Palabras clave:** Anillos de crecimiento; *Pinus greggii*; *Pinus montezumae*; dendrocronología; sequía; lluvia.

Please cite this article as follows (APA 6): Mendoza-Villa, O. N., Cambrón-Sandoval, V. H., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., & Soto-Correa, J. C. (2018). Reconstruction of historical precipitation (1877-2014) for the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Querétaro, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 371-386. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.01.008

Received: January 20, 2018 / Accepted: July 18, 2018.



## Introduction

Throughout history, droughts have been a recurrent natural event of importance for all societies, since the most extreme events can cause economic, social and political crises (Landa, Magaña, & Neri, 2008). Droughts originate when precipitation, in a given area, consistently decreases below the annual average over short or long periods (Marcos-Valiente, 2001). In Mexico, the climatic phenomenon known as El Niño Southern Oscillation (ENSO) is one of the factors related to drought occurrence. In the center of the country, this phenomenon, in its El Niño phase, tends to reduce rainfall below the average, resulting in a drought; the opposite effect is known as La Niña, which is conducive to precipitation under normal conditions, even causing floods (Magaña-Rueda, 2004).

Mexico is highly vulnerable to extreme weather events, especially in mid-latitudes and subtropical zones. In addition, considering the most likely climate change scenarios, significant decreases in precipitation and surface runoff are expected, which will cause shortages in the availability of the country's water resources (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2012). Given this, historical analysis of climate variability represents a first approach to determine the recurrence of events such as droughts and floods and infer possible climate trends. This analysis has been based on a review of historical documents and instrumental records, the latter with information from particular regions that covers between 30 to 80 years (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2009). In this sense, the annual growth rings of tree species represent a good indicator of past climatic conditions at local and regional scales, which allow us to reconstruct and analyze climate variability over several centuries (Cerano et al., 2012; Cerano, Villanueva, Valdez, Méndez, & Constante, 2011a; Villanueva-Díaz et al., 2011).

The temperate forests of the Sierra Gorda in the state of Querétaro are part of the Sierra Madre Oriental; its importance lies in the generation of hydrological environmental services, since it is a catchment area for water runoff that, from this point, is then redirected to areas adjoining the reserve (Carabias-Lillo, Provencio, de la Maza, & Ruíz-Corzo, 1999). In this region, there are no studies that allow us to know the rainfall variability on a larger scale than that observed with instrumental data. Given the importance of the region, there is an urgent need to develop dendroclimatic studies based on growth rings of coniferous species. These works represent an alternative to reconstruct rainfall on a wider scale, analyze its variability and observe recurrent drought events that can alter hydrological environmental services and affect the well-being of the region's inhabitants. In this context, this research work aimed to: 1) develop dendrochronological series

## Introducción

A lo largo de la historia, las sequías han sido un acontecimiento natural recurrente de importancia para todas las sociedades, ya que los eventos más extremos pueden provocar crisis económicas, sociales y políticas (Landa, Magaña, & Neri, 2008). Las sequías se originan cuando la precipitación, en una zona determinada, disminuye consistentemente por debajo de la media anual en periodos cortos o extensos (Marcos-Valiente, 2001). En México, el fenómeno climático conocido como *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) es uno de los factores relacionados con la ocurrencia de las sequías. En el centro del país, dicho fenómeno, en su fase El Niño, tiende a disminuir las lluvias por debajo de la media, llegando a convertirse en una sequía; el efecto contrario se le conoce como La Niña, que propicia precipitación en condiciones normales, incluso originando inundaciones (Magaña-Rueda, 2004).

México es altamente vulnerable a los fenómenos climáticos extremos, sobre todo en latitudes medias y zonas subtropicales. Además, considerando los escenarios más probables de cambio climático, se prevén disminuciones importantes en la precipitación y escorrentía superficial, lo que ocasionará escasez en la disponibilidad de los recursos hídricos del país (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2012). Ante esto, el análisis histórico de la variabilidad climática representa un primer acercamiento para conocer la recurrencia de eventos como sequías e inundaciones e inferir posibles tendencias climáticas. Dicho análisis ha tenido como base la revisión de documentos históricos y registros instrumentales; estos últimos con información de regiones particulares que comprende entre 30 y 80 años (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2009). En este sentido, los anillos de crecimiento anual de especies arbóreas representan un buen indicador de las condiciones climáticas pasadas a escala local y regional, que permiten reconstruir y analizar la variabilidad climática durante varios siglos (Cerano et al., 2012; Cerano, Villanueva, Valdez, Méndez, & Constante, 2011a; Villanueva-Díaz et al., 2011).

Los bosques templados de la Sierra Gorda del estado de Querétaro forman parte de la Sierra Madre Oriental; su importancia radica en la generación de servicios ambientales hidrológicos, ya que es una zona de captación y redirección de escorrentías de agua a las zonas colindantes de la reserva (Carabias-Lillo, Provencio, de la Maza, & Ruíz-Corzo, 1999). En esta región, los estudios que permiten conocer la variabilidad de la lluvia en una escala más extensa que la observada con datos instrumentales son nulos. Dada la importancia de la zona, es apremiante desarrollar estudios dendroclimáticos con base en anillos de crecimiento de especies de coníferas. Estos trabajos representan una alternativa para reconstruir la lluvia

with the ring width of *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. and *P. montezumae* Lamb., 2) determine their potential to reconstruct rainfall variability, and 3) reconstruct, as a minimum, precipitation variability and its relationship with ENSO for the last century in the Sierra Gorda Biosphere Reserve (SGBR).

## Materials and methods

### Study area

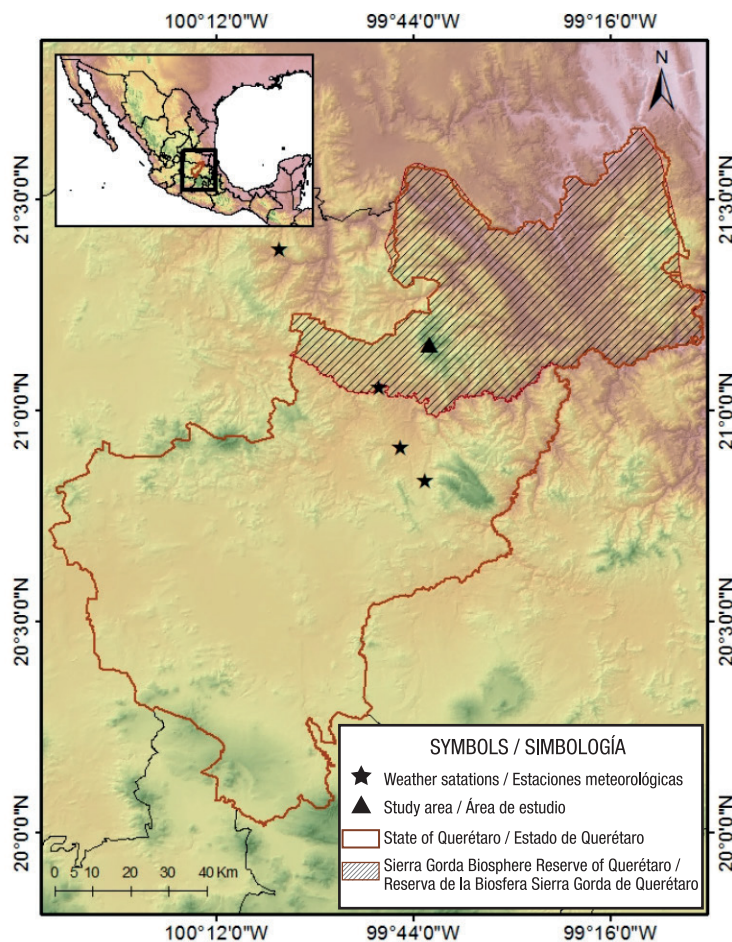
The study was conducted in the southwest of the SGBR between parallel 21° 10' N and meridian 99° 42' W, in the northwest of the municipality of Pinal de Amoles, Querétaro (Figure 1). The study area reaches an elevation of 3 100 m at its highest point and dips to 2 600 m at its lowest point and is part of the physiographic province of the Sierra Madre Oriental. The predominant climate is temperate sub-humid with average annual precipitation ranging between 550 and 872 mm; the maximum rainfall is in summer with a midsummer drought period (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2014).

en una escala más amplia, analizar su variabilidad y observar eventos recurrentes de sequía que pueden alterar los servicios ambientales hidrológicos y afectar el bienestar de los habitantes de la región. En tal contexto, este trabajo de investigación tuvo como objetivos: 1) desarrollar series dendrocronológicas con el ancho de anillo de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. y *P. montezumae* Lamb., 2) determinar su potencial para reconstruir la variabilidad de la lluvia, y 3) reconstruir, como mínimo, la variabilidad de la precipitación y su relación con ENSO para el último siglo en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda (RBSG).

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se desarrolló al suroeste de la RBSG entre el paralelo 21° 10' N y el meridiano 99° 42' W, al noroeste del municipio Pinal de Amoles, Querétaro (Figura 1). La zona de estudio alcanza una elevación de 3 100 m en su punto más alto y 2 600 m en su punto más bajo y forma parte de la provincia fisiográfica de la Sierra



**Figure 1. Geographic location of the study area in the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve and of the weather stations used in the analysis.**

**Figura 1. Localización geográfica del área de estudio en el suroeste de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda y de las estaciones meteorológicas empleadas en el análisis.**



## Sampling and its preparation

The species *P. greggii* and *P. montezumae* were selected because they are the most representative of the area. Based on selective sampling, the longest-living trees, free of mechanical damage, pests and diseases, were considered. Three growth cores (increments) were extracted from each tree with Pressler increment borers, of which two were obtained with a 5-mm diameter increment borer and one with a 12-mm diameter increment borer at varying heights according to the healthy appearance of the stem. In total, 87 samples were extracted from 29 trees, 15 (45 rays) of *P. greggii* and 14 (42 rays) of *P. montezumae*.

The samples were mounted and glued in grooved sections of wood, taking care that the fibers remained perpendicular to the growth rings. Each sample was polished with different grains of sandpaper (120-1200) to highlight the annual growth structures and facilitate analysis in the stereoscope (Cerano et al., 2014).

The samples were dated in the laboratory using the dendrochronological techniques of Stokes and Smiley (1968). Once predated, total ring width was measured with a VELMEX system (model TA4030H1-S6, Velmex Inc., New York, USA), composed of a sliding-phase system, a linear encoder with 0.001-mm precision integrated to a PC processor and a stereoscope with a reticulated eyepiece, to define the limits of each growth ring. The quality of the dating was verified with Program COFECHA (Holmes, 1983). The tree-ring index series or chronology by species and combined was generated with Program ARSTAN version 6.05P (Cook & Holmes, 1984).

## Climate response function and rainfall reconstruction

In the analysis of the growth response of *P. greggii* and *P. montezumae* to precipitation, we considered the records of the weather stations closest to the sampling area that have the most complete records and the highest correlation values with the chronology. These stations were the Higuierillas, Peñamiller and Vizarrón facilities in the state of Querétaro, and one in the state of Guanajuato in the municipality of Xichu (Figure 1; Table 1). The records of these stations were averaged and a regional database was generated (38 years, 1966-2003). The data were obtained from *Extractor Rápido de Información Climática III (ERIC)* software (IMTA, 2009).

By means of a correlation analysis between the total ring indices of the combined chronology and the observed data of monthly and accumulated precipitation, the months that best related to the chronology were determined, as well as the period of the year that significantly influenced tree growth (Fritts, 1999). Once

Madre Oriental. El clima predominante es templado subhúmedo con precipitación promedio que oscila entre 550 y 872 mm; el máximo registro se observa en verano con un periodo de sequía interestival (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2014).

## Toma de muestras y su preparación

Las especies *P. greggii* y *P. montezumae* se seleccionaron por ser las más representativas del área. Con base en un muestreo selectivo, se consideraron los árboles más longevos, libres de daños mecánicos, plagas y enfermedades. Tres núcleos de crecimiento (virutas) se extrajeron de cada árbol con taladro tipo Pressler, de las cuales dos se obtuvieron con taladro de 5 mm de diámetro y uno con taladro de 12 mm a alturas variables según la apariencia saludable del fuste. En total se extrajeron 87 muestras de 29 árboles, 15 (45 radios) de *P. greggii* y 14 (42 radios) de *P. montezumae*.

Las muestras se montaron y pegaron en secciones acanaladas de madera cuidando que las fibras quedaran en posición perpendicular a los anillos de crecimiento. Cada muestra se pulió con diferentes granos de lijas (120-1200) para resaltar las estructuras de crecimiento anual y facilitar el análisis en el estereoscopio (Cerano et al., 2014).

Las muestras se fecharon en laboratorio mediante las técnicas dendrocronológicas de Stokes y Smiley (1968). Una vez realizado el prefchado, el ancho de anillo total se midió con un sistema VELMEX (modelo TA4030H1-S6, Velmex Inc., Nueva York, EUA) compuesto por una platina de fase deslizante, un codificador lineal con precisión de 0.001 mm integrado a un procesador PC y un estereoscopio con ocular reticulado, para definir los límites de cada anillo de crecimiento. La calidad del fechado se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983). La serie de índice de anillo o cronología por especie y combinada se generó con el programa ARSTAN versión 6.05P (Cook & Holmes, 1984).

## Función de respuesta climática y reconstrucción de la lluvia

En el análisis de la respuesta del crecimiento de *P. greggii* y *P. montezumae* a la precipitación se consideraron los registros de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de muestreo que presentarían los registros más completos, y los valores de correlación más altos con la cronología. Dichas estaciones fueron Higuierillas, Peñamiller y Vizarrón del estado de Querétaro, y una del estado de Guanajuato en el municipio de Xichu (Figura 1; Cuadro 1). Los registros de estas estaciones se promediaron y se generó una base de datos regional (38 años, 1966-2003). Los datos se obtuvieron del programa *Extractor Rápido de Información Climática III (ERIC)* (IMTA, 2009).

**Table 1. Weather stations closest to the sampling site in the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve.****Cuadro 1. Estaciones meteorológicas más cercanas al sitio de muestreo en el suroeste de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda.**

| State/<br>Entidad | Key/<br>Clave | Name/<br>Nombre | Municipality/<br>Municipio | Longitude/<br>Longitud | Latitude/<br>Latitud | Elevation (m)/<br>Altitud (m) | Period/<br>Periodo |
|-------------------|---------------|-----------------|----------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------|
| Querétaro         | 22056         | Higuerillas     | Cadereyta                  | -99.763                | 20.914               | 1 580                         | 1982-2003          |
| Querétaro         | 22012         | Peñamiller      | Peñamiller                 | -99.814                | 21.055               | 1 330                         | 1966-2001          |
| Querétaro         | 22035         | Vizarrón        | Cadereyta                  | -99.704                | 20.834               | 2 030                         | 1973-2002          |
| Guanajuato        | 11083         | Xichu           | Xichu                      | -100.050               | 21.383               | 1 310                         | 1969-2003          |

the most influential rainfall period was identified, a linear transfer equation or climate reconstruction model was developed. In order to statistically validate the climate reconstruction model, the linear equation was applied to the observed data period (1966-2003) and two statistical tests were developed, one of calibration and another of verification between the observed and reconstructed precipitation. Calibration was carried out in the first half of the observed climatic records (1985-2003). The success of the calibration is measured by the percentage of variation that the independent variable (total ring index) explains of the reconstructed dependent variable (precipitation). In the remaining half (1966-1984), the verification was made with the objective of statistically validating the climate reconstruction (Fritts, 1999).

Once the statistical significance was determined, the regression model was applied to the whole series and a reconstruction of the variability of the historical precipitation was generated. A flexible decennial curve was fitted to the annual resolution high-frequency series to highlight low frequency events, dry or wet periods (Cook & Peters, 1981). The dry and wet periods reconstructed were compared with other dendrochronological works generated for the center and north of the country, and with historical documents.

The influence of ENSO on the historical variability of the precipitation in the SGBR was analyzed through the relationship of the reconstructed precipitation and the Niño 3.4 indices (1894-2008), estimates of the variability of ENSO (Trenberth, Kevin, & National Center for Atmospheric Research Staff, 2016). To this end, annual resolution graphs and their wavelet power spectra generated with the MATLAB 6.5 program (MathWorks, 2002) were used. Finally, using data from the Mexican Drought Atlas (Stahle et al., 2016), drought maps were generated for four periods with less rainfall, in order to show the climatic conditions at national level and verify the reconstructed events.

Por medio de un análisis de correlación entre los índices de anillo total de la cronología combinada y los datos observados de precipitación mensual y acumulada, se determinaron los meses que mejor se relacionaron con la cronología, así como el periodo del año que influyó de manera significativa en el crecimiento de los árboles (Fritts, 1999). Una vez identificado el periodo de lluvia más influyente, se desarrolló una ecuación de transferencia lineal o modelo de reconstrucción climática. Con el objetivo de validar estadísticamente el modelo de reconstrucción climática, la ecuación lineal se aplicó al periodo de datos observados (1966-2003) y se desarrollaron dos pruebas estadísticas; una de calibración y otra de verificación entre la precipitación observada y la reconstruida. La calibración se realizó en la primera mitad de los registros climáticos observados (1985-2003). El éxito de la calibración se mide por el porcentaje de variación que la variable independiente (índice de anillo total) explica de la variable dependiente reconstruida (precipitación). En la mitad restante (1966-1984), se hizo la verificación con el objetivo de validar estadísticamente la reconstrucción climática (Fritts, 1999).

Una vez determinada la significancia estadística, el modelo de regresión se aplicó a la totalidad de la serie y se generó una reconstrucción de la variabilidad de la precipitación histórica. A la serie de alta frecuencia de resolución anual se ajustó una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia, periodos secos o húmedos (Cook & Peters, 1981). Los periodos secos y húmedos reconstruidos se cotejaron con otros trabajos dendrocronológicos generados para el centro y norte del país, y con documentos históricos.

La influencia de ENSO en la variabilidad histórica de la precipitación de la RBSG se analizó mediante la relación de la precipitación reconstruida y los índices Niño 3.4 (1894-2008), estimativos de la variabilidad del ENSO (Trenberth, Kevin, & National Center for Atmospheric Research Staff, 2016). Para ello se emplearon gráficos de resolución anual y sus espectros potenciales de

## Results and discussion

It was possible to date a total of 78 growth cores, 42 from *P. greggii* and 36 from *P. montezumae*. Nine cores could not be dated due to suppression periods that hindered reliable dating. Two total-ring chronologies, one of 117 years (1898-2014) of *P. greggii* and another of 124 years (1877-2000) of *P. montezumae*, were generated. The same variability was determined between series, the databases were combined and a composite chronology was developed with a length of 138 years (1877-2014). The chronology's length is determined by the age of the trees, with the older the individuals the more feasible it is to develop more extensive series that allow analyzing climate variability on a longer time scale.

Figure 2 illustrates the climate response function in the SGBR. By relating the chronology with the regional climatic data, it was determined that the average monthly precipitation presented positive correlation with the January-May period; the correlations were highly significant ( $P < 0.01$ ) for the months of January, April and May (Figure 2a). In the case of accumulated precipitation, the correlation was highly significant ( $P < 0.01$ ) for the January-June period; the highest correlation was observed in the January-May period ( $r = 0.72$ ;  $P < 0.01$ ) (Figure 2b). The species *P. greggii* and *P. montezumae* responded significantly to the precipitation corresponding to the winter-spring period. This is attributed to the fact that the rain in this period is of low intensity, does not exceed the infiltration capacity and is stored in the soil profile where, later, it is used by the trees at the beginning of the growing season (Fritts, 2001). Unlike this, summer rains are recorded in a torrential manner and largely drain off without being used by the tree, to which the zero-growth rate in these months of the year is attributed (Figure 2a). According to other studies, the winter-spring seasonal precipitation is the rain that most influences the growth of the center's forests (Cerano-Paredes et al., 2013, 2014; Cortés, Villanueva, Nieto de Pascual, Estrada, & Guerra, 2012) and the north of the country (Cerano et al., 2009, 2011b; Chávez-Gándara et al., 2017; Villanueva-Díaz et al., 2015).

The relationship of the total ring index and the observed average rainfall of the January-May seasonal period (1966 to 2003) was significant ( $r = 0.72$ ,  $P < 0.01$ ) (Figure 2c). This indicates that there is potential to develop a regression equation that allows reconstructing the variability of seasonal rainfall over the total length of the chronology. The transfer equation for the bivariate model was as follows:

$$Y_t = a + b * X_t$$

$$Y_t = - 54.7791 + 153.0196 * X_t$$

ondeleta generados con el programa MATLAB 6.5 (MathWorks, 2002). Finalmente, empleando los datos del *Mexican Drought Atlas* (Stahle et al., 2016), se generaron mapas de sequía para cuatro periodos con menor precipitación, con el objetivo de mostrar las condiciones climáticas a nivel nacional y verificar los eventos reconstruidos.

## Resultados y discusión

Se logró datar un total de 78 núcleos de crecimiento; 42 de *P. greggii* y 36 de *P. montezumae*. Nueve núcleos no se lograron fechar por presentar periodos de supresión que dificultaron un fechado confiable. Se generaron dos cronologías de anillo total, una de 117 años (1898-2014) de *P. greggii* y otra de 124 años (1877-2000) de *P. montezumae*. Se determinó una misma variabilidad entre series, las bases de datos se combinaron y se desarrolló una cronología compuesta con una extensión de 138 años (1877-2014). La extensión de la cronología está determinada por la edad de los árboles, a medida que los individuos son más longevos es factible el desarrollo de series más extensas que permiten analizar la variabilidad climática en una escala mayor de tiempo.

La Figura 2 ilustra la función de respuesta climática en la RBSG. Al relacionar la cronología con los datos climáticos regionales, se determinó que la precipitación promedio mensual presentó correlación positiva con el periodo enero-mayo; las correlaciones fueron altamente significativas ( $P < 0.01$ ) para los meses de enero, abril y mayo (Figura 2a). En el caso de la precipitación acumulada, la correlación fue altamente significativa ( $P < 0.01$ ) para el periodo enero-junio; la mayor correlación se observó en el periodo enero-mayo ( $r = 0.72$ ;  $P < 0.01$ ) (Figura 2b). Las especies *P. greggii* y *P. montezumae* respondieron significativamente a la precipitación que corresponde al periodo invierno-primavera. Esto se atribuye a que la lluvia en este periodo es de baja intensidad, no supera la capacidad de infiltración y queda almacenada en el perfil del suelo donde, posteriormente, es aprovechada por los árboles al inicio de la estación de crecimiento (Fritts, 2001). A diferencia de esto, las lluvias de verano se registran de manera torrential y escurren en su mayoría sin ser aprovechadas por el árbol, a lo cual se atribuye la relación nula del crecimiento en estos meses del año (Figura 2a). De acuerdo con otros estudios, la precipitación estacional invierno-primavera es la lluvia que más influye en el crecimiento de los bosques del centro (Cerano-Paredes et al., 2013, 2014; Cortés, Villanueva, Nieto de Pascual, Estrada, & Guerra, 2012) y norte del país (Cerano et al., 2009, 2011b; Chávez-Gándara et al., 2017; Villanueva-Díaz et al., 2015).

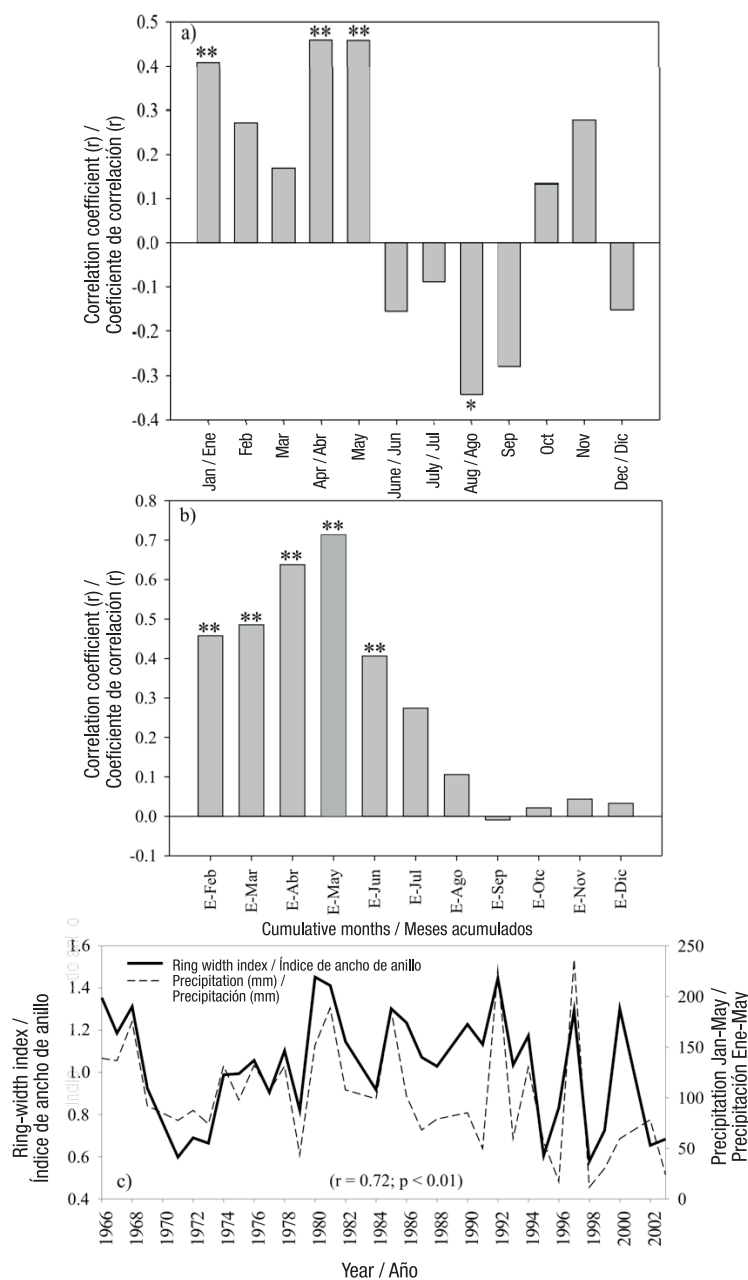
where,

$Y_t$  = value of January-May precipitation (mm) for a specific year

$X_t$  = total ring index for a specific year

$a$  and  $b$  = constants obtained from the model.

La relación del índice de anillo total y la precipitación promedio observada del periodo estacional enero-mayo (1966 al 2003) fue significativa ( $r = 0.72$ ,  $P < 0.01$ ) (Figura 2c). Esto indica que hay potencial para desarrollar una ecuación de regresión que permita reconstruir la



**Figure 2.** Climate response function in the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve: a) correlation between the total ring width index and the average monthly precipitation records in the period 1966 to 2003, b) correlation between the total ring width index and the accumulated precipitation records in the period 1966 to 2003, and c) association between the total ring index and the average January-May (winter-spring) seasonal precipitation observed in the period 1966 to 2003. Statistical significance: \* $P < 0.05$  and \*\* $P < 0.01$ .

**Figura 2.** Función de respuesta climática en el suroeste de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda: a) correlación entre el índice de ancho de anillo total y los registros de precipitación promedio mensual en el periodo 1966 al 2003, b) correlación entre el índice de ancho de anillo total y los registros de precipitación acumulada en el periodo 1966 al 2003, y c) asociación entre el índice de anillo total y la precipitación estacional promedio observada enero-mayo (invierno-primavera) en el periodo 1966 al 2003. Significancia estadística: \* $P < 0.05$  y \*\* $P < 0.01$ .



### Calibration and verification of the regression model

The model applied for the observed and reconstructed data period was validated by calibration and verification tests between the observed and reconstructed data (Figure 3a). In the 1985-2003 sub-period calibration process, the correlation between observed and reconstructed precipitation was  $r = 0.72$  and the model explained 52 % of the rainfall variability ( $R^2 = 0.52$ ;  $P < 0.05$ ). The verification in the 1966-1984 sub-period presented a correlation of  $r = 0.85$ , where the model explained 72 % of the variability ( $R^2 = 0.72$ ;  $P < 0.05$ ). In the total period of observed and reconstructed precipitation, the variables had a correlation of  $r = 0.72$  and the model explained 52 % of the precipitation variability ( $R^2 = 0.52$ ;  $P < 0.01$ ; Figure 3a) in the period 1966-2003. Since both model sub-periods had significant correlations, the model generated in the total climate data period (1966-2003) was considered valid and was applied to the total chronology to reconstruct the rainfall variability (Tables 2 and 3).

### Variability of reconstructed precipitation

The reconstruction of the historical winter-spring precipitation for the southwest of the SGBR, which covers the period from 1877 to 2014 (138 years), indicates interannual variability (high frequency) as a result of the intrinsic variation of the study area; likewise, there is interdecadal variability (low frequency) that results from the impact of climate events at a regional and national scale (Figure 3b). This is attributed to global-circulation climatic phenomena of great intensity that affect large regions of Mexico (Seager et al., 2009; Stahle et al., 2009).

In the studied region of the SGBR there is evidence of seven droughts in the last 138 years; one occurred at the end of the 19th century, four in the 20th century, one at the end of the 20th century and the beginning of the 21st century, and one more that began in the second decade of the 21st century with a tendency to decrease in 2014 (Figure 3b; Table 4). With respect to precipitation, important events were reconstructed for the 1960s and 1980s; the latter was the wettest of the last 138 years in the SGBR (Figure 3b, Table 4).

The periods with the most significant decreases in precipitation for the southwest of the Sierra Gorda in Querétaro coincide with droughts reconstructed in regions both for central (Cardoza et al., 2014, Cerano et al., 2014, Cortés et al., 2012) and northern Mexico (Cerano et al., 2009, 2011a; Chavez-Gándara et al., 2017; Díaz-Ramírez, Villanueva-Díaz, & Cerano-Paredes, 2016; Seager et al., 2009; Villanueva-Díaz et al. al., 2015). The above shows that climatic phenomena in specific years

variabilidad de la lluvia estacional en la longitud total de la cronología. La ecuación de transferencia para el modelo bivariado fue la siguiente:

$$Y_t = a + b * X_t$$

$$Y_t = - 54.7791 + 153.0196 * X_t$$

donde,

$Y_t$  = valor de la precipitación (mm) enero-mayo para un año específico

$X_t$  = índice de anillo total para un año específico

$a$  y  $b$  = constantes obtenidas del modelo.

### Calibración y verificación del modelo de regresión

El modelo aplicado para el periodo de datos observados y reconstruidos se validó mediante pruebas de calibración y verificación entre los datos observados y reconstruidos (Figura 3a). En el proceso de calibración del subperiodo 1985-2003, la correlación entre la precipitación observada y la reconstruida fue  $r = 0.72$  y el modelo explicó 52 % de la variabilidad ( $R^2 = 0.52$ ;  $P < 0.05$ ) de la lluvia. La verificación en el subperiodo 1966-1984 presentó una correlación de  $r = 0.85$ , donde el modelo explicó 72 % de la variabilidad ( $R^2 = 0.72$ ;  $P < 0.05$ ). En el periodo total de precipitación observada y reconstruida, las variables tuvieron una correlación de  $r = 0.72$  y el modelo explicó 52 % de la variabilidad de la precipitación ( $R^2 = 0.52$ ;  $P < 0.01$ ; Figura 3a) en el periodo 1966-2003. Puesto que ambos subperiodos del modelo presentaron correlaciones significativas, el modelo generado en el periodo total de datos climáticos (1966-2003) se consideró válido y se aplicó a la cronología total para reconstruir la variabilidad de la lluvia (Cuadros 2 y 3).

### Variabilidad de la precipitación reconstruida

La reconstrucción de la precipitación histórica de invierno-primavera para el suroeste de la RBSG, que comprende el periodo de 1877 al 2014 (138 años), indica variabilidad interanual (alta frecuencia) como resultado de la variación intrínseca del área de estudio; asimismo, hay variabilidad interdecadal (baja frecuencia) que resulta del impacto de eventos climáticos de escala regional y nacional (Figura 3b). Lo anterior se atribuye a fenómenos climáticos de circulación global de gran intensidad que afectan regiones amplias de México (Seager et al., 2009; Stahle et al., 2009).

En la región estudiada de la RBSG se tiene evidencia de siete sequías en los últimos 138 años; una ocurrió a finales del siglo XIX, cuatro en el siglo XX, una a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, y una más que inició en la segunda década del siglo XXI con tendencia a disminuir en el año 2014 (Figura 3b; Cuadro 4). Con respecto a la precipitación, se reconstruyeron eventos

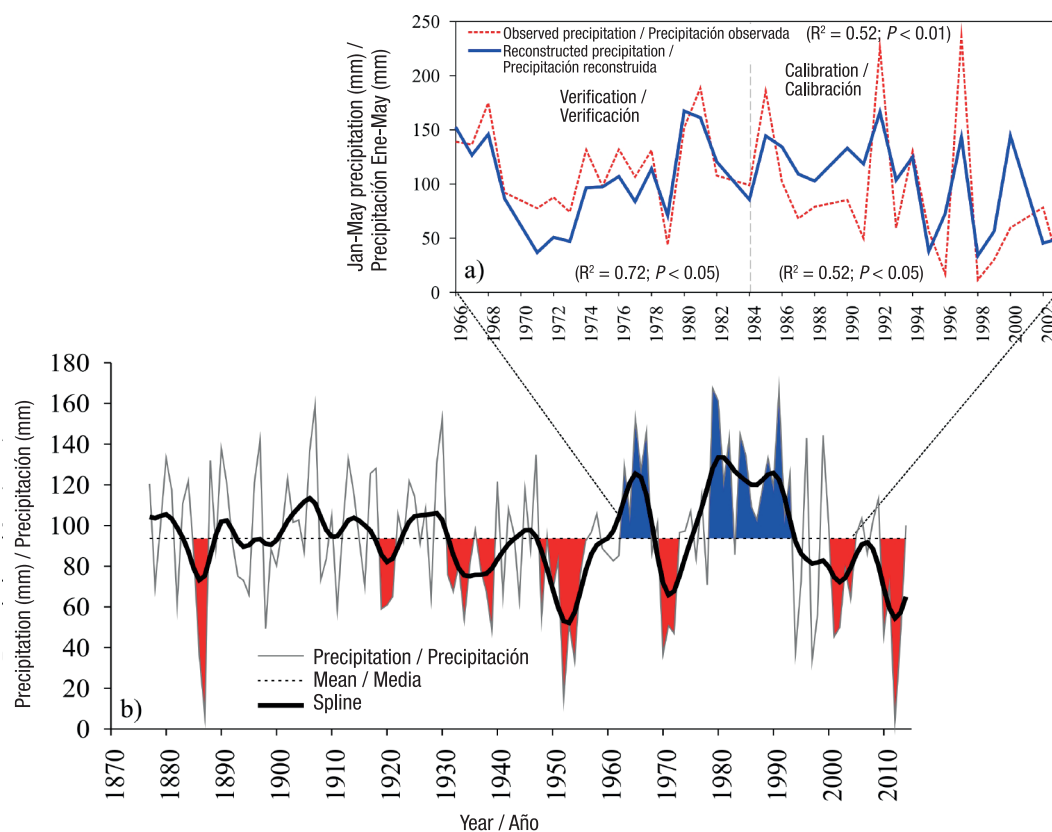


or short periods have affected extensive geographical regions and that based on the paleoclimatic series it is feasible to know the geographical scope.

Of the seven reconstructed droughts in the SGBR, four stand out for recording the lowest rainfall in the last 138 years (1886-1887, 1951-1956, 1969-1973 and 2010-2012). Some paleoclimatic studies have reported that in the late nineteenth century and early twentieth century (1886-1904) a severe drought occurred in central Mexico, with the year 1887 being the most extreme (Cardoza et al., 2014; Contreras-Servín, 2005). This supports the first reconstructed drought period (1886-1889) for this region of Querétaro (Table 4).

importantes para las décadas de 1960 y 1980; esta última fue la más húmeda de los últimos 138 años en la RBSG (Figura 3b; Cuadro 4).

Los periodos con disminuciones de precipitación más importantes para el suroeste de la Sierra Gorda en Querétaro coinciden con sequías reconstruidas en regiones tanto para el centro (Cardoza et al., 2014; Cerano et al., 2014; Cortés et al., 2012) como para el norte de México (Cerano et al., 2009, 2011a; Chávez-Gándara et al., 2017; Díaz-Ramírez, Villanueva-Díaz, & Cerano-Paredes, 2016; Seager et al., 2009; Villanueva-Díaz et al., 2015). Lo anterior demuestra que los fenómenos climáticos en años específicos o periodos



**Figure 3. Reconstructed precipitation: a) calibration (1985-2003 sub-period) and verification (1966-1984 sub-period) of the regression model, and b) winter-spring (January-May) seasonal precipitation in 138 years for the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve. The gray line at the bottom indicates annual precipitation variability; the flexible black curve is a smoothing spline at 10-year intervals (spline) to detect dry events (precipitation below the average) or wet ones (precipitation above the average); and the dotted horizontal line indicates average precipitation (96 mm). The areas in red show the severest droughts and in blue the greatest precipitations.**

**Figura 3. Precipitación reconstruida: a) calibración (subperiodo 1985-2003) y verificación (subperiodo 1966-1984) del modelo de regresión. b) Precipitación estacional invierno-primavera (enero-mayo) en 138 años para el suroeste de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda. La línea gris al fondo indica la variabilidad anual de la precipitación; la curva flexible en color negro es una línea suavizada en intervalos de 10 años (spline) para detectar eventos secos (precipitación por debajo de la media) o húmedos (precipitación por encima de la media); y la línea horizontal punteada indica la precipitación promedio (96 mm). Las áreas en color rojo muestran las sequías más fuertes y en color azul las precipitaciones mayores.**

**Table 2. Linear regression model generated for the reconstruction of the winter-spring seasonal precipitation in the Sierra Gorda Biosphere Reserve.**

**Cuadro 2. Modelo de regresión lineal generado para la reconstrucción de la precipitación estacional invierno-primavera de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda.**

| Period/<br>Periodo | R <sup>2</sup> | Constants/<br>Constantes | Standard error/<br>Error estándar | t-test/<br>Prueba de t | P        |
|--------------------|----------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------|
| 1966-2003          | 0.52           | a -54.7791               | 27.1347                           | -2.0187                | 0.051955 |
|                    |                | b 153.0196               | 25.6407                           | 5.9678                 | 0.000001 |

**Table 3. Analysis of variance of the regression model generated for the reconstruction of winter-spring (1877-2014) seasonal precipitation in the Sierra Gorda Biosphere Reserve.**

**Cuadro 3. Análisis de varianza del modelo de regresión generado para la reconstrucción de la precipitación estacional invierno-primavera (1877-2014) de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda.**

| Period/<br>Periodo       | Sum of squares/<br>Suma de cuadrados | Difference/<br>Diferencia | Mean squares/<br>Cuadrados medios | F      | P        |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------|----------|
| Regression/<br>Regresión | 55 074.9                             | 1                         | 55 074.9                          | 35.614 | 0.000001 |
| Residual                 | 49 484.8                             | 32                        |                                   |        |          |
| Total                    | 104 559.7                            |                           |                                   |        |          |

**Table 4. Reconstructed precipitation events below and above the observed average (96 mm; 1966-2003). The years 1887 and 2012 represent the driest, and 1979 and 1991 the wettest of the 1877-2014 period in the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve in Querétaro.**

**Cuadro 4. Eventos de precipitación reconstruida por debajo y arriba de la media observada (96 mm; 1966-2003). Los años 1887 y 2012 representan los más secos; 1979 y 1991, los más húmedos del periodo 1877-2014 en el suroeste de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda en Querétaro.**

| Condition/<br>Condición | Precipitation/<br>Precipitación | Period/<br>Periodo | Most extreme year/<br>Año más extremo | Average precipitation of 96 mm/<br>Precipitación media de 96 mm |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------------|---|
| Drought/Sequía          | Low/Baja                        | 1919-1921          | 1919                                  | 59  |
|                         |                                 | 1931-1939          | 1939                                  | 48  |
|                         |                                 | 2000-2005          | 2001                                  | 45  |
|                         | Very low/Muy baja               | 1886-1889          | 1887                                  | 06  |
|                         |                                 | 1948-1957          | 1952                                  | 15  |
|                         |                                 | 1969-1972          | 1970                                  | 37  |
|                         |                                 | 2010-2015          | 2012                                  | 04  |
| Wetness/Humedad         | High/Alta                       | 1963-1969          | 1965                                  | 152   |
|                         | High/Alta                       | 1979-1993          | 1979 and 1991                         | 167 and 166   |

The 1950s represent the most extensive drought in the last 138 years in the SGBR (Figure 3b). The results agree with those reported in precipitation reconstructions for both northern (Cerano et al., 2009, 2011a; Seager et al., 2009) and central Mexico (Cerano et al., 2014; Cortés et al., 2012), where severe droughts were reconstructed in the 1950s. The decreased rainfall in this decade is considered one of the most widespread droughts, with the greatest spatial amplitude and great intensity in Mexico and the southeastern United States (Florescano, Cervera, & Arias, 1980; Stahle et al., 2009).

During the period 1969-1973, a low rainfall event was recorded (Figure 3b) that agrees with intense drought records in central (Cardoza et al., 2014) and northern Mexico (Cerano et al., 2009). Likewise, Florescano et al. (1980) documented, for this period, an agricultural crisis with negative economic and social effects in a large part of the country as a consequence of the drought. In the present work, the most recent reconstructed drought was for the period 2010-2015, with the year 2012 being the most intense. The *Secretaría de Gobernación* (2012), through the *Diario Oficial de la Federación*, the official gazette of the Mexican government, reported that the worst drought in the north and center of the country was recorded in 2011.

Figure 4 shows the maps generated with data from the Mexican Drought Atlas (Stahle et al., 2016), for each of the four droughts. The results show the climatic condition in most of the national territory, with droughts extending to the SGBR region. The results validate the information reconstructed for the periods with the severest droughts (1886-1887, 1951-1956, 1969-1973 and 2010-2012) and reaffirm the importance of paleoclimatic series in analyzing climate variability on an extensive geographic scale.

### ENSO influence on rainfall variability

The wavelet spectrum for both precipitation (Figure 5a) and El Niño 3.4 (Figure 5b) shows significant periodicities ( $P < 0.05$ ) from one to seven years for the late nineteenth century and early twentieth century, and the late twentieth century and early 21st century; and from 16 to 24 years in the middle of the 20th century. The wavelet coherence between the reconstructed precipitation and the El Niño 3.4 indices shows significant coherence ( $P < 0.05$ ) for the periods 1885-1905, 1937-1985 and 1937-2008 with frequencies of 5-7 years, 14-20 years and 21-29 years, respectively (Figure 5c). For these periods, the two phenomena coincide in phase and have a positive relationship. The severest droughts and wettest events reconstructed for the southwest of the SGBR have been significantly modulated ( $P < 0.05$ ) by ENSO.

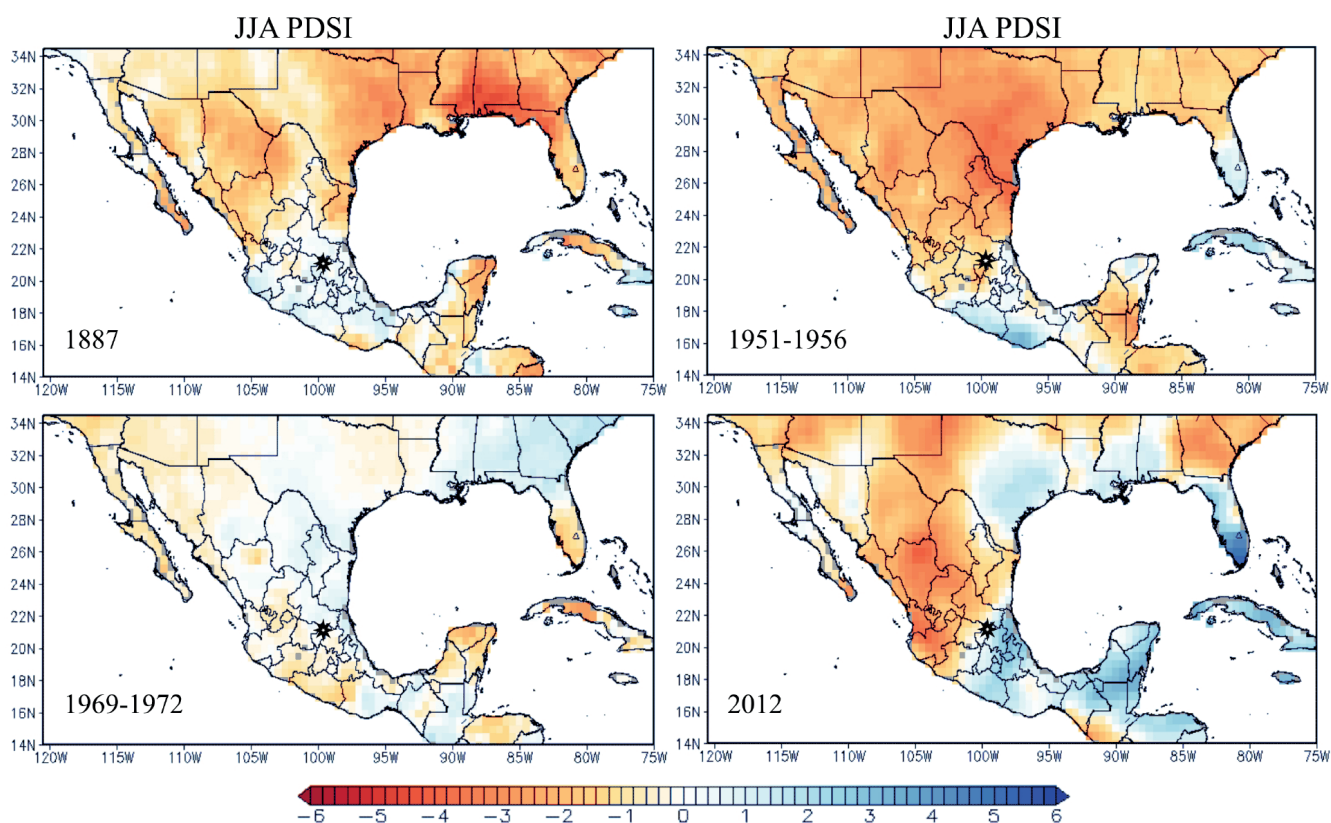
cortos han afectado regiones geográficas extensas y que con base en las series paleoclimáticas es factible conocer los alcances geográficos.

De las siete sequías reconstruidas en la RBSG, cuatro destacan por registrar la precipitación más baja en los últimos 138 años (1886-1887; 1951-1956; 1969-1973 y 2010-2012). Algunos trabajos paleoclimáticos han reportado que a finales del siglo XIX y principios del siglo XX (1886-1904) ocurrió una fuerte sequía en el centro de México, sobresaliendo el año 1887 como el más extremo (Cardoza et al., 2014; Contreras-Servín, 2005). Lo anterior sustenta el primer periodo de sequía reconstruido (1886-1889) para esta región de Querétaro (Cuadro 4).

La década de 1950 representa la sequía más extensa en los últimos 138 años en la RBSG (Figura 3b). Los resultados concuerdan con lo reportado en reconstrucciones de precipitación tanto para el norte (Cerano et al., 2009, 2011a; Seager et al., 2009) como para el centro de México (Cerano et al., 2014; Cortés et al., 2012), donde se reconstruyeron fuertes sequías en la década de 1950. La disminución de la precipitación en esta década se considera una de las sequías más generalizadas, de mayor amplitud espacial y de gran intensidad en México y en el sureste de Estados Unidos (Florescano, Cervera, & Arias, 1980; Stahle et al., 2009).

Durante el periodo 1969-1973 se registró un evento de baja precipitación (Figura 3b) que concuerda con registros de sequías intensas en el centro (Cardoza et al., 2014) y norte del país (Cerano et al., 2009). Asimismo, Florescano et al. (1980) documentó, para dicho periodo, una crisis agrícola con efectos económicos y sociales negativos en gran parte del país como consecuencia de la sequía. En el presente trabajo, la sequía más reciente reconstruida fue para el periodo 2010-2015, sobresaliendo por su intensidad el año 2012. La Secretaría de Gobernación (2012), a través del *Diario Oficial de la Federación*, reportó que en el año 2011 se registró la peor sequía en el norte y centro del país.

La Figura 4 muestra los mapas generados con los datos del *Mexican Drought Atlas* (Stahle et al., 2016), para cada una de las cuatro sequías. Los resultados muestran la condición climática en la mayor parte del territorio nacional, sequías que se extendieron hasta la región de la RBSG. Los resultados validan la información reconstruida para los periodos con sequías más fuertes (1886-1887, 1951-1956, 1969-1973 y 2010-2012) y reafirman la importancia de las series paleoclimáticas, para analizar la variabilidad climática en una escala geográfica extensa.



**Figure 4.** Maps generated with data from the Mexican Drought Atlas (Stahle et al., 2016), which show drought conditions at national level during the four reconstructed periods of lower rainfall in the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Querétaro. On the scale, the values -6 (red) and 6 (blue) indicate higher drought and wetness conditions, respectively. The maps verify the quality of the reconstruction. The study area is indicated by a black star.

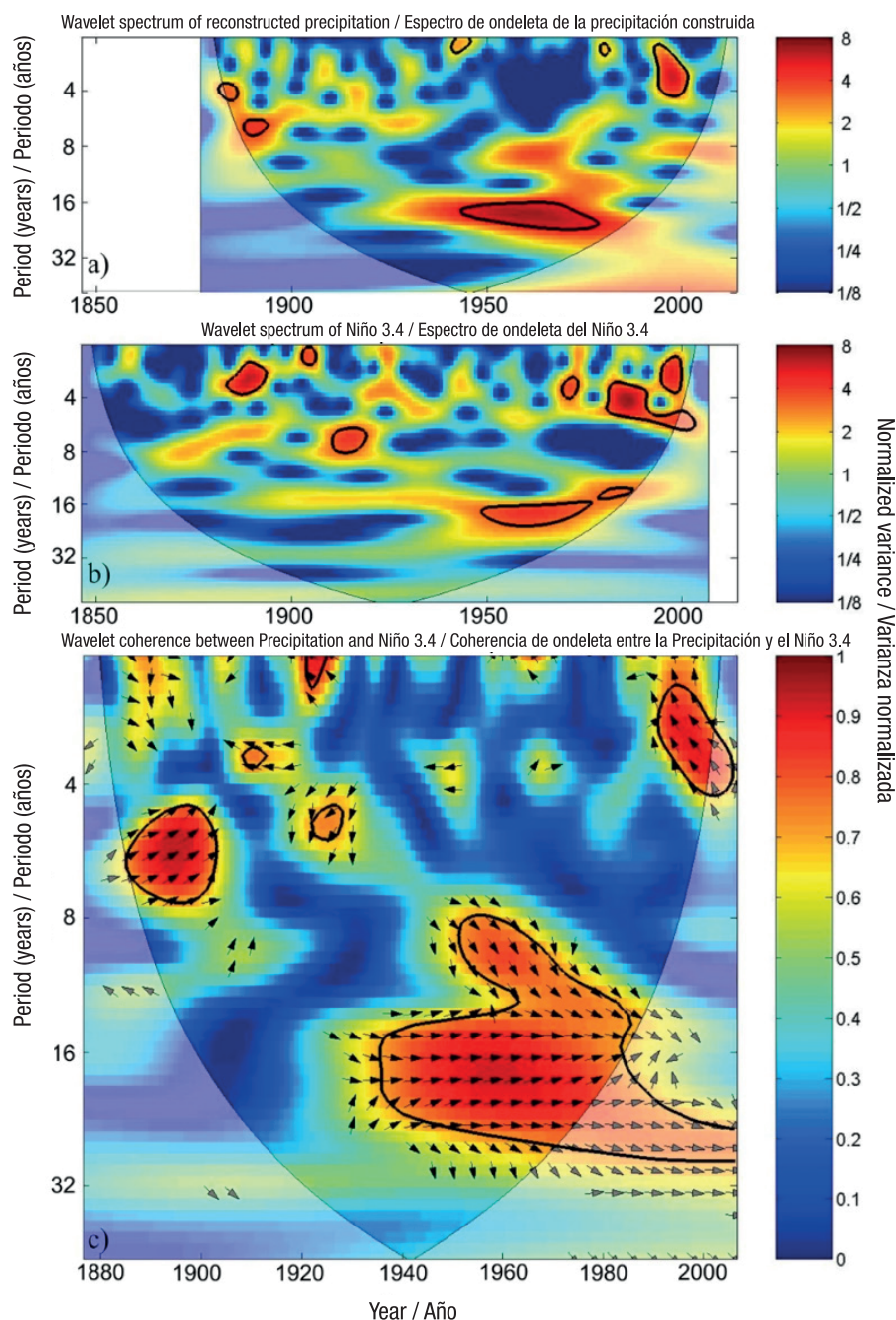
**Figura 4.** Mapas generados con los datos del *Mexican Drought Atlas* (Stahle et al., 2016), que muestran las condiciones de sequía a nivel nacional durante los cuatro periodos reconstruidos de menor precipitación en el suroeste de la Reserva Biosfera Sierra Gorda, Querétaro. En la escala, los valores -6 (color rojo) y 6 (color azul) indican condiciones mayores de sequía y humedad, respectivamente. Los mapas verifican la calidad de la reconstrucción. El área de estudio se indica con una estrella en color negro.

Similar results have been documented in paleoclimatic studies of northern (Cerano et al., 2011a; Chávez et al., 2017) and central Mexico (Therrell, Stahle, Villanueva, Cornejo, & Cleaveland, 2006), where extreme drought events with a 50-year recurrence interval, between the end and the beginning of a century and the middle of a century, have been reported. For some regions, this recurrence has been observed during the last 600 years (Cerano et al., 2011a). This variability modulates the frequency of the severest droughts in this region of northern Querétaro (Figure 3b; Table 4). Conducting this type of study in the region is important to achieve a more detailed analysis of local climate variability and the influence of other general-circulation climatic phenomena on low- and high-frequency variability and the availability of hydrological services of the SGBR.

#### Influencia de ENSO en la variabilidad de la precipitación

El espectro de ondeleta tanto para la precipitación (Figura 5a) como para El Niño 3.4 (Figura 5b) muestra periodicidades significativas ( $P < 0.05$ ) de uno a siete años para finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, y finales del siglo XX e inicio del siglo XXI; y de 16 a 24 años, a mediados del siglo XX. La coherencia de ondeleta entre la precipitación reconstruida y los índices de El Niño 3.4 muestra coherencia significativa ( $P < 0.05$ ) para los periodos 1885-1905, 1937-1985 y 1937-2008 con frecuencias de 5-7 años, 14-20 años y 21-29 años, respectivamente (Figura 5c). Para estos periodos, ambos fenómenos coinciden en fase y tienen una relación positiva. Las sequías más fuertes y los





**Figure 5.** Wavelet power spectra at annual level: a) reconstructed precipitation, b) Niño 3.4 indices, and c) wavelet coherence domain between the reconstructed precipitation series and the Niño 3.4 index. The red areas delimited by a black line represent periods with significant frequencies ( $P < 0.05$ ) and the arrows pointing to the right indicate that the two phenomena are in phase (positive relationship).

**Figura 5.** Espectros potenciales de ondeleta a nivel anual: a) precipitación reconstruida, b) índices Niño 3.4, y c) dominio de coherencia de ondeleta entre la serie de precipitación reconstruida y el índice Niño 3.4. Las áreas en color rojo delimitadas por una línea de color negro representan periodos con frecuencias significativas ( $P < 0.05$ ) y las flechas orientadas hacia la derecha indican que ambos fenómenos están en fase (relación positiva).

## Conclusions

This study based on dendrochronological techniques represents the first work that shows the variability of historical precipitation (138 years) in the Sierra Gorda Biosphere Reserve and contributes to the knowledge and characterization of low-frequency events (low and high precipitation). The severest droughts reconstructed for this region synchronize with extreme drought events reported for both central and northern Mexico, with a recurrence of approximately 50 years. Precipitation variability in the reserve has been significantly modulated by ENSO; understanding the influence of this climatic phenomenon on the historical variability of the regional climate is essential to anticipate negative or positive effects on rainfall conditions. This information is relevant for decision makers in order to implement the appropriate measures and reduce the havoc in communities that depend on the hydrological services of this area.

## Acknowledgments

The first author appreciates the funding received through the CONAFOR-CONACYT fund (CONAFOR-2014, C01-234547), and all the people who supported the field and laboratory work. In addition, the external reviewers are thanked for their comments and suggestions that contributed to improving the manuscript.

*End of English version*

## References / Referencias

- Carabias-Lillo, J., Provencio, E., de la Maza-Elvira, J., & Ruiz-Corzo, M. (1999). *Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Sierra Gorda*. México: Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). Retrieved from [http://www.conanp.gob.mx/datos\\_abiertos/DGCD/48.pdf](http://www.conanp.gob.mx/datos_abiertos/DGCD/48.pdf)
- Cardoza, M. G. F., Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Guerra-de la Cruz, V., & Estrada, Á. J. (2014). Reconstrucción de la precipitación anual para la región oriental del estado de Tlaxcala. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 110–127. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322014000300009&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322014000300009&script=sci_arttext)
- Cerano-Paredes, J., Méndez-González, J., Amaro-Sánchez, A., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Rubio-Camacho, R. A. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(3), 413–423. doi: 10.5154/rchscfa.2013.02.007
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Cervantes, M. R., Vázquez, S. L., Trucios, C. R., & Guerra, C. V. (2014). Reconstrucción

eventos más húmedos reconstruidos para el suroeste de la RBSG han sido modulados significativamente ( $P < 0.05$ ) por ENSO.

Resultados similares se han documentado en estudios paleoclimáticos del norte (Cerano et al., 2011a; Chávez et al., 2017) y centro de México (Therrell, Stahle, Villanueva, Cornejo, & Cleaveland, 2006), donde se han reportado eventos extremos de sequía con una recurrencia de 50 años, a finales e inicios de siglo y a mediados de siglo. Para algunas regiones, esta recurrencia se ha observado durante los últimos 600 años (Cerano et al., 2011a). Tal variabilidad modula la frecuencia de las sequías más fuertes en esta región del norte de Querétaro (Figura 3b; Cuadro 4). Es importante el desarrollo de este tipo de estudios en la región, para lograr un análisis más detallado de la variabilidad climática local y de la influencia de otros fenómenos climáticos de circulación general sobre la variabilidad de baja y alta frecuencia y disponibilidad de los servicios hidrológicos de la RBSG.

## Conclusiones

El presente estudio fundamentado en técnicas dendrocronológicas representa el primer trabajo que muestra la variabilidad de la precipitación histórica (138 años) en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda y contribuye al conocimiento y caracterización de eventos de baja frecuencia (baja y alta precipitación). Las sequías más fuertes reconstruidas para esta región sincronizan con eventos extremos de sequía reportados tanto para el centro como para el norte de México, con recurrencia de 50 años, aproximadamente. La variabilidad de la precipitación ha sido modulada de manera significativa por ENSO; entender la influencia de este fenómeno climático sobre la variabilidad histórica del clima regional es esencial para anticipar efectos negativos o positivos en las condiciones de lluvia. Esta información es relevante para los tomadores de decisiones con el objetivo de implementar las medidas pertinentes y disminuir estragos en las comunidades que dependen de los servicios hidrológicos de esta zona.

## Agradecimientos

El primer autor agradece el financiamiento a través del fondo CONAFOR-CONACYT con registro CONAFOR-2014, C01-234547, y a todas las personas que apoyaron en el trabajo de campo y laboratorio. Asimismo, agradecemos a los revisores externos por sus comentarios y sugerencias que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

*Fin de la versión en español*

- de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 41–54. doi: 10.14350/rig.35190
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Fulé, P. Z., Arreola, Á. J. G., Sánchez, C. I., & Valdez, C. R. D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27–44. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712009000200002&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712009000200002&script=sci_arttext&tlng=en)
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Méndez, G. J., & Constante, G. V. (2011a). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 235–249. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342011000800006&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342011000800006&script=sci_arttext)
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Constante, G. V., González, B. J. L., & Estrada, Á. J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 7–23. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322012000200002&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322012000200002&script=sci_arttext&tlng=en)
- Cerano, P. J., Villanueva, D. J., Valdez, C. R. D., Cornejo, O. E. H., Sánchez, C. I., & Constante, G. V. (2011b). Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(4), 31–45. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322011000200004&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322011000200004&script=sci_arttext)
- Chávez-Gándara, M. P., Cerano-Paredes, J., Nájera-Luna, J. A., Pereda-Breceda, V., Esquivel-Arriaga, G., Cervantes-Martínez, R., ...Corral-Rivas, S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque*, 38(2), 387–399. doi: 10.4067/S0717-92002017000200016
- Contreras-Servín, C. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, 56, 118–133. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56905609>
- Cook, E. R., & Peters, K. (1981). The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41, 45–53. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261038/trb-41-045-053.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cook, E. R., & Holmes, R. L. (1984). *Program ARSTAN user's manual*. USA: University of Arizona.
- Cortés, B. E. N., Villanueva, D. J., Nieto de Pascual, P. C., Estrada, Á. J., & Guerra, C. V. (2012). Reconstrucción de precipitación estacional para el noroeste de Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 51–67. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322012000100005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322012000100005&script=sci_arttext)
- Secretaría de Gobernación (2012). Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas. México: Diario Oficial de la Federación (DOF). Retrieved from [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012)
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y Bosques*, 22(1), 111–123. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712016000100111&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712016000100111&script=sci_arttext&tlng=en)
- Florescano, E. M., Cervera, J. S., & Arias, D. P. G. (1980). Las sequías en México: historia, características y efectos. *Comercio Exterior*, 30(7), 747–757. Retrieved from <http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/421/9/RCE9.pdf>
- Fritts, H. C. (1999). *An empirical model of the tree-ring response to monthly variations in climate*. Tucson, AZ, USA: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.
- Fritts, H. C. (2001). *Tree rings and climate*. New Jersey, USA: Blackburn Press.
- Holmes, R. L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43, 69–78. Retrieved from <https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/261223/trb-43-069-078.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2009). *Extractor Rápido de Información Climatológica v. 3.0 (ERIC III)*. Base de datos y software. Jiutepec, Morelos, México: SEMARNAT-IMTA. Retrieved September 17, 2017 from <https://www.imta.gob.mx/productos/software/eric-iii-version-3-2-extractor-rapido-de-informacion-climatolo-detail>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Anuario estadístico y geográfico de Querétaro. Retrieved from [http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF\\_Docs/QRO\\_ANUARIO\\_PDF.pdf](http://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/QRO_ANUARIO_PDF.pdf)
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. México: SEMARNAT-Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM). Retrieved from <http://coclima.guanajuato.gob.mx/archivos/file/presentacion.pdf>
- Magaña-Rueda, V. O. (2004). El cambio climático global: comprender el problema. En J. Martínez & A. Fernández (Eds.), *Cambio climático: una visión desde México* (pp. 17–28). México: Instituto de Ecología-SEMARNAT. Retrieved from [http://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Cambio\\_Climatico\\_una\\_vision\\_desde\\_Mexico.pdf](http://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Cambio_Climatico_una_vision_desde_Mexico.pdf)
- Marcos-Valiente, Ó. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59–80. Retrieved from <http://www.redalyc.org/html/176/17602604/>
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5–20. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222012000100001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100001)

- MathWorks (2002). MATLAB Versión 6.5. USA: The MathWorks, Inc.
- Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., & Stahle, D. W. (2009). Mexican drought: An observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera*, 22(1), 1–31. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-62362009000100001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-62362009000100001&script=sci_arttext)
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Villanueva-Díaz, J., Fye, F. K., Burnette, D. J., Griffin, R. D., & Heim, Jr. R. R. (2009). Early 21st-century drought in Mexico. *Eos*, 90(11), 89–100. doi: 10.1029/2009EO110001
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., & Szejner, P. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34–60. doi: 10.1016/j.quascirev.2016.06.018
- Stokes, M. A., & Smiley, T. L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. Chicago, USA: University of Chicago Press.
- Therrell, D. M., Stahle, D. W., Villanueva, D. J., Cornejo, O. E., Cleaveland, M. K. (2006). Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474-2001. *Climatic Change*, 74, 493–504. doi: 10.1007/s10584-006-6865-z
- Trenberth, Kevin, & National Center for Atmospheric Research Staff. (2016). The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI). Retrieved May 12, 2018 from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Constante-García, V., Stahle, D. W., Estrada-Ávalos, J., & Tostado-Plascencia, M. M. (2011). Variabilidad hidroclimática histórica del norte de México inferida con anillos de crecimiento de Douglas-fir. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 221–334. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe2/v2spe2a5.pdf>
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes J., Fulé P. Z., Cortés-Montaña C., Vázquez-Selem, L., Yocom, L. L., & Ruiz-Corral, J. A. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones Geográficas*, 87, 141–153. doi: 10.14350/rig.44485