

Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca alta del Río Mezquital, Durango*

Hydro-climatic variability reconstructed from tree rings for the upper watershed of the Mezquital River, Durango

José Villanueva Díaz^{1§}, Julián Cerano Paredes¹, Sergio Rosales Mata², Juan Carlos Arrocena López¹, D. W. Stahle³, José Ariel Ruiz Corral⁴ y Aldo R. Martínez Sifuentes¹

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera- INIFAP. Gómez Palacio, Durango, México. 35140. Tel: (871) 159 01 04 y 159 01 05. (cerano.julian@inifap.gob.mx; juarrocena@gmail.com; im_aldo09@hotmail.com). ²Centro de Investigación Regional Norte-Centro-INIFAP. Durango, Durango, México. (rosales.sergio@inifap.gob.mx). ³Tree-Ring Laboratory, Department of Geosciences, Ozark Hall 113, Fayetteville, AR 72701, USA. (dstahle@uark.edu). ⁴Centro de Investigación Regional Pacífico-Centro-INIFAP. Guadalajara, Jalisco, México. (corral.ariel@inifap.gob.mx). ⁵Autor para correspondencia: villanueva.jose@inifap.gob.mx.

Resumen

Una red dendrocronológica se desarrolló para la cuenca alta del río Mezquital, donde se generan los escurrimientos para el riego del Valle de Guadiana, Durango. Las series dendrocronológicas estuvieron significativamente asociadas, sugiriendo el impacto de fenómenos climáticos comunes. Las cronologías de madera temprana y de anillo total de *Pinus durangensis* respondieron significativamente a la precipitación invierno-primavera, mientras que la de madera tardía, a la de verano y a los volúmenes anuales registrados en la presa Guadalupe Victoria. A pesar de esta respuesta, la extensión de la cronología (1945-2012) limitó desarrollar reconstrucciones de ambas variables. Una cronología regional de *Pseudotsuga menziesii*, se extendió de 1770 a 2012. La serie de madera temprana, permitió una reconstrucción de lluvia enero-mayo y con madera tardía, de julio-septiembre. La reconstrucción de verano, que representa 85% de la precipitación en la región, indicó sequías severas en las décadas de 1810-1820, 1870, 1910, 1930, 1950, 1970 y 2000 y periodos húmedos en 1830, 1900, 1940, 1960 y 1980; similar a otras reconstrucciones para el norte de México. ENSO es uno de los fenómenos climáticos que más impacta la variabilidad hidroclimática

Abstract

A dendrochronological network was developed for the upper watershed of the Mezquital River where the irrigation runoff are generated for the Valle de Guadiana, Durango. The dendrochronological series were significantly associated, suggesting the impact of common climate phenomena. The chronologies of early-wood and total ring of *Pinus durangensis* responded significantly to the winter-spring precipitation, while the late-wood to the summer and annual volumes recorded in the dam Guadalupe Victoria. Despite this response, the extent of the chronology (1945-2012) limited to develop reconstructions of both variables. A regional chronology of *Pseudotsuga menziesii*, lasted from 1770 to 2012. The series of early-wood allowed a reconstruction of rain from January to May and with late-wood from July to September. The reconstruction of summer, representing 85% of the rainfall in the region, indicated severe drought during the decades of 1810 to 1820, 1870, 1910, 1930, 1950, 1970 and 2000 and wet periods in 1830, 1900, 1940, 1960 and 1980; similar to other reconstructions for northern Mexico. El Niño Southern Oscillation (ENSO) is one of the most striking weather events affecting the hydroclimatic variability in the western Sierra Madre, but

* Recibido: abril de 2014
Aceptado: agosto de 2014

en la Sierra Madre Occidental, pero su impacto en esta cuenca ($r = -0.59$, <0.000 , 1876-1996) superó al reportado para otras reconstrucciones dendroclimáticas en el norte de México, lo cual indica su potencial con fines de predicción, situación que contribuiría a integrar un plan para el manejo sustentable de los recursos hídricos en el Valle del Guadiana.

Palabras clave: *Pinus durangensis*, dendrocronología, ENSO, escurrimiento, Valle del Guadiana.

Introducción

La producción de recursos hídricos constituye una de las riquezas más importantes de los ecosistemas forestales, particularmente cuando de ellos depende la sustentabilidad y desarrollo económico de una sociedad. Los escurrimientos producidos en las cuencas hidrográficas de los afluentes de los ríos Tunal-San Pedro, Santiago Bayacora y Saucedá en la Región Hidrológica Núm. 11, que finalmente drenan hacia el río Mezquital son almacenados en represas con fines de irrigación en la zona conocida como Valle del Guadiana. Para el caso del Río Tunal, este nace en la parte alta de los predios particulares Culebras y Cuevecillas del municipio Pueblo Nuevo en la Sierra Madre Occidental.

El Río Tunal es de gran importancia económica, ya que sus aguas son almacenadas en la presa Guadalupe Victoria y liberadas al río Mezquital para posteriormente irrigar el Valle del Guadiana; caso similar ocurre con el río Saucedá (también afluente del río Mezquital), que nace en la Sierra de Cacaria y cuyos volúmenes son regulados con fines de irrigación por la presa Peña de Águila. La superficie irrigada con agua de escurrimiento en el Valle de Guadiana es cercana a las 15 000 ha, de las cuales 3 000 ha se irrigan con agua procedente de la presa Santiago Bayacora, 9 000 ha con la de Guadalupe Victoria y 3 000 ha con la presa Peña de Águila (SEMARNAT, 2009). Esta superficie irrigada fluctúa a través del tiempo como función a la variabilidad climática que caracteriza a esta región hidrológica (Gómez *et al.*, 2012).

La escasa disponibilidad de datos climáticos e hidrométricos en esta región, limitan seriamente un análisis detallado del comportamiento hidroclimático histórico y de su posible comportamiento en el tiempo. Esta información es de importancia básica para planear el uso de agua en el Valle del Guadiana, región donde se producen los bienes agropecuarios necesarios para el sustento de la población de la ciudad de

its impact in this basin ($r = -0.59$, <0.000 , from 1876 to 1996) exceeded other dendroclimatic reconstruction reports in northern Mexico, indicating its potential for prediction purposes, a situation that would help integrating a plan for the sustainable management of water resources in the "Valle del Guadiana".

Keywords: *Pinus durangensis*, dendrochronology, ENSO, runoff, Valle del Guadiana.

Introduction

The production of water resources is one of the most important assets of forest ecosystems, particularly when they depend on the sustainability and economic development of a society. Runoff produced in the watersheds of the tributaries of the rivers Tunal-San Pedro, Santiago Bayacora and Saucedá at the hydrological region No. 11, which eventually drain into the Mezquital river are stored in dams for irrigation in the area known as Valle del Guadiana. In the case of River Tunal, this comes from the top of the particular properties Culebras and Cuevecillas of the municipality Pueblo Nuevo in the Sierra Madre Occidental.

The Tunal River is of great economic importance because its waters are stored in the dam Guadalupe Victoria and released into the Mezquital river to irrigate the Valle de Guadiana; a similar case occurs with Saucedá River (also a tributary of the Mezquital River), which originates in the Sierra de Cacaria and whose volumes are regulated for the purpose of irrigating the dam Peña de Águila. The irrigated surface runoff-water in the Valle del Guadiana is close to 15 000 ha, out of which 3000 ha are irrigated with water from the dam Santiago Bayacora, 9000 ha with Guadalupe Victoria and 3 000 ha with the dam Peña de Águila (SEMARNAT, 2009). This irrigated area fluctuates over time as a function of the climate variability that identify this hydrologic region (Gómez *et al.*, 2012).

The limited availability of climate and hydrometric data in this region, severely limit a detailed hydroclimatic historical behaviour analysis and its possible performance over time. This information is of basic importance to plan the use of water in the Valle del Guadiana region where the necessary agricultural goods are produced to sustain

Durango y de cuyo acuífero alimentado por estos afluentes, se extrae el agua utilizada con fines de consumo humano e industrial, y que como otros acuíferos en el norte de México tiene problemas de sobreexplotación y de calidad de agua (CONAGUA, 2009; Chávez Soto, 2010; INEGI, 2012).

El objetivo de este estudio fue utilizar los crecimientos anuales de algunas coníferas presentes en la zona donde se originan los escurrimientos que alimentan las presas de captación en el Valle del Guadiana, como un método indirecto para determinar las fluctuaciones históricas de precipitación y los flujos registrados en estaciones hidrométricas cercanas a las presas de almacenamiento.

Materiales y métodos

Ubicación del área de estudio

El área de estudio se ubica en la cuenca alta del río Mezquital, la cual provee de escurrimiento a diversos afluentes que integran este sistema hidrológico. Los predios en los cuales se realizó el muestreo dendrocronológico se encuentran ubicados dentro del municipio de Pueblo Nuevo, al suroeste de la Ciudad de Durango. Los sitios se distribuyen en predios de Sierra del Nayar, Culebras-Cuevecillas y Molinillos, aledaños al predio las Bayas propiedad de la Universidad Juárez del Estado de Durango; poseen una vegetación de bosque mixto de coníferas y de pino-encino con la presencia de *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus durangensis*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus leiophylla* (González-Elizondo, 1997). El clima de la región es semifrío subhúmedo con lluvias de verano y una precipitación promedio de 950 mm. Por localizarse en la vertiente barlovento de la Sierra Madre Occidental sus escurrimientos drenan hacia las presas ubicadas en el Valle del Guadiana, donde son almacenados y utilizados posteriormente con fines agrícolas.

Metodología

Con el fin de cuantificar la variación hidroclimática en las cuencas productoras del agua de escurrimiento que derivan a las presas que irrigan el Valle del Guadiana; núcleos de crecimiento de especies arbóreas se colectaron en diversos parajes de bosque mixto de coníferas en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango. Cronologías previamente desarrolladas en la región, se utilizaron con

the population of the city of Durango and whose aquifer fed by those tributaries, extracting water used for the purpose of human and industrial consumption, and just like other aquifers in northern Mexico have problems of overfishing and water quality (CNA, 2009; Chávez Soto, 2010; INEGI, 2012).

The aim of this study was to use the annual growth of some conifers present in the area where the runoffs feed the dam Valle del Guadiana as an indirect method to determine the historical fluctuations of precipitation and registered flows in nearby hydrometric stations to the storage dams.

Materials and methods

Location of the study area

The study area is located in the upper watershed of the Mezquital River, which provides runoff for several tributaries that conform this hydrological system. The land where the dendrochronological sampling was conducted is located within the village Pueblo Nuevo, southwest of the City of Durango. The sites are distributed in plots of Sierra del Nayar, Culebras-Cuevecillas and Molinillos bordering the Bayas property of the Universidad Juárez del estado de Durango; with a mixed forest vegetation of conifers and pine-oak with the presence of *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus durangensis*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus pseudostrobus* and *Pinus leiophylla* (González-Elizondo, 1997). The climate of the region is semi-cold, sub-humid with summer rainfall and an average precipitation of 950 mm. Since it is located on the windward side of the Sierra Madre Occidental, their runoff drain towards the dams located in the Valle del Guadiana, where they are stored and subsequently used for agricultural purposes.

Methodology

In order to quantify the hydroclimatic variation in the runoff producing basins conforming the dams that supply the Valle del Guadiana; growth nuclei of tree species were collected in several places of mixed coniferous forest in the village of Pueblo Nuevo, Durango. Chronologies previously developed in the region were used for

finés comparativos para definir la extensión de la influencia de fenómenos climáticos y el posible impacto de patrones atmosféricos en el incremento radial de las principales especies arbóreas ahí presentes (Cuadro 1, Figura 1).

comparative purposes to define the extent of the influence of weather events and the potential impact of weather patterns in the radial increment of the main tree species (Table 1, Figure 1).

Cuadro 1. Características generales de los sitios de estudio.
Table 1. General characteristics of the study sites.

Nombre del Sitio	Fecha de colecta	Clave sitio	Lat. (grados)	Long. (grados)	Altitud (m)
Molinillos	20/06/2013	MOL	23.633	105.045	2 493
Sierra del Nayar	29/05/2013	SNA	23.552	104.963	2 364
Cuevecillas-Culebras ¹	13/06/2013	CUC	23.417	104.835	3 400
Bayas ¹	2002-2003	BAY	23.45	104.85	2 950
Río San Pedro Mezquital ³	2010-2012	RSPM	23.983	104.329	1 840

¹Arrocena (2013); ²González-Elizondo *et al.* (2005); ³cronología en proceso de actualización.

En cada sitio, se seleccionaron árboles longevos y se obtuvieron de tres a cuatro incrementos radiales con un taladro de Pressler de 0.5 mm de diámetro interno y longitudes de 35 a 50 cm y secciones transversales de árboles muertos para facilitar el fechado y lograr extender las cronologías en el tiempo. Las muestras se fecharon mediante técnicas dendrocronológicas convencionales (Stokes y Smiley, 1968; Fritts, 1976). Cada crecimiento individual, se dividió en bandas de crecimiento de madera temprana (EW, por sus siglas en inglés), madera tardía (LW, por sus siglas en inglés) y anillo total (RW, por sus siglas en inglés) y se midieron con un sistema de medición VELMEX (Robinson y Evans, 1980). El cofechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo, se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Las tendencias biológicas no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1986), se generó una cronología estandarizada para dicha localidad (Fritts, 1976), del cual se producen tres versiones de la misma, Estándar, la Residual y la Arstan (Cook, 1987). Para analizar la respuesta climática común entre cronologías, se corrieron correlaciones simples y mediante análisis de función de respuesta, se determinó la respuesta climática de las cronologías con la precipitación anual, estacional y con volúmenes de escurrimiento registrados en estaciones hidrometeorológicas distribuidas en sitios aledaños a las presas de captación. Asimismo, se determinó la influencia de fenómenos de circulación general, los cuales explican gran parte de la variabilidad hidroclimática observada a nivel regional (Méndez y Magaña, 2010). La asociación con estos fenómenos circulatorios, se realizó al contrastar los índices

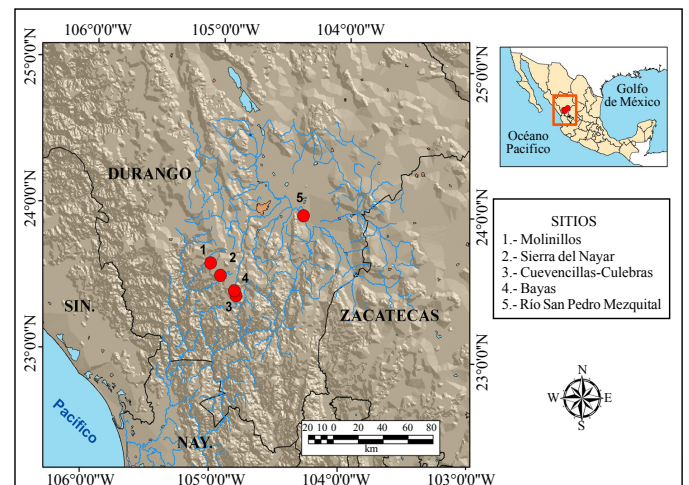


Figura 1. Distribución geográfica de sitios de muestreo y de sitios con series dendrocronológicas existentes en la cuenca alta del río mezquital.

Figure 1. Geographical distribution of sampling sites and sites with existing dendrochronological series in the upper basin of the river Mezquital.

At each site, ancient trees were selected and were obtained from three to four radial increments with a drill Pressler 0.5 mm internal diameter and lengths of 35-50 cm and cross sections of dead trees to facilitate and achieve dated chronologies extend over time. Samples were dated by conventional dendrochronological techniques (Stokes and Smiley, 1968; Fritts, 1976). Each individual growth was divided into growth bands of early-wood (EW), late-wood (LW) and ring-whole (RW) and measured with Velmex system (Robinson and Evans, 1980). Co-dating, climate response quality and accuracy of measurement of each ring was observed with the program COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

dendrocronológicos representativos de la parte alta de la cuenca del río mezquital con índices del Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), fenómeno que impacta de manera significativa el norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2011).

Las reconstrucciones dendroclimáticas desarrolladas se verificaron en la medida de lo posible con reconstrucciones previas y con documentos históricos relacionados con la producción de alimentos y de otros impactos sociales y económicos descritos para la región (Endfield y Fernández, 2006).

Resultados

Extensión de las cronologías

Las series dendrocronológicas desarrolladas en este estudio fluctuaron en extensión; Molinillos (MOL), fue la más corta y cubre el período de 1945 a 2012, (68 años), Sierra del Nayar (SNA) de 1810 a 2012 (203 años), Cuevecillas-Culebras (CUC) de 1770 a 2012 (243 años). La cronología para el sitio Las Bayas (BAY) (González-Elizondo *et al.*, 2005) se extendió de 1655 a 2001 (347 años) y la del río San Pedro-Mezquital (RSPM), de 1113 a 2011 (899 años) (Stahle, 2011. Com. Pers.).

Las correlaciones entre series, considerando como base la de Sierra del Nayar (SNA) fueron significativas ($r > 0.5$, $p < 0.01$), en particular, para aquellas ubicadas dentro de la cuenca alta del río Mezquital (CUC, BAY) y en sitios con elevaciones similares en la Sierra Madre Occidental (Figura 2). Para analizar las fluctuaciones hidroclimáticas que afectan la disponibilidad de agua en el Valle del Guadiana, se consideraron sólo aquellas cronologías procedentes de la parte alta de la cuenca Mezquital, las cual drenan directamente a dicho valle.

Sitio Molinillos

En este predio no se encontraron individuos longevos, debido a aprovechamientos previos de la especie, reportados desde 1986 (Smartwood, 2002), por lo que las cronologías EW, LW y RW de *Pinus durangensis* sólo cubren el período 1945-2012. El análisis de función de respuesta mostró una asociación significativa entre el índice de madera temprana y la precipitación regional integrada por las estaciones climáticas Charco Verde (23.967° latitud norte, 105.450° longitud oeste, 2 163 m de elevación), Llano Grande (23.883°

Biological trends unrelated to climate were removed with Arstan program (Cook and Holmes, 1986), generating a standardized chronology for that locality (Fritts, 1976), of which three versions of it are made, Standard, the Residual and Arstan (Cook, 1987). In order to analyse the common climate response between chronologies, simple correlations were used, and through response function analysis, the climate response was determined of the chronologies with annual, and seasonal precipitation and with runoff volumes recorded in hydrometeorological stations distributed in adjacent sites of the capturing dams. Also, the influence of phenomena of general circulation was determined, which explain much of the hydroclimatic variability observed at the regional level (Méndez and Magaña, 2010). The association with these circulatory phenomena was performed by comparing the representative rates of dendrochronological indices of the upper basin of the Mezquital river with indices of ENSO, a phenomenon that significantly impacts northern Mexico (Stahle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2009 Cerano *et al.*, 2011).

The developed dendroclimatic reconstructions were verified as far as possible with previous reconstructions and historical documents related to the production of food and other social and economic impacts described for the region (Endfield and Fernández, 2006).

Results

Extension of chronologys

The dendrochronological series developed in this study ranged in length; Molinillos (MOL), was the shortest and covers the period 1945-2012, (68 years), Sierra del Nayar (SNA) to 1810-2012 (203 years), Cuevecillas-Culebras (CUC), 1770 to 2012 (243 years). The chronology for the site Bayas (BAY) (González-Elizondo *et al.*, 2005) ranged from 1655-2001 (347 years) and the San Pedro-Mezquital (RSPM) river, 1113-2011 (899 years) (Stahle, 2011, Com. Pers.).

Correlations between sets, considering the Sierra del Nayar (SNA) were significant ($r > 0.5$, $p < 0.01$), especially for those located within the upper watershed of the Mezquital River (CUC, BAY) and at sites with similar elevations in the Western Sierra Madre (Figure 2). In order to analyse the hydroclimatic fluctuations affecting the availability of water in Valle del Guadiana were considered only those chronologies from the upper basin of the Mezquital River, which drains directly into this valley.

latitud norte, 105.2° longitud oeste, 2 406 m de elevación), Navios Viejos (23.833° latitud norte, 105.0° longitud oeste, 2 492 m de elevación) y Pueblo Nuevo (23.383° latitud norte, 105.367° longitud oeste, 1 586 m de elevación) para el período 1963-1990, con una correlación de 0.741 ($p < 0.00$), situación que implica que el crecimiento anual de la madera temprana de *P. durangensis* en este sitio, explica 55% de la variación en precipitación para esta región, información relevante para determinar las fluctuaciones en la variabilidad de lluvia y sus posibles tendencias a corto y mediano plazo.

Por lo que respecta a la madera tardía, se encontró una relación significativa entre el índice de la madera tardía y la precipitación acumulada del período junio-septiembre, época donde se presenta entre 75 a 80% de la precipitación anual y por ende, donde se generan los mayores escurrimientos, los cuales se captan en las presas ubicadas en el Valle del Guadiana. La correlación observada entre ambas variables fue de 0.785 para el período 1963-1990 ($p < 0.00$, $n = 28$), lo que explica cerca de 62% de la variación en la precipitación en la época calidad del año.

Para analizar la relación entre los índices dendrocronológicos y los escurrimientos registrados en estaciones hidrométricas aledañas a las presas, el índice de madera temprana de la serie dendrocronológica de *Pinus durangensis* se comparó con datos volumétricos normalizados de la estación hidrométrica "El Pueblito", ubicada a 750 m aguas debajo de la presa Guadalupe Victoria y que es utilizada para irrigar una superficie aproximada de 9 000 ha en el Valle del Guadiana. La relación obtenida entre el EWI y el volumen anual registrado fue de 0.72, para el período 1965-2000 ($p < 0.000$), lo que implica, que la madera temprana explica 52% de los volúmenes liberados en dicha presa.

No obstante que se desarrollaron series dendrocronológicas individuales para los sitios Sierra del Nayar y Cuevecillas-Culebras, por la cercanía de los mismos (no más de 20 km de separación en línea recta) y por su respuesta climática común, las series de medición de *Pseudotsuga menziesii* desarrolladas por separado, se integraron en una sola base de datos para generar una nueva cronología (CUC-SNA), que cubre el período 1770-2012 (243 años) y la cual es más representativa de las condiciones climáticas dominantes de la parte alta de la cuenca del río Mezquital.

La serie regional de madera temprana respondió de manera significativa ($r = 0.72$, 1961-1991, $n = 31$ años, $p < 0.00$) a la precipitación estacional enero-mayo, que cubre parte de las estaciones invierno-primavera. Aun y cuando la precipitación

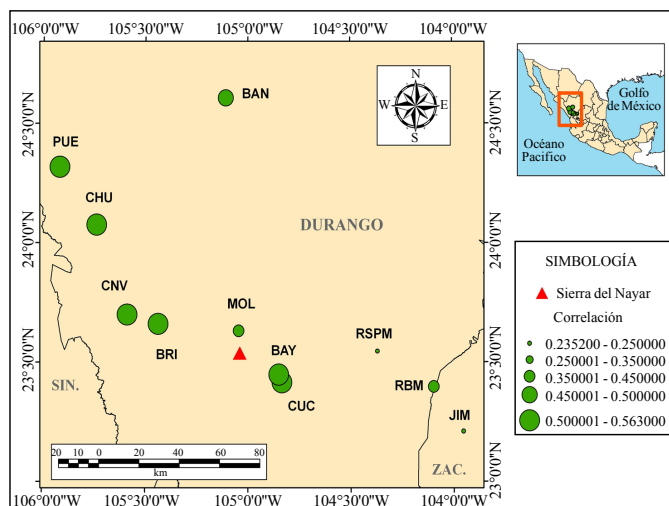


Figura 2. Asociación entre series dendrocronológicas en la Sierra Madre Occidental, tomando como base la de Sierra del Nayar (SNA).

Figure 2. Association between dendrochronological series in the Sierra Madre Occidental, based on the Sierra del Nayar (SNA).

Molinillos

Within this Property, there were no ancient individuals found, due to previous uses of the species reported since 1986 (SmartWood, 2002), so the chronologies EW, LW and RW of *Pinus durangensis* only covered the period from 1945 to 2012. The response function analysis showed a significant association between the rate of early-wood and the integrated regional precipitation by the weather stations Charco Verde (23.967° north latitude, 105.450° west longitude, 2163 m of elevation), Llano grande (23.883° north latitude, 105.2° west longitude, 2406 m of elevation), Navios Viejos (23.833 north latitude and 105.0° west longitude, 2492 m of elevation) and "Pueblo Nuevo" (23.383° north latitude, 105.367° west longitude, 1586 m of elevation) for the period 1963-1990, with a correlation of 0.741 ($p < 0.00$), a situation that implies that the annual growth of early-wood of *P. durangensis* on this site, explains 55% of variation in precipitation for this region, relevant information to determine the fluctuations in rainfall variability and possible trends in the short and medium term.

With respect to the late-wood, we found a significant relationship between the rate of late-wood and accumulated precipitation for the period from June to September, a time where it occurs between 75-80% of annual precipitation and therefore, where most of the runoff is generated, which are captured in the dams located in the Valle del Guadiana. The correlation observed between both variables was 0.785 for

que ocurre en dicho período sólo representa entre 10 y 14% del total anual, esta precipitación es de gran importancia para el incremento radial de las coníferas en el norte y centro de México (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2005) y suroeste de los Estados Unidos de América (Griffin *et al.*, 2011) y proporciona información sobre la variabilidad hidroclimática que se presenta en este período y que tiene influencia de fenómenos de circulación general (Stahle *et al.*, 1998).

El período de registros de precipitación disponible (1961-1991), se dividió en dos subperíodos con fines de calibración y verificación. Debido a que ambos subperíodos resultaron significativos, se utilizó el período total de datos disponibles para generar el modelo de reconstrucción, el cual consiste en una ecuación de regresión simple, que es la siguiente:

$$Y_t = -192.524163 + 303.542655X_t$$

Donde: Y_t : es la precipitación reconstruida del período enero-mayo (mm); X_t : índice de madera temprana de la cronología regional.

La precipitación reconstruida mostró alta variación interanual y multianual, períodos secos se observan en las décadas de 1790 a 1800, 1820, 1860 a 1890, 1910, 1950, 1970 y 2000. Los períodos húmedos fueron menos frecuentes y se detectaron en las décadas de 1830, 1850, 1920, 1940, 1980 y en 2010 (Figura 3).

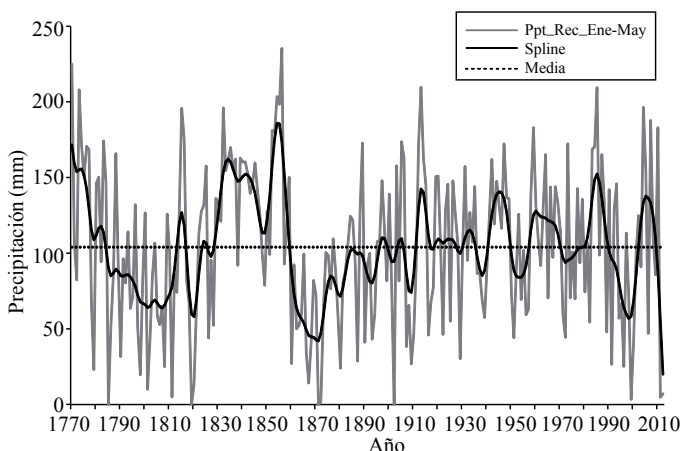


Figura 3. Reconstrucción de precipitación estacional enero-mayo para la parte alta de la cuenca El Mezquital, con una cronología regional de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii*.

Figure 3. Reconstruction of seasonal precipitation from January to May for the upper basin of El Mezquital with a regional chronology of early-wood of *Pseudotsuga menziesii*.

the period 1963 to 1990 ($p < 0.00$, $n = 28$), which accounts for about 62% of the variation in precipitation in the age quality of year.

In order to analyse the relationship between dendrochronological indices and runoff recorded in neighbouring hydrometric stations at the dams, the rate of early-wood of the dendrochronological series of *Pinus durangensis* was compared with the standard volumetric data of the hydrometric station "El Pueblito", located 750 m downstream of the dam Guadalupe Victoria and is used to irrigate an area of 9 000 ha in the Valle del Guadiana. The relationship obtained between EWI and the annual volume recorded was 0.72, for 1965-2000 ($p < 0.000$), implying that early-wood explains 52% of the volumes released into the dam.

Although, individual dendrochronological series were developed for the sites Sierra del Nayar and Cuevecillas-Culebras by their proximity (no more than 20 km apart in a straight line) and their common climate response, the measurement series of *Pseudotsuga menziesii* developed separately were integrated into a single database to generate a new chronology (CUC-SNA), covering the period 1770-2012 (243 years) which is more representative of the dominant climatic conditions the upper basin of the Mezquital river.

The regional series of early-wood responded significantly ($r = 0.72$, 1961-1991, $n = 31$ years, $p < 0.00$) to the seasonal rainfall from January to May, which covers part of the winter-spring season. Even when rainfall occurs during this period represents only 10 to 14% of the annual total, this precipitation is of great importance to the radial increment of conifers in the northern and central Mexico (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2005) and southwestern United States (Griffin *et al.*, 2011) and provides information on hydroclimatic variability that occurs in this period and is influenced by phenomena of general circulation (Stahle *et al.*, 1998).

The precipitation record period available (1961-1991) was divided into two sub-periods with calibration and verification purposes. Since both sub-periods were significant, the total period of available data was used to generate the reconstruction model, which consists of a simple regression equation, which is:

Where: Y_t is the reconstructed precipitation for January-May (mm); X_t : early-wood index of regional chronology.

La serie regional de madera tardía de *Pseudotsuga menziesii*, mostró una asociación positiva ($r= 0.605$, 1963-2003, $p< 0.01$) con la precipitación de verano, no obstante, se obtuvo una mejor respuesta con la serie de madera tardía del sitio Sierra del Nayar, con una correlación de 0.74 ($p< 0.01$) para el período 1965-1996 ($n= 32$), lo que indica, que la madera tardía de *Pseudotsuga menziesii* en este sitio, explica 55% de la variación en la precipitación ocurrida en esta parte de la cuenca en el período julio-septiembre, precipitación que a su vez, está relacionada con la mayor o menor disponibilidad de escurrimientos.

El período de registros de precipitación disponibles (1965-1996) se subdividió en dos períodos con fines de calibración (1981-1996) y verificación (1965-1980), como ambos superíodos mostraron correlaciones significativas con la precipitación, de 0.78 ($p< 0.01$) y 0.68 ($p< 0.01$), respectivamente; se utilizó el período total de registros para generar un modelo lineal con fines de reconstrucción, el cual fue el siguiente:

$$Y_t = -136.3 + 775.9541X_t$$

Donde: Y_t : es la precipitación reconstruida del período julio-septiembre (mm); X_t : índice de madera tardía de la cronología SNA.

La reconstrucción de precipitación julio-septiembre mostró sequías severas en las décadas de 1810 a 1820, 1870, 1910, 1930, 1950, 1970 y 2000 y períodos húmedos en 1830, 1900, 1940, 1960 y 1980 (Figura 4).

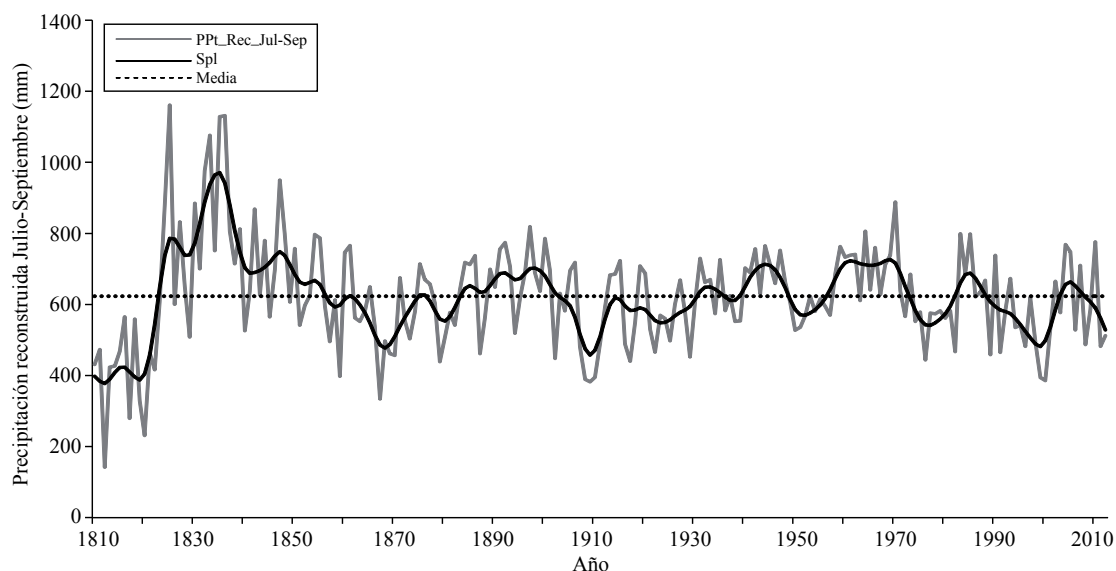


Figura 4. Precipitación reconstruida del período estacional julio-septiembre con una cronología regional de madera tardía de *Pseudotsuga menziesii* en la parte alta de la cuenca del río Mezquital.

Figure 4. Reconstructed precipitation of the seasonal period July-September with a regional chronology of late-wood of *Pseudotsuga menziesii* in the upper basin of the Mezquital river.

The reconstructed precipitation showed high annual and multi-year variation, dry periods are observed in the decades 1790-1800, 1820, 1860-1890, 1910, 1950, 1970 and 2000. Wet periods were less frequent and were found in the 1830's, 1850, 1920, 1940, 1980 and 2010 (Figure 3).

The regional series of late-wood *Pseudotsuga menziesii* showed a positive association ($r= 0.605$, 1963-2003, $p< 0.01$) with summer precipitation; however, a better response was obtained with the series of late-wood of the site Sierra del Nayar, with a correlation of 0.74 ($p< 0.01$) for the period 1965-1996 ($n= 32$), indicating that the late-wood of *Pseudotsuga menziesii* on this site explains 55% of the variation in precipitation in this part of the basin in the period from July to September, rainfall which in turn is related to the degree of availability of runoff.

The period of available precipitation records (1965-1996) was subdivided into two periods for calibration (1981-1996) and verification (1965-1980), as both sub-periods showed significant correlations with precipitation of 0.78 ($p< 0.01$) and 0.68 ($p< 0.01$), respectively; the total period of records used to generate a linear model for the purpose of reconstruction, which was as follows:

Where: Y_t : is the reconstructed precipitation for the period from July to September (mm); X_t : index of late-wood of the SNA chronology.

Gran parte de la variación interanual y multianual en la cuenca alta del río Mezquital puede explicarse por el impacto de fenómenos circulatorios, como es el caso de ENSO, el cual es un índice estandarizado fundamentado en las diferencias de presión registradas entre las islas de Tahiti y Darwin, Australia. Este índice, mide las fluctuaciones de presión a gran escala que ocurren entre el Pacífico tropical del oeste y del este. La fase negativa de ENSO se relaciona con una baja presión en Tahiti y alta presión en Darwin y si esta condición continua por tiempo prolongado, coincide con un calentamiento de las aguas en el Pacífico tropical del este, fase conocida como "Niño", mientras que condiciones inversas se producen durante la fase "Niña" (Ropelewski y Halpert, 1987).

Las series dendrocronológicas RWI, EWI y LWI representativas de la parte alta de la cuenca del río Mezquital, se compararon con índices reconstruidos de ENSO del período invernal para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998), índices anuales de este fenómeno con media de cero, reportados por Allan *et al.* (1996) e índice de lluvia tropical (TRI, siglas en inglés), parámetro que estima la variabilidad de ENSO con base en las anomalías de lluvia registradas en la región del Pacífico Central y que pueden ser más estables que el Índice de la Oscilación del Sur (SOI, siglas en inglés) (Wright, 1979). Se encontró una asociación altamente significativa entre los índices RW y EW y los índices reconstruidos de ENSO del período invernal, con correlaciones de -0.52 ($p < 0.000$, 1770-1977, $n = 208$, $p < 0.000$) para ambos índices. Esta asociación se incrementó para las cronologías RW y EW, cuando se comparó con los índices anuales de ENSO, donde se obtuvieron valores altos de correlación en el orden de $r = -0.58$ ($p < 0.01$, 1876-1996, $n = 121$) y $r = -0.59$ ($p < 0.01$, 1876-1996, $n = 121$), respectivamente (Figura 5).

The reconstruction of precipitation from July to September showed severe droughts in the decades of 1810-1820, 1870, 1910, 1930, 1950, 1970 and 2000 and, wet periods in 1830, 1900, 1940, 1960 and 1980 (Figure 4).

Much of the annual and multi-year variation in the upper watershed of the Mezquital River can be explained by the impact of circulatory phenomena, such as ENSO, which is a standardized index based on pressure differences recorded between the islands of Tahiti and Darwin, Australia. This index measures the pressure fluctuations occurring on a large scale between the tropical western and east Pacific. The negative phase of ENSO is associated with a low pressure in Tahiti and high pressure in Darwin if this condition continues for long time, coinciding with a warming of waters in the eastern tropical Pacific, phase known as "Niño", while reverse conditions occur during the "Niña" phase (Ropelewski and Halpert, 1987).

The dendrochronological series RWI, EWI and LWI representative of the upper watershed of the Mezquital River were compared with reconstructed indices of ENSO of the winter period for northern Mexico (Stahle *et al.*, 1998), annual rates of this phenomenon with means of zero reported by Allan *et al.* (1996) and tropical rain index (TRI), parameter that estimates the variability of ENSO based the rainfall anomalies recorded in the Central Pacific region and might be more stable than the South Oscillation Index (SOI) (Wright, 1979). We found a highly significant association between RW and EW indices and ENSO indices reconstructed in the winter period, with correlations of -0.52 ($p < 0.000$, 1770-1977, $n = 208$, $p < 0.000$) for both indices. This association increased for RW and EW chronologies,

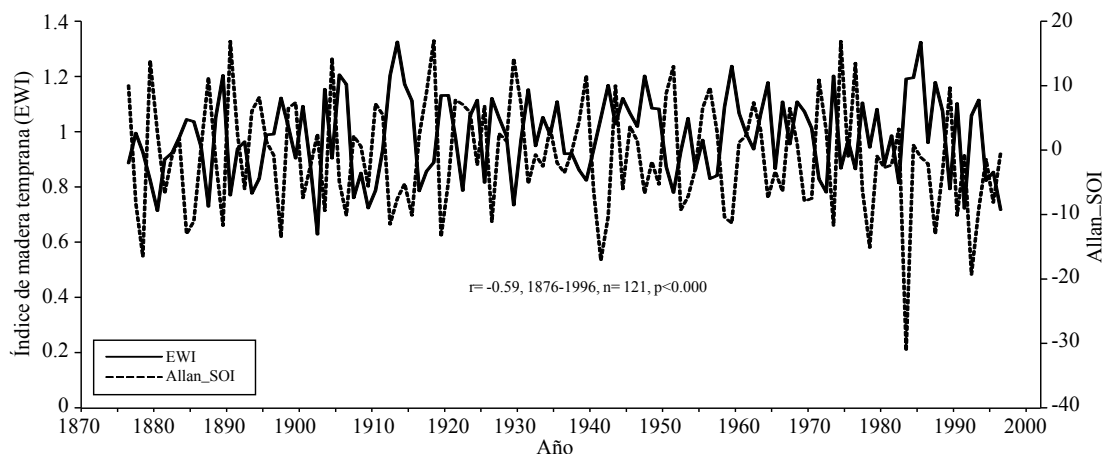


Figura 5. Relación entre la serie regional de índices de madera temprana para la cuenca alta del río Mezquital y los Índices anuales de Oscilación del Sur (SOI).

Figure 5. Relationship between the regional series of indices of early-wood for the upper basin of the Mezquital river and the annual indices of the Southern Oscillation Index (SOI).

Discusión

La comparación de las series dendrocronológicas desarrolladas en la cuenca alta del río Mezquital, por su cercanía entre ellas, aproximadamente 20 km de separación una de otra, mostraron tendencias similares para ciertos períodos, situación atribuida al impacto de fenómenos climáticos comunes que afectaron simultáneamente todo el área de estudio. Este comportamiento común fue evidente para las décadas de 1820, 1860, 1890, 1910, 1920, 1950, 1980 y 2000, donde los valores de los índices cayeron por debajo del valor promedio (1), lo cual habla de condiciones limitantes para el desarrollo de los árboles, situación que normalmente se asocia con sequías intensas (Fritts, 1991).

Caso contrario ocurrió para las décadas de 1810, 1830, 1900, 1970 y 1990, donde los índices superaron el valor medio, sugiriendo la presencia de condiciones favorables para el crecimiento, como son períodos húmedos. El comportamiento común entre cronologías derivado del análisis de correlación múltiple o de componentes principales ha sido ampliamente utilizado para integrar cronologías regionales en el centro y norte de México y explicar el impacto de variables climáticas y de fenómenos circulatorios de amplio impacto (Stahle *et al.*, 2008; Cerano *et al.*, 2012; Villanueva *et al.*, 2005). Sólo de esta forma se puede explicar el alcance de fenómenos hidroclimáticos extremos, que pueden afectar una cuenca, región hidrológica o todo un país.

La series dendrocronológicas de *Pinus durangensis* tanto de anillo total, madera temprana y tardía, estuvieron soportadas por un tamaño de muestra excepcional (más de 80 radios después de 1960) y generaron valores dendrocronológicos considerados excelentes, como fueron la intercorrelación entre series (0.68) y sensibilidad media (0.385), que superan los valores de estos parámetros dendrocronológicos para muchas especies en México utilizadas con este fin (Constante *et al.*, 2010; Speers, 2010).

La sensibilidad de la especie y la alta variación interanual, se reflejó en su excelente respuesta de la cronología a variables climáticas, donde tanto la serie de anillo total como de madera temprana, respondieron significativamente a la precipitación del período estacional febrero-agosto, donde se presenta más de 80% de la precipitación anual que ocurre en la parte alta de la cuenca del río Mezquital. Ésta respuesta supera a cronologías de *Pseudotsuga menziesii*, *Taxodium mucronatum* y otras especies de coníferas, las cuales normalmente responden a la

when compared with the annual ENSO indices, obtaining high correlation values in the order of $r = -0.58$ ($p < 0.01$, 1876-1996, $n = 121$) and $r = -0.59$ ($p < 0.01$, 1876 to 1996, $n = 121$), respectively (Figure 5).

Discussion

The comparison of the dendrochronological series developed in the upper watershed of the Mezquital River, because of its closeness between them, about 20 km apart from each other, showed similar trends for certain periods, a situation attributed to the impact of common weather events that affected simultaneously all the study area. This common behaviour was evident for the decades 1820, 1860, 1890, 1910, 1920, 1950, 1980 and 2000, where the values of the indices fell below the average value (1), showing limiting conditions for the development trees, a situation that is usually associated with severe drought (Fritts, 1991).

The opposite happened for the decades 1810, 1830, 1900, 1970 and 1990, where the rates exceeded the average value, suggesting the presence of favourable conditions for growth such as wet periods. The common behaviour among chronologies derived from multiple correlation analysis and principal component has been widely used to integrate regional chronologies in central and northern Mexico and explain the impact of climatic variables and circulatory phenomena of wide impact (Villanueva *et al.*, 2005; Stahle *et al.*, 2008; Cerano *et al.*, 2012). Only this way we can explain the extent of extreme hydroclimatic phenomena that can affect a watershed hydrologic or an entire country.

The dendrochronological series of *Pinus durangensis* for ring-whole, early and late-wood were supported by a sample of exceptional size (more than 80 radios after 1960) and generated dendrochronological values considered as excellent, as were the intercorrelation between series (0.68) and average sensitivity (0.385), exceeding the values of these parameters for many dendrochronological species in Mexico used for this purpose (Constante *et al.*, 2010; Speers, 2010).

The sensitivity of the species and the high interannual variation was reflected in the excellent response to climatic variables chronology, where both the series of ring-whole and early-wood, responded significantly to the seasonal rainfall from February to August, where presents more than 80% of the annual precipitation occurring in the

precipitación invierno-primavera (octubre o noviembre del año previo a abril, mayo o junio del año actual de crecimiento) (Cleaveland *et al.*, 2003, Villanueva *et al.*, 2005, Cerano *et al.*, 2011; Irby *et al.*, 2013).

Situación que se explica por la probable acumulación de fotosintatos en las estaciones de invierno y primavera, requeridos para el incremento radial del árbol al inicio de la estación de crecimiento (Pallardy, 2008). Una explicación adicional es que la lluvia del período invernal, por ser de baja intensidad, se acumula en el perfil del suelo, donde permanece disponible para el incremento radial del árbol al inicio de la estación de crecimiento (Fritts, 1976).

La serie de madera tardía respondió significativamente a la precipitación acumulada junio-septiembre, que es básicamente durante el verano, estación donde se producen los máximos escurrimientos y que finalmente son captados en las presas, de las que se alimenta el área agrícola del Valle del Guadiana. Esta serie de madera tardía también mostró una correlación significativa con el volumen escurrido anual de la estación hidrométrica El Pueblito, que registra los volúmenes en la presa Guadalupe Victoria, de la cual se irriga una superficie de 9 000 ha en el Valle de Guadiana.

Las asociaciones significativas detectadas entre las cronologías de madera temprana, tardía y de anillo total de *Pinus duranguensis*, precipitación estacional y registro de volúmenes escurridos, constatan el alto potencial que tiene la especie para el desarrollo de reconstrucciones paleoclimáticas, de utilidad para analizar la variabilidad hidroclimática en diversos períodos estacionales. En el presente estudio y debido a la ausencia de arbolado longevo, la cronología generada tuvo una extensión muy corta (1945 a 2012); no obstante, la dominancia de esta especie en diversos rodales de bosque mixto en la región, no descarta la posibilidad de extender y desarrollar un red dendrocronológica con esta especie, de la cual se pueda generar un panorama histórico más extenso de la variabilidad hidroclimática en las diversas estaciones del año y que sirva para generar información que contribuya a instrumentar un plan de aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en el Valle del Guadiana.

Las cronologías EW, LW y RW de *Pseudotsuga menziesii* en la cuenca alta del río Mezquital de los sitios Cuevecillas-Culebras y Sierra del Nayar, climáticamente tienen un comportamiento similar y al integrarse en una cronología común (CUC-SNA), incrementan su potencial para explicar

upper basin of the Mezquital river. This response exceeds the chronologies of *Pseudotsuga menziesii*, *Taxodium mucronatum* and other conifers, which normally respond to winter-spring precipitation (October or November of the previous year to April, May or June of the current year's growth) (Cleaveland *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2005; Cerano *et al.*, 2011; Irby *et al.*, 2013).

This situation is likely explained by the accumulation of photosynthates in the winter and spring required for radial growth of the tree at the beginning of the growing season (Pallardy, 2008). An additional explanation is that the rain of the winter period, being of low intensity, accumulates in the soil profile, where it remains available for the radial growth of the tree at the beginning of the growing season (Fritts, 1976).

The series late-wood responded significantly to cumulative rainfall from June to September, which is basically during the summer season where the maximum runoff occur and are finally captured in dams, of which the agricultural area Valle del Guadiana feeds. This series of late-wood also showed a significant correlation with the annual runoff volume of the hydrometric station "El Pueblito", which records the volume in the dam Guadalupe Victoria, irrigating an area of 9000 ha in the Valle del Guadiana.

Significant associations were detected between the chronologies of early, late-wood and ring-whole of *Pinus duranguensis*, seasonal rainfall and recorded drained volumes, note the high potential of the species for the development of paleoclimatic reconstructions, useful to analyse the hydroclimatic variability in several seasonal periods. In this study, due to the absence of long-lived trees, timing generated was of short extension (1945 to 2012); however, the dominance of this species in different stands of mixed forest in the region does not rule out the possibility of extending and developing a dendrochronological network with this species, from which it can generate a broader historical overview of hydroclimatic variability in different seasons of the year and that will generate information that contributes to implement a plan for the sustainable use of surface and groundwater in the water resources of Valle del Guadiana.

The chronologies EW, LW and RW of *Pseudotsuga menziesii* in the upper watershed of the Mezquital River of the sites Cuevecillas-Culebras and Sierra del Nayar climatically have similar behaviour and are integrated into

la variabilidad hidroclimática del sitio. Al igual que otras cronologías de la especie previamente desarrolladas en el norte y centro de México, esta serie mostró una respuesta a la precipitación estacional invierno-primavera, en particular durante el período enero-mayo. La ventaja de usar esta cronología, en lugar de la de *Pinus duranguensis* no radica en su mejor respuesta climática, sino más bien en su extensión, que cubre los últimos 243 años (1770-2012). La variación interanual observada en esta reconstrucción se reflejó en la presencia de períodos secos, detectados en las décadas de 1790 a 1800, 1820, 1860 a 1890, 1910, 1950, 1970 y 2000. Los períodos húmedos fueron menos frecuentes y se observan en las décadas de 1830, 1850, 1920, 1940, 1980 y en 2010.

Reconstrucciones dendroclimáticas invierno-primavera desarrolladas previamente en la región, señalan sequías prolongadas en décadas similares con ligeras variaciones respecto al año de inicio o terminación de un período seco o húmedo (Cleaveland *et al.*, 2003; González *et al.*, 2005; Arrocena, 2013). El período húmedo más sobresaliente, se observa para la década de 1830, donde se presentaron condiciones de alta precipitación por varios años consecutivos (Cleaveland *et al.*, 2003), situación que no sólo fue privativa de esta región, si nó que se extendió en gran parte del oeste de Norteamérica (Fye *et al.*, 2003).

La precipitación de verano es la más importante en esta región de México, debido a sus implicaciones en la agricultura de temporal y en la producción de escurrimientos para el llenado de presas con fines de irrigación; en este contexto, la reconstrucción de lluvia en el período julio-septiembre, que constituye alrededor de 85% de la precipitación anual en esta cuenca es de gran relevancia para el manejo del agua en el Valle del Guadiana. La reconstrucción de precipitación de verano indicó períodos secos en las décadas de 1810 a 1820, 1870, 1910, 1930, 1950, 1970 y 2000 y períodos húmedos en 1830, 1900, 1940, 1960 y 1980. A nivel anual, años con extrema sequía se presentaron en 1859, 1867, 1879, 1887, 1894, 1902, 1908-1911, 1916-1918, 1922-1929, 1951, 1976-1982, 1989, 1991, 1999, 2011 y 2012. Estos años secos repercutieron seriamente en los volúmenes registrados en la estación hidrométrica "El Pueblito" que inició su registro en 1953; de esta manera, el período 1976-1982 mostró valores mínimos, al igual que 1989, 1991, 1999, 2011 y 2012 (CONAGUA, 2009). A nivel período, los rangos de entrada han fluctuado en el tiempo; de esta manera, en el período 1962-1980 se registraron 136.0 Hm³ (hectómetros cúbicos), de 1980 a 1995, 143.9 Hm³ y de 1995 a 2010, 114.2 Hm³ (Gómez *et al.*, 2012), volúmenes que se relacionan con la variabilidad en precipitación para la

a common chronology (CUC-SNA), increasing their potential for explaining the hydroclimatic variability of the site. Just like other chronologies of the previously developed species in the northern and central Mexico, this series showed a response to seasonal winter-spring precipitation, particularly during the period from January to May. The advantage of using this chronology, rather than that of *Pinus duranguensis* do not consider its best climate response, but rather in extent, covering the last 243 years (1770-2012). The variation observed in this reconstruction was reflected in the presence of dry periods detected in the decades of 1790-1800, 1820, 1860-1890, 1910, 1950, 1970 and 2000, wet periods were less frequent and were observed in the decades 1830, 1850, 1920, 1940, 1980 and 2010.

Dendroclimatic reconstructions of winter-spring previously developed in the region, show prolonged droughts in decades similar with slight variations from the starting year or termination of a dry or wet period (Cleaveland *et al.*, 2003; González *et al.*, 2005; Arrocena, 2013). The outstanding wet period is noted for the 1830 where the conditions of high precipitation occurred for several consecutive years (Cleaveland *et al.*, 2003), a situation that was not only limited to this region, getting spread in much of western North America (Fye *et al.*, 2003).

Summer rainfall is the most important in this region of Mexico, because of its implications in seasonal agriculture and the production of runoff to fill the dams for irrigation purposes; in this context, the reconstruction of rainfall in the July-September period, which constitutes about 85% of the annual precipitation in this basin is of great importance for water management in the "Valle del Guadiana". The reconstruction of summer precipitation indicated dry periods in the decades of 1810-1820, 1870, 1910, 1930, 1950, 1970 and 2000 and, wet periods in 1830, 1900, 1940, 1960 and 1980. On an annual basis, with extreme drought in the years 1859, 1867, 1879, 1887, 1894, 1902, 1908-1911, 1916-1918, 1922-1929, 1951, 1976-1982, 1989, 1991, 1999, 2011 and 2012. These dry years seriously impacted in the recorded volumes in the hydrometric station "El Pueblito" which began its registration in 1953; This way, the period 1976-1982 showed minimal values, as 1989, 1991, 1999, 2011 and 2012 (CNA, 2009). At period level, input ranges have fluctuated over time; thus, in the period 1962-1980 were recorded 136.0 Hm³ (cubic hectometers), from 1980 to 1995, 143.9 Hm³ and from 1995-2010, 114.2 Hm³ (Gómez *et al.*, 2012), volumes

cuenca alta del río Mezquital, situación que se ha magnificado en las décadas recientes, probablemente influenciado por acciones antropogénicas (Stahle *et al.*, 2011).

El impacto histórico de las sequías en esta región no se ha documentado del todo, no obstante, debido a que muchos de los períodos secos catalogados de alta intensidad impactaron simultáneamente otras regiones del país, se puede pensar que el efecto pudiera haber sido similar; de esta manera, las sequías de las décadas de 1780-1790, 1800, 1820, 1890, 1910, 1950 y 1990 ocasionaron escasez de alimento, mortandad de ganado y epidemias en Chihuahua (Endfield y Fernández, 2006) y disminuyeron la superficie irrigada en la Comarca Lagunera (Villanueva *et al.*, 2005). La sequía de 1785-1786, conocida como el "Año del hambre" impactó severamente la producción de granos básicos en el centro de México y produjo hambrunas generalizadas (Florescano, 1980), pero también se presentó en el norte de México, probablemente con mayor intensidad, situación que se deduce por valores más bajos de los índices dendrocronológicos, comparados con otros para el centro de México.

Un alto porcentaje de la precipitación anual en la Sierra Madre Occidental ocurre durante la estación de verano, influenciada por el Monzón de Norteamérica o Monzón Mexicano (Gochis *et al.*, 2005); sin embargo, la variabilidad multianual o de baja frecuencia en esta región está influenciada por patrones atmosféricos de circulación general, caso concreto ENSO (Sathle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003), que durante su fase cálida, produce sequías intensas en el centro de México y húmedas en el norte, mientras que en su fase fría sucede lo contrario, este comportamiento dipolar ha sido determinado en estudios dendroclimáticos (Therrell *et al.*, 2002) y en estudios de frecuencia de incendios (Yocom *et al.*, 2010). La relación encontrada en este estudio entre los índices de madera temprana y SOI son de los más altos registrados en el norte de México, lo cual hace evidente, que la conexión extratropical de ENSO es de gran importancia en esta región, que dada su predictibilidad a corto plazo, puede contribuir a soportar planes de manejo de los recursos hídricos en esta región.

Conclusiones

La red dendrocronológica desarrollada para la cuenca alta del río Mezquital, la cual es la fuente productora de agua para el Valle del Guadiana, permitió determinar la variabilidad hidroclimática que ha caracterizado a esta cuenca en los

related with the variability in precipitation for the upper watershed of the Mezquital River, situation magnified in the recent decades, probably influenced by anthropogenic activities (Stahle *et al.*, 2011).

The historical impact of drought in this region has not been documented at all; however, because many of the dry periods of high intensity categorized simultaneously hit other regions of the country, it is considered that, the effect would have been similar; thus, the drought of the decades 1780-1790, 1800, 1820, 1890, 1910, 1950 and 1990 lead to shortage of food, livestock mortality and epidemics in Chihuahua (Endfield and Fernández, 2006), decreasing the surface irrigated in the lagoons region (Villanueva *et al.*, 2005). The drought of 1785-1786, known as the "Year of hunger" severely impacted the production of basic grains in the centre of Mexico and produced widespread of famine (Florescano, 1980), but also appeared in northern Mexico, probably more intense, a situation that is deduced by lower values of dendrochronological indices compared with others to central Mexico.

A high percentage of annual precipitation in the Sierra Madre Occidental occurs during the summer, influenced by the North American Monsoon or Mexican Monsoon (Gochis *et al.*, 2005); however, the multi-annual variability or low frequency in this region is influenced by atmospheric patterns of general circulation, ENSO case (Sathle *et al.*, 1998; Cleaveland *et al.*, 2003), even though, during the warm phase, produces intense droughts in central Mexico and humid in the north, while in its cool phase the opposite happens, this dipolar behaviour has been determined in dendroclimatic studies (Therrell *et al.*, 2002) and on studies of fire frequency (Yocom *et al.*, 2010). The relationship found in this study between the indices of early-wood and SOI are the highest recorded in northern Mexico, which makes clear that, the extratropical connection of ENSO is very important in this region, given its predictability at short term, can help to support management plans of water resources in this region.

Conclusions

The dendrochronological network developed for the upper watershed of the Mezquital river, which is the source of water producing for the Valle del Guadiana, revealed the hydroclimatic variability that has enacts this

últimos 240 años. Las series dendrocronológicas mostraron asociaciones significativas entre ellas, lo que indica que las especies arbóreas están sujetas a fenómenos climáticos comunes. Uno de los componentes de esta red, que fue la cronología de *Pinus durangensis*, indicó que tanto las series dendrocronológicas EW y RW respondieron significativamente a la precipitación estacional febrero-agosto; mientras que la LW a la precipitación y escurrimiento ocurrida en el verano. El factor limitante para una reconstrucción con esta especie fue la extensión de la cronología, que sólo cubrió los últimos 68 años (1945-2012). *Pinus durangensis* es una de las especies más aprovechadas y de mayor importancia económica en el norte de México y difícilmente se encuentran rodales con arbolado longevo, pero una exploración más detallada de los rodales donde se distribuye, permitirá desarrollar series extensas, que contribuyan a generar un análisis histórico más detallado de la variabilidad hidroclimática de las cuencas donde se desarrolla.

La generación de cronologías con especies climáticamente sensibles y de mayor longevidad como *Pseudotsuga menziesii*, permitió realizar una reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (enero-mayo) y de verano (julio-septiembre), esta última relacionada con lo escurrimientos que se almacenan en las presas, cuya agua se utiliza en el sector agropecuario. El entendimiento de la variabilidad hidroclimática en la cuenca alta del río mezquital resulta fundamental para las instituciones encargadas del manejo de agua en la región que demandan mayor conocimiento para integrar un plan de manejo sustentable del agua en el Valle del Guadina.

Esta variabilidad hidroclimática a nivel anual y multianual tiene una alta influencia de fenómenos atmosféricos circulatorios, como ENSO, que mostró una de las señales más intensas aun detectadas en el norte México. El estudio detallado del impacto de este fenómeno en la región, mediante la construcción de una red dendrocronológica más completa, es importante para mejorar acciones de predicción de disponibilidad hídrica en el Valle del Guadiana, ya que actualmente con los avances tecnológicos disponibles es posible determinar el comportamiento de este fenómeno circulatorio con antelación.

Agradecimientos

La presente investigación se apoyo con fondos fiscales del INIFAP a través del proyecto “Efecto de la deforestación sobre el cambio climático local en bosques

basin during the last 240 years. The dendrochronological series showed significant associations between them, indicating that tree species are subject to common weather events. One of the components of this network, which is the chronology of *Pinus durangensis* indicated that, the dendrochronological series EW and RW responded significantly to the seasonal rainfall from February to August; while the LW to the precipitation and runoff occurred in the summer.

The limiting factor for reconstruction of this species was the extension of the chronology, which only covered the last 68 years (1945-2012). *Pinus durangensis* is one of the most exploited species of major economic importance in northern Mexico and finding long-lived stands of trees is quite difficult, but a closer exploration of the stands where it is distributed will allow to develop extensive series, helping to generate a more detailed historical analysis of the hydroclimatic variability of watersheds where it develops.

The generation of chronologies with climatically sensitive species and with higher longevity, such as *Pseudotsuga menziesii* allowed making a reconstruction of the winter-spring precipitation (January-May) and summer (July-September), the latter related to the runoffs stored in the dams, water used in the agriculture and livestock sector. The understanding of the hydroclimatic variability in the upper basin of the Mezquital river is essential for the institutions responsible for water management in the region that require more expertise to integrate a plan for sustainable water management in the Valle del Guadiana.

This hydroclimatic variability at annual and multi-annual level has a high influence of circulatory atmospheric phenomena, such as ENSO, which showed one of the strongest signals detected in northern Mexico so far. The detailed study of the impact of this phenomenon in the region, through the construction of a more complete dendrochronological network is important for improving actions for predicting water availability in the Valle del Guadiana, since with the current technological advances available is possible determining the behaviour of the circulatory phenomenon in advance.

End of the English version



de coníferas". Núm. SINASO: 1434132002. Asimismo, con el financiamiento del Instituto Interamericano para la investigación del cambio climático (IAI) a través del proyecto CRN # 2047, y el aval de US/Nacional Science Foundation (Grant GEO-0452325).

Literatura consultada

- Allan, R.; Lindesay, J. and Parker, D. 1996. El Niño/Southern oscillation & climate variability. CSIRO Publishing, atmospheric research, Australian National University, United Kingdom, Meteorological Office. 408 p.
- Arrocena, L. J. C. 2013. Reconstrucción dendrocronológica de la precipitación estacional invierno-primavera para la Sierra Sur de Durango. Tesis profesional de Ing. Agrónomo en Sistemas Agrícolas. Unidad Regional de Zonas Áridas, Universidad Autónoma de Chapingo. Bermejillo, Durango. 85 p.
- Cerano-Pares, J.; Villanueva-D. J. J.; Valdéz-Cepeda, J. G.; Arreola-Ávila, G. y Constante-García, V. 2011. El Niño oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Rev. Chapingo* 17:207-215.
- Cerano, P. J.; Villanueva, D. J.; Valdez, C. R. D.; Constante, G. V.; González B. J. L.; Estrada, A. J. 2012. Precipitación reconstruida para la parte alta de la cuenca del río Nazas, Durango. *Rev. Mex. Cienc. Fores.* 3(10):7-23.
- Chávez, S. M. J. 2010. Evaluación del riesgo por la presencia de contaminantes en agua destinada al uso y consume humano del acuífero del Valle de Guadiana. Tesis de Maestro en Ciencias en Gestión Ambiental. Instituto Politécnico Nacional. CIIDIR, Durango. Victoria de Durango, Durango. 104 p.
- Cleaveland, M. K.; Stahle, D. W.; Therrell, M. D.; Villanueva, D. J. and Burns, B. T. 2003. Tree-ring reconstructed precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59:369-388.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2009. Programa hídrico visión 2030 del estado de Durango. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Durango, Durango. 153 p.
- Constante García, V.; Villanueva, D. J.; Cerano, P. J. y Estrada, A. J. 2010. Parámetros para definir el potencial dendrocronológico. Folleto técnico Núm. 19. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango. 40 p.
- Cook, E. R. and Peters, K. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin.* 41:45-53.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin.* 47:37-59.
- Cook, E. R. and Holmes, R. H. 1986. Guide for computer program ARSTAN. Laboratory of tree ring research. The University of Arizona. Tucson, AZ. 9 p.
- Endfield, G. H. and Fernández-Tejeda, I. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climatic Change.* 75:391-419.
- Florescano, E. 1980. Una historia olvidada: la sequía en México. *Rev. Nexos* 32:9-13.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree rings and climate.* London Academic Press. 565 p.
- Fritts, H. C. 1991. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data: a diagnostic analysis.* The University of Arizona Press. Tucson, Arizona, USA. 286 p.
- Fye, F. K.; Stahle, D. W. and Cook, E. E. 2003. Paleoclimatic analogs to twentieth-century moisture regime across the United States. *American Meteorological Society.* DOI:10.175/BAMS-84-7-901. 901-909 pp.
- Gochis, D. J.; Brito-Castillo, L. and Shuttleworth, W. J. 2005. Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. *J. Hydrol.* 316:53-70.
- Gómez Almaráz, R.; Escobedo, Q. H.; Barrios, O. J. E.; Del Conde, J. P.; Hernández, R. J. O.; Luna, R. A. A. y De la Cruz, G. R. 2012. Evaluación hidrológica-hidráulica del río Tunal y de su potencial para efectos ambientales. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Resumen in Extenso. Acapulco, Guerrero. 8 p.
- González-Elizondo, M.; Jurado, J. E.; Navar, M.; González-Elizondo, S.; Villanueva, J.; Aguirre, O. and Jiménez, J. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681-2001 rain reconstruction. *Forest Ecol. Management* 213:39-53.
- González-Elizondo, S. 1997. Upper mezquital river región, Sierra Madre Occidental, México. *In:* Davis, S. D.; Heywood V. H.; Herrera-MacBryde, O.; Villa-Lobos, J. and Hamilton, A. C. (Eds.). *Centres of plant diversity. The world wildlife fund for nature (WWF) and IUCN- The World Cons. Union.* 87 p.
- Griffin, D.; Meko, D. M.; Touchan, R.; Leavitt, S. W.; Woodhouse, C. A. 2011. Latewood chronology development for summer-moisture reconstruction of the US Southwest. *Tree-Ring Res.* 67(2):87-101.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Res.* 57(2):205-221.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43:69-78.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2012. *Perspectivas estadísticas de Durango: México, D. F.* 95 p.
- Irby, C. M.; Fulé, P. Z.; Yocom, L. L. and Villanueva-Díaz, J. 2013. Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques.* 19(1):93-105.
- Méndez, M. and Magaña, V. 2010. Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *J. Climate.* 23:1175-1188.
- Pallardy, S. G. 2008. *Physiology of woody plants.* 3th edition. Academic Press, San Diego, Calif., USA. 454 p.
- Robinson, W. J. and Evans, R. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin.* 40:59-64.
- Ropelewski, C. F. and Halpert, M. S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with El Niño/Southern Oscillation. *Monthly weather review* 115:1606-1626.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2009. *Ordenamiento ecológico del estado de Durango.* Gobierno del estado de Durango. Durango. 44 p.
- Smartwood, L. 2002. *Resumen público de certificación de Cuevecillas y Culebras S.P.R. de R.L. México, D.F.* www.rainforest-alliance.org.
- Speers, J. H. 2010. *Fundamentals of tree-ring research.* University of Arizona Press. Tucson, A.Z. 333 p.

- Stahle, D. W.; Dárrigo, R. D.; Krusic, P. J.; Cleaveland, M. K.; Cook, E. R.; Allan, R. J.; Cole, J. E.; Dunbar, R. B.; Therrell, M. D.; Guy, D. A.; Moore, M. D.; Stokes, M. A.; Burns, B. T.; Villanueva-Díaz, J. and Thompson, L. G. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the Am. Meteorol. Soc.* 70(10):2137-2152.
- Stahle, D. W.; Villanueva-Díaz, J.; Burnette, D. J.; Cerano-Paredes, J.; Heim, Jr. R. R.; Fye, F. K.; Acuna-Soto, R.; Therrell, M. D.; Cleaveland, M. K. and Stahle, D. K. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters* 38. L05703.
- Stokes, M. A. and Smiley, T. L. 1968. *An introduction to tree-ring dating.* The University of Chicago Press. 73 p.
- Therrell, M. D.; Stahle, D. W.; Cleaveland, M. K. and Villanueva-Díaz, J. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *J. Geophysical Res.* 107(D14):6-1-6-7.
- Villanueva, D. J.; Luckman, B. H.; Stahle, D. W.; Therrell, M. D.; Cleaveland, J. M. K.; Cerano-Paredes, J.; Gutiérrez-García, G.; Estrada-Avalos, J. and Jasso-Ibarra, R. 2005. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrocronologia.* 22(3):215-223.
- Villanueva Díaz, J.; Peter, Z.; Fulé, J.; Cerano, P.; Estrada, A. J. y Sánchez, C. I. 2009. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Ciencia Forestal en México.* 34(105):37-69.
- Yocom, L. L.; Fulé, P. Z.; Brown, P. M.; Cerano, J.; Villanueva-Díaz, J.; Falk, D. A. and Cornejo-Oviedo, E. 2010. El Niño Southern Oscillation effect on fire regime in northeastern Mexico has changed over time. *Ecology.* 9(16):1660-1671.
- Wright, P. B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature* 277:371-374.