

VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA RECONSTRUIDA CON ANILLOS DE ÁRBOLES PARA LA CUENCA LERMA CHAPALA EN GUANAJUATO, MÉXICO

• José Villanueva-Díaz • Julián Cerano-Paredes • Juan Estrada-Ávalos •
• Vicenta Constante-García •

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

• Eunice N. Cortés-Barrera •

Universidad Autónoma de Tlaxcala, México

Resumen

El conocimiento histórico del clima es básico para entender sus variaciones y tendencias en el tiempo. En este estudio se desarrollaron seis cronologías de anillos de árboles, con una extensión cercana a 250 años, en el área de Guanajuato, Jalisco y Querétaro, dentro de la cuenca Lerma Chapala. Se utilizaron dos especies para este propósito: *Taxodium mucronatum* y *Pinus cembroides*. Se desarrolló una reconstrucción estacional de precipitación invierno-primavera (enero-mayo) del periodo 1770-2007, para la región centro-sur de Guanajuato; mientras que para el noroeste del estado, se generaron dos reconstrucciones de precipitación estacional, una para el periodo marzo-septiembre y la otra anual (enero-diciembre), con una extensión de 208 años (1790-2007) y 158 años (1850-2007), respectivamente. En las reconstrucciones estuvieron presentes eventos hidroclimáticos severos reportados en archivos históricos por producir carestía de alimentos, hambrunas, brotes epidémicos, migraciones y otras calamidades, como las sequías de las décadas de 1860, 1890, 1920, 1950, 1970 y 1990, lo que corrobora la veracidad de las mismas. Un análisis del efecto histórico de ENSO en la disponibilidad de lluvia, índice de ancho de anillos y producción de cultivos de temporal, mostró alta inconsistencia en su impacto y sólo aquellos eventos de alta intensidad tuvieron influencia en la variabilidad de la precipitación. Dicho comportamiento enfatiza la necesidad de investigar con más detalle otras variables climáticas que, aunadas al fenómeno ENSO, pudieran explicar la variabilidad hidroclimática en esta región.

Palabras clave: Guanajuato, Lerma Chapala, dendrocronología, índice de ancho de anillo, precipitación reconstruida, variabilidad hidroclimática, ENSO, sequías.

Introducción

El estado de Guanajuato, en México, debe su origen a la riqueza mineral de su territorio, factor fundamental que históricamente contribuyó al establecimiento de importantes asentamientos humanos, en particular durante la época colonial, los cuales, con el devenir del tiempo, se transformaron en grandes núcleos de población con altas demandas de bienes y servicios, entre ellos los recursos hídricos, para fines de producción agrícola e industrial, y para consumo humano.

Los limitados recursos hídricos con que cuenta el estado de Guanajuato y el incremento poblacional e industrial que ha experimentado en las últimas décadas, ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos existentes, lo que ha originado serios problemas de abastecimiento de agua, decremento en su calidad, presencia de metales pesados y asentamientos de suelo, entre otros problemas colaterales (Conagua, 2007).

El problema hídrico de Guanajuato no se puede entender si no se tiene un conocimiento claro de la problemática ambiental de la cuenca

Lerma Chapala, que integra parte de los estados de Guanajuato, México, Jalisco, Michoacán y Querétaro. Esta cuenca es una de las más extensas, pero con más aprovechamiento y degradación de sus recursos hídricos en el país, ya que en ella se concentra el 15.6% de la población nacional (INEGI, 1998; Conagua, 2007). Durante los últimos cincuenta años, la cuenca Lerma Chapala ha experimentado una transformación dinámica debido a la creación de distritos de riego, que utilizan más del 85% del volumen de agua disponible en esta región, y de la integración de un eje industrial que vincula sus poblaciones con los afluentes y a lo largo del cauce principal del río Lerma, para unir finalmente a las ciudades de México y de Guadalajara, dos de los polos de desarrollo industrial de mayor auge económico en el país.

Esta política de desarrollo se fincó en un aprovechamiento intensivo de sus recursos naturales, lo que propició, a través del tiempo, el grado de deterioro que presenta en la actualidad esta cuenca. Prueba de lo anterior es que en el periodo 1976-2000, las selvas decrecieron en una superficie de 75 400 ha y los bosques en 115 100 ha, y se incrementó el área de cultivo, pastizales inducidos, bosques secundarios y áreas urbanas (INE, 2003). Asimismo, se produjo una reducción de 9 700 ha en cuerpos de agua que, aunado a problemas de erosión hídrica en 27% de la superficie de las cuencas, impactó de forma severa el ciclo hidrológico, al reducir la infiltración, favorecer el escurrimiento superficial y disminuir la fertilidad de los suelos.

En este contexto, el conocimiento histórico de la variabilidad hidroclimática en Guanajuato es fundamental para determinar su fluctuación en el tiempo, analizar eventos de alta y baja frecuencia, y sus posibles tendencias a corto, mediano y largo plazos. Un estudio de la variabilidad del clima fundamentado tan sólo en registros de estaciones meteorológicas proporcionará una idea distorsionada de la fluctuación climática en el tiempo debido a que estos registros climáticos tienen la limitante de su corta extensión —en general no mayor de

setenta años— calidad dudosa, incongruencia en sus registros y presencia de datos perdidos, situación que limita seriamente un análisis confiable de su variabilidad histórica (Stahle *et al.*, 2011).

La forma indirecta para analizar la variabilidad hidroclimática en el tiempo es a través del uso de fuentes “proxy”, también conocidos como métodos indirectos o de inferencia, con los cuales se realizan estimaciones de las condiciones climáticas pasadas. Una de estas fuentes la constituyen los anillos de árboles o bandas de crecimiento anual, que a diferencia de otras fuentes indirectas (núcleos de hielo, depósitos coralinos, sedimentos de lagos, etcétera) son de alta resolución, ya que los crecimientos son fechados exactamente al año de su formación (Douglass, 1947; Bradley, 1999).

De esta manera, el objetivo general del presente proyecto fue analizar la variabilidad hidroclimática histórica que ha caracterizado al estado de Guanajuato como parte de la cuenca Lerma Chapala. Para lograr lo anterior, los objetivos específicos fueron: a) integración de una red de cronologías de anillos de árboles con especies de bosques mixtos y de ecosistemas de galería, para generar información paleoclimática de utilidad en el conocimiento de la variabilidad hidroclimática histórica en la parte alta y baja de las cuencas, que en el estado de Guanajuato son parte de la cuenca Lerma Chapala; b) análisis detallado de eventos climáticos históricos de alta y baja frecuencia, y su variabilidad en el tiempo; c) análisis de las sequías, y su impacto social y económico en el área de estudio; d) análisis del impacto histórico de patrones de circulación atmosférica global, caso específico de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y su influencia en la precipitación para la región.

Metodología

Se llevaron a cabo recorridos exploratorios en los estados de Guanajuato, Jalisco y Querétaro,

a fin de detectar especies potenciales con fines dendrocronológicos. La palabra dendrocronología procede de las raíces griegas *dendro* (árbol), *cronos* (tiempo) y *logos* (estudio de). La dendrocronología es un método científico de fechado que determina con exactitud el año de formación de un crecimiento anual de una especie arbórea mediante un análisis comparativo de patrones de anillos de crecimiento de muestras o incrementos radiales obtenidos en un área relativamente homogénea (Douglass, 1914). Debido a que el grosor de los crecimientos anuales de coníferas y de otras latifoliadas (de hoja ancha) está gobernado por un factor limitante, que en el suroeste de los Estados Unidos de América, y norte y centro de México normalmente es la precipitación, el ancho de estos anillos estará explicado en un porcentaje significativo por el volumen de precipitación anual o estacional ocurrido previo o durante la estación de crecimiento del árbol; de esta manera, será factible establecer una relación entre ambas variables y realizar una reconstrucción en la longitud total de la serie de tiempo dendrocronológica desarrollada, que en México se puede extender hasta por más de mil años (Villanueva et al., 2007; Stahle et al., 2012) y en algunos otros países por varios milenios (Cook et al., 2004).

Con base en este recorrido, se seleccionaron sitios de muestreo en rodales de pino piñonero (*Pinus cembroides* Zucc.) ubicados en la parte norte de Guanajuato, y bosques de galería con sabino o ahuehuate (*Taxodium mucronatum* Ten.) en las regiones centro-sur de Guanajuato, parte oriental de Jalisco y región suroeste de Querétaro.

Las virutas, gusanos, núcleos de crecimiento o incrementos de las diversas colectas realizadas se procesaron en el Laboratorio de Dendrocronología del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), acorde con métodos dendrocronológicos estándar (Stokes y Smiley, 1968). La fecha exacta de los anillos de crecimiento se corroboró con el programa de calidad COFECHA. Este programa, a través

de los archivos de medición de cada serie de crecimiento, compara estadísticamente el fechado de cada muestra con las restantes, al correlacionar de manera sucesiva segmentos de cincuenta años con traslape entre periodos de 25 años. Mediante este procedimiento, el programa determina los segmentos con problema potenciales de fechado, de tal manera que al ser corregidos y al correr de nueva cuenta el programa conduzcan a un incremento en la correlación y se corrobore el fechado exacto de cada crecimiento anual (Holmes, 1983).

Posterior al fechado de las series de crecimiento, uno de los problemas para generar series dendrocronológicas con la mayor señal climática posible es la remoción del crecimiento atribuido a la edad y a un área de fuste (tronco) cada vez mayor, proceso conocido como estandarización, cuya función es transformar las series de ancho de anillos en series estacionarias, adimensionales y comparables entre sí. Estas series o índices tendrán una media de "1.0" y varianza relativamente constante (Fritts, 1976).

Uno de los programas de mayor uso para la estandarización de series de crecimiento es el programa ARSTAN (Cook, 1987). La función de este programa es producir cronologías de series de anillos de crecimiento a través del proceso conocido como "detrending" o eliminación de tendencias, metodología que implica que a las series de crecimiento se les fijen modelos matemáticos, como el de una curva exponencial negativa, curva flexible ("spline"), línea recta con tendencia positiva, negativa, horizontal, etcétera, para finalmente derivar en índices dendrocronológicos, que resultan de la división entre el valor de medición y el derivado de la curva ajustada; pero en el caso de utilizar logaritmos para estabilizar la varianza, los índices se obtienen mediante sustracción (Delgado, 2000).

Posterior a que se generaron las series dendrocronológicas, se les ajustó una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia, en particular, periodos húmedos o secos (Cook y Peters, 1981).

Los índices dendrocronológicos se compararon entre sitios para el periodo común 1917-2000 y para subperiodos de veinte años. Estas comparaciones permitieron analizar semejanzas y discrepancias entre cronologías, y su comportamiento en el tiempo. Las cronologías con una respuesta climática común, determinada con base en correlaciones múltiples y componentes principales, se integraron en cronologías regionales, las cuales en general son más robustas en términos de tamaño de muestra (número de incrementos o radios que entran en el análisis) y sensibilidad climática, y pueden ser más representativas de la variabilidad hidroclimática que caracteriza a una región, cuenca hidrológica, etcétera (Fritts, 1976).

Con las series de tiempo producidas e información climática instrumental, se generaron reconstrucciones históricas de precipitación, con las que se analizó la variabilidad hidroclimática regional, su comportamiento histórico y sus tendencias a largo plazo, información que es importante para el manejo y planeación actual y futura del uso del agua en la región.

La variabilidad hidroclimática detectada se correlacionó con índices de patrones de circulación atmosférica global y se determinó la influencia de los mismos en la región. Esta información es de gran relevancia científica, ya que actualmente el fenómeno ENSO tiene cierta predictibilidad debido a que en el Pacífico Ecuatorial se realiza hoy día el monitoreo continuo de este sistema meteorológico mediante boyas e imágenes de satélite (<http://www.pmel.noaa.gov/tao/>), con lo que es posible determinar el grado de afectación de dicho fenómeno en la región; situación que constituye una ventaja para fines de planeación del uso de los recursos hídricos, en particular en áreas con temporal deficiente, donde el porcentaje de siniestralidad de los cultivos establecidos para el periodo 1980-2005 fue cercano a 100 000 ha, lo que representa un 27% de la superficie anualmente cultivada en el estado de Guanajuato (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 2006).

Los periodos secos y húmedos detectados en las reconstrucciones se cotejaron con datos históricos documentados, así como con periodos secos y húmedos observados en diversas reconstrucciones dendroclimáticas desarrolladas para otras regiones del país. Esta aseveración se fundamentó en el hecho de que fenómenos climáticos de gran intensidad afectan amplias áreas de México e inclusive pueden traspasar fronteras (Fritts, 1991; Cook et al., 2007; Seager et al., 2009; Stahle et al., 2009). Conocer la cobertura de estos eventos es un indicio de la magnitud, y del impacto social y económico que pueden ejercer en la sociedad.

Resultados y discusión

Red de cronologías

Se generó un total de siete cronologías, de las cuales cinco fueron de *Taxodium mucronatum* y dos de *Pinus cembroides* (cuadro 1, figura 1). Las cronologías no superaron los 250 años de extensión, pero su longitud fue suficiente como para analizar en dicho periodo la variabilidad hidroclimática, presencia de tendencias e impacto de patrones circulatorios.

El comportamiento de las cronologías de anillo total, sólo para el estado de Guanajuato, tuvo similitudes y discrepancias para ciertos periodos, lo cual es indicativo de que responde a condiciones climáticas que afectan a toda una región y también a condiciones climáticas propias del sitio donde se desarrollan, situación a la que se atribuyen las diferencias observadas en crecimiento (figura 2).

Al analizar el periodo común (1880-2000) de estas series de tiempo, se determinó que las cronologías de ahuehuete son las que mejor correlacionan, en particular la de Manuel Doblado con Jerécuaro ($r = 0.215$, $n = 121$, $p < 0.01$), así como las de Chamácuaro y Jerécuaro ($r = 0.28$, $n = 121$, $p < 0.001$); esta relación se incrementó al comparar subperiodos de veinte años, en particular para los últimos cincuenta años, con valores de correlación superiores a 0.7 ($p < 0.0004$), situación atribuida a la interven-

Cuadro 1. Sitios de colecta para el desarrollo de series dendrocronológicas en Guanajuato y estados circunvecinos.

Estado	Nombre del sitio	Clave	Coordenadas	Elevación (m)	Longitud de la cronología	Tipo de cronología ¹	Especie ²
Guanajuato	Manuel Doblado	MDO	20.65° N, 101.88° WG	1 735	1770-2007	RW	TM
	Ibarra	IBA	21.41° N 101.52° WG	2 300	1785-2007	RW	PC
	Jerécuaro	JER	20.14° N, 100.52° WG	1 950	1880-2007	RW	TM
	Paloma	PAL	21.40° N, 101.12° WG	2 300	1850-2007	RW	PC
	Chamácuaro	CHA	21.35° N 100.88° WG	1 816	1860-2000	RW	TM
Jalisco	Atotonilco	ATO	20.57° N, 102.45° WG	1 650	1826-2006	RW	TM
Querétaro	Barranca de Cocheros	BCO	20.38° N, 100.10° WG	2 050	1767-2007	RW	TM

¹RW: ancho de anillo total.

²TM: *Taxodium mucronatum*; PC: *Pinus cembroides*.

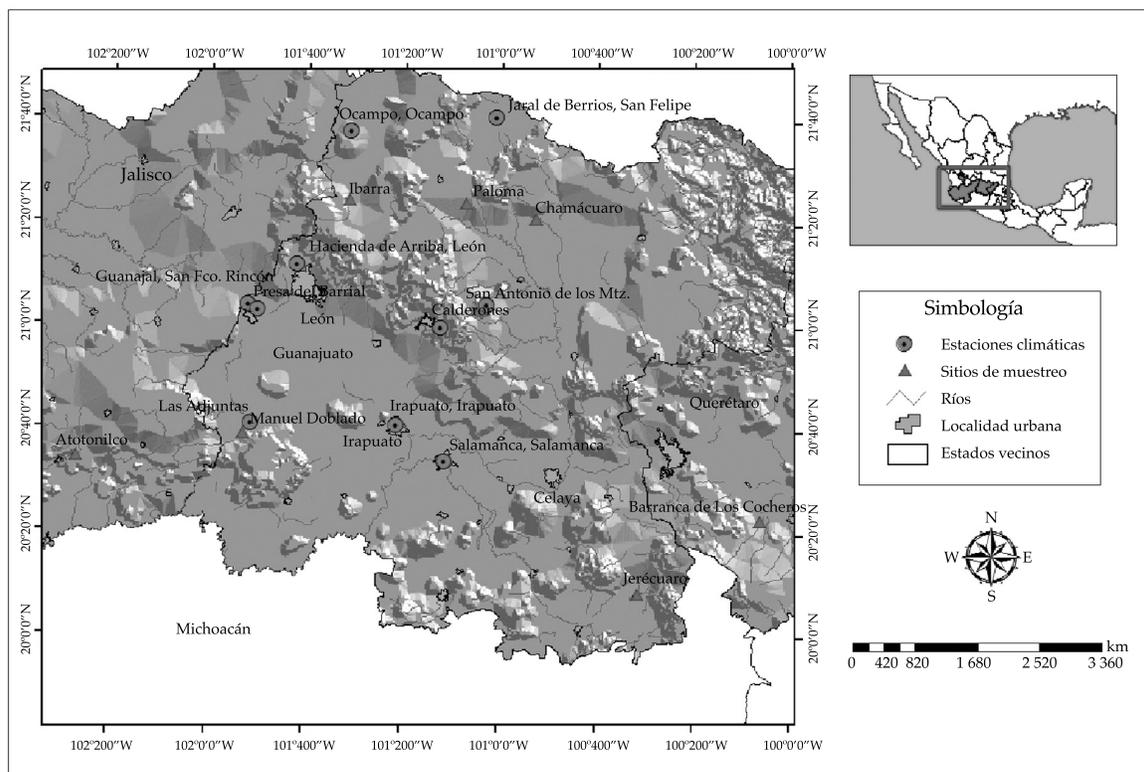


Figura 1. Distribución geográfica de cronologías de anillos de árboles desarrolladas en Guanajuato, Jalisco y Querétaro.

ción de un mayor número de muestras en la generación de los índices dendrocronológicos. Análisis de correlación y de componentes

principales entre las cronologías Manuel Doblado, Jerécuaro y Chamácuaro indicaron una respuesta climática similar, por lo cual se

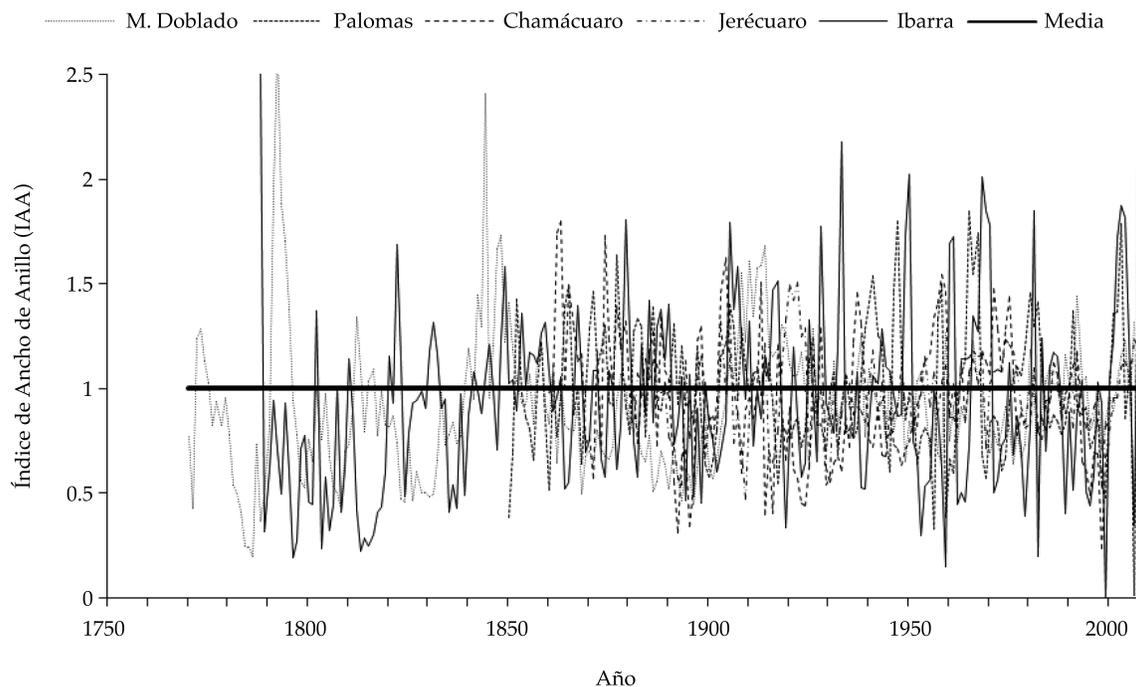


Figura 2. Comparación gráfica de los índices anuales de cronologías de anillo total desarrolladas sólo para el estado de Guanajuato. Se observa que para ciertos periodos el crecimiento fue similar entre las cronologías.

trabajó en integrar estas series y correrlas con los programas COFECHA y ARSTAN, para así generar una cronología compuesta y después una reconstrucción de precipitación regional de los últimos 238 años (1770-2007) para el centro-sur del estado de Guanajuato.

Las cronologías de pino piñonero, a pesar de estar geográficamente cercanas, no mostraron una correlación significativa, posiblemente por ubicarse en cuencas hidrográficas distintas y estar sujetas a condiciones de microclima específicas para los sitios, o bien a disturbios antropogénicos que pudieron haber influido en el crecimiento. Una respuesta similar ocurrió para las cronologías de *Taxodium mucronatum* procedentes de Atotonilco, en Jalisco, y Barranca de Cocheros, en Querétaro, por lo que estas dos cronologías se descartaron para análisis climáticos posteriores.

Reconstrucciones de precipitación

Con un análisis de correlación entre los índices dendrocronológicos de ahuehuete procedentes de la integración de los sitios Manuel Doblado, Jerécuaro y Chamácuaro, y datos de precipitación regional promedio de diez estaciones climáticas del estado de Guanajuato para el periodo de 1959 a 2004, se determinó que el periodo del año en que existe una asociación positiva entre crecimiento de los árboles y precipitación comprende los meses de enero a agosto ($r = 0.4, n = 78$) (figura 3).

El periodo con influencia significativa, por mostrar una mayor correlación entre ambas variables ($r = 0.75, p < 0.05$), se acotó sólo al periodo estacional de enero a mayo (figura 4).

Para generar el modelo de reconstrucción, el periodo total de datos disponibles (1959-

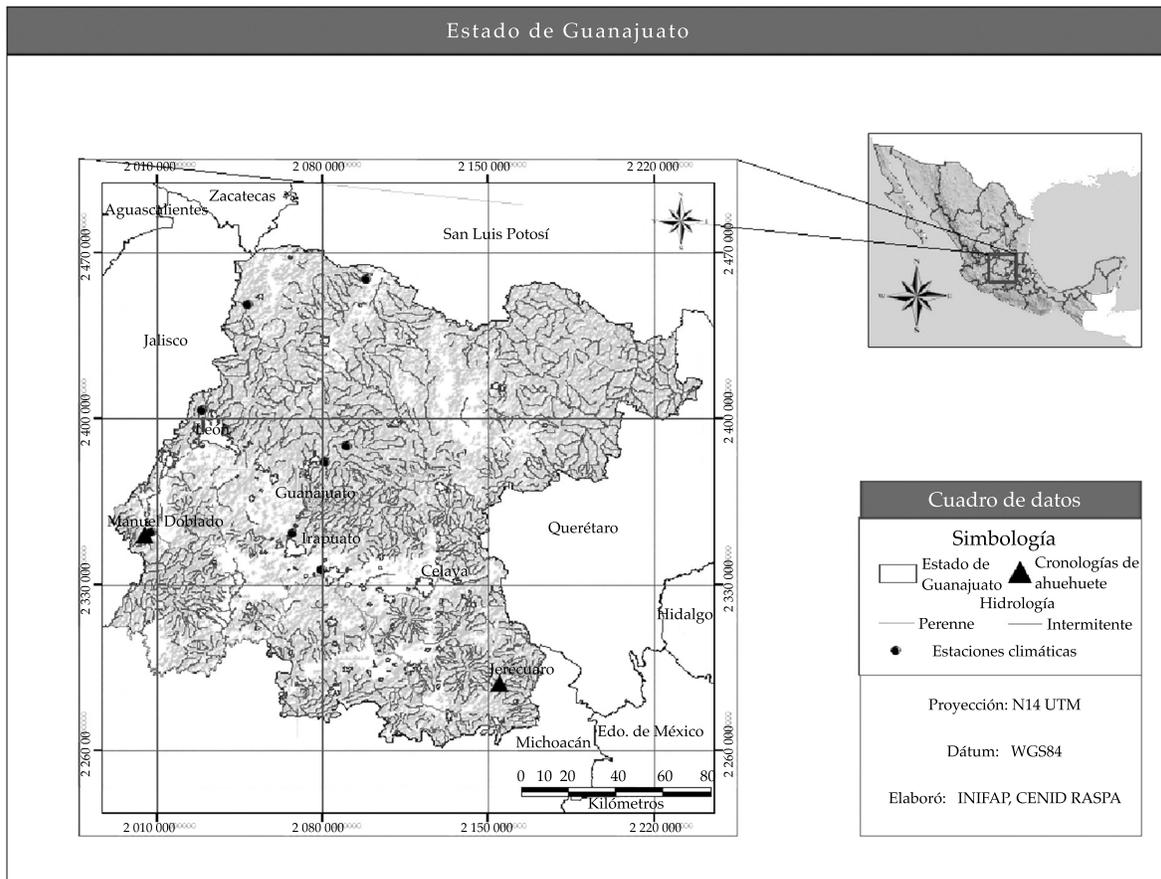


Figura 3. Ubicación geográfica de las cronologías de ahuehuete y de las estaciones climáticas utilizadas para generar una base de datos de precipitación regional para la zona centro-sur de Guanajuato.

2004) se dividió en dos subperiodos, uno para calibración (1959-1982) y otro para verificación (1983-2004). Los resultados obtenidos determinaron que los índices dendrocronológicos explican un 54% ($r^2 = 0.54$, $p < 0.0001$) de la variabilidad de la precipitación para el periodo de calibración, mientras que para el periodo de verificación fue de 49% ($r^2 = 0.49$, $p < 0.0001$) (figura 5).

Dado que ambos subperiodos se correlacionaron de forma significativa con los índices de anillo total, se utilizó el periodo completo de datos de precipitación disponibles (1959-2004, $n = 46$) para generar el modelo de reconstrucción, el cual explica el 59% de la variación ($r^2 = 0.59$, $p < 0.0000001$) de esta variable climática (cuadro 2).

Por otra parte, el análisis de regresión entre los índices de ancho de anillo anual y la precipitación estacional para el periodo total de datos climáticos disponibles produjo un modelo lineal significativo, por lo que se consideró adecuado para propósitos de reconstrucción (cuadro 3). El modelo generado fue el siguiente:

$$Y_t = -144.71 + 229.24 * X_t$$

Donde Y_t es el valor de la precipitación reconstruida para el periodo enero-mayo de un año específico (mm) y X_t es el índice de anillo total para el año reconstruido.

La reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (enero-mayo) para la región

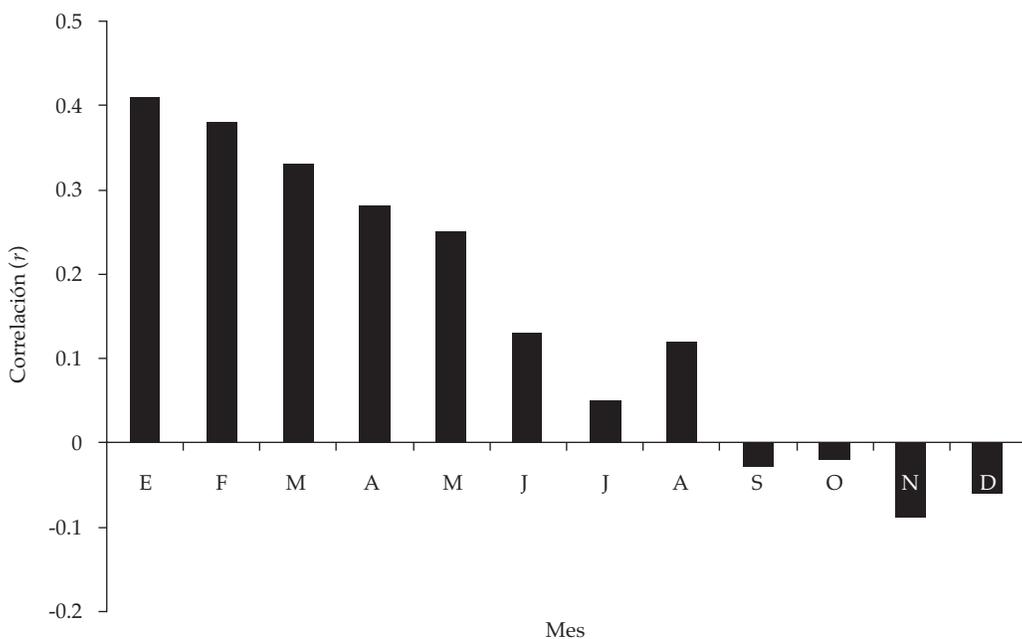


Figura 4. Correlación entre los índices dendrocronológicos de ancho de anillo de ahuehuate, representativos de los sitios Manuel Doblado, Jerécuaro y Chamácuaro, Guanajuato, y la precipitación promedio regional de diez estaciones climáticas.

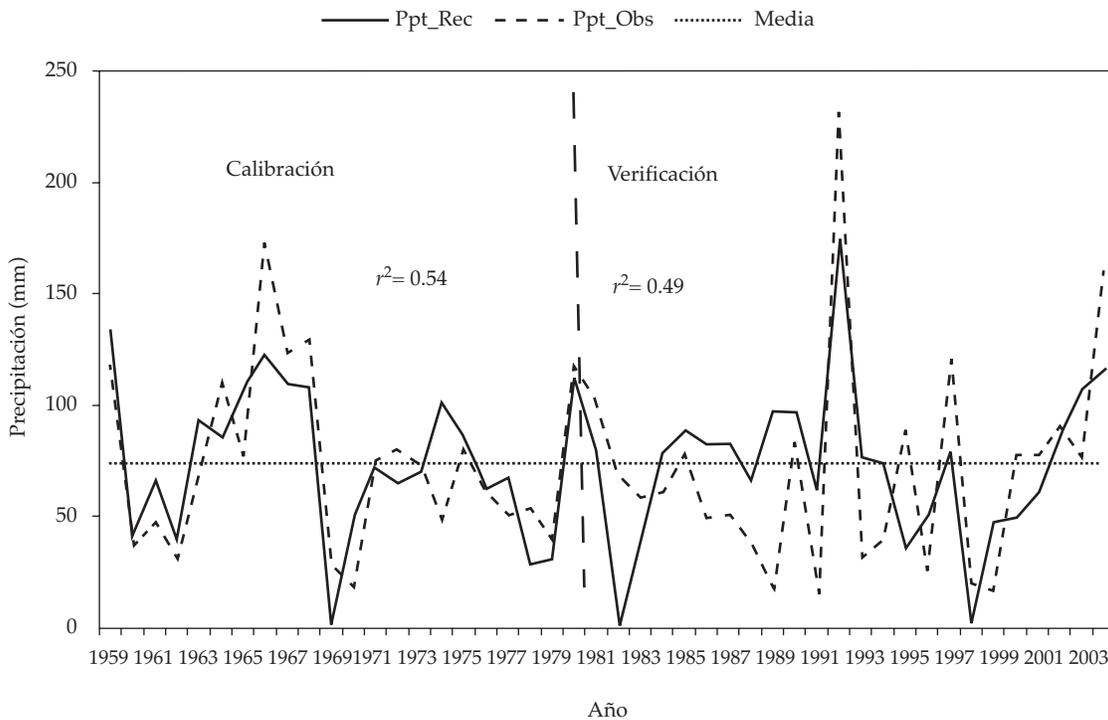


Figura 5. Asociación entre la cronología regional de ahuehuate y datos de la precipitación estacional enero-mayo. El periodo de registros disponibles se dividió en dos subperiodos para calibración y verificación.

Cuadro 2. Análisis de regresión entre los índices dendrocronológicos de ahuehuete y la precipitación acumulada estacional enero-mayo del periodo 1959-2004.

Periodo	R ²	Coefficientes	Error estándar	Prueba de "t"	Probabilidad
1959-2004	0.59	-144.71	29.08	-4.97	0.000013
		229.24	30.18	7.59	0.000000

Cuadro 3. Análisis de varianza de la regresión entre los índices dendrocronológicos de ahuehuete y la precipitación acumulada estacional enero-mayo del periodo 1959-2004.

Periodo	Suma de cuadrados	df	Cuadrados medios	f	P
Regresión	51 663.45	1	51 663.45	57.69	0.000000
Residual	35 821.22	40	895.53		
Total	87 484.67				

centro-sur del estado de Guanajuato comprende 238 años, que se extiende de 1770 a 2007, y muestra la presencia de variabilidad de alta y baja frecuencia de los patrones de precipitación estacional para esta región (figura 6).

La precipitación de verano es la que tiene mayor relevancia socioeconómica en Guanajuato (INEGI, 1998); sin embargo, en términos de crecimiento de especies de bosques de galería como el ahuehuete, la precipitación invierno-primavera, y para este caso la acumulada en el periodo enero-mayo, también es muy importante para su crecimiento, recarga de acuíferos y productividad de los ecosistemas en general (Villanueva et al., 2007). Asimismo, la precipitación ocurrida en este periodo, no obstante que constituye un bajo porcentaje del ocurrido en el año (menos del 20% del total anual), es indicativa en otras partes del país, en particular en el norte, de la influencia de patrones circulatorios, en especial la fase cálida de El Niño y presencia de nortes que pueden afectar el clima en esta parte del país (Magaña et al., 1999).

Una segunda reconstrucción de precipitación se desarrolló para el noroeste de Guanajuato, con una cronología de anillo total de pino piñonero para el sitio Ibarra en el municipio de Ocampo, Guanajuato. Para comparar esta cronología con datos

climáticos, se conformó una estación regional de precipitación compuesta por las estaciones climáticas Laborcita, Comanjilla, El Conejo y El Copal (figura 7).

La versión estándar de la cronología de anillo total respondió de manera significativa ($r = 0.7$, $p < 0.0001$, $n = 228$) a la precipitación acumulada de la estación primavera-verano (marzo-septiembre) (figura 8).

El proceso de calibración entre los índices dendrocronológicos y los datos estacionales de precipitación fue significativo ($r^2 = 0.54$, $p < 0.0003$) y el análisis de regresión entre ambas variables para el periodo 1977-2004 mostró alta confiabilidad con fines de reconstrucción (cuadro 4).

El modelo lineal generado para propósitos de reconstrucción fue el siguiente:

$$Y_t = 313.7 + 242.4 * X_t$$

Donde Y_t es el valor de la precipitación reconstruida para el periodo enero-mayo de un año específico (mm), y X_t es el índice de anillo total para el año en que se realiza la reconstrucción.

Al aplicar el modelo, se obtuvo una reconstrucción que se extiende por 208 años (1790-2007) e incluye la precipitación acumulada de los meses marzo-septiembre,

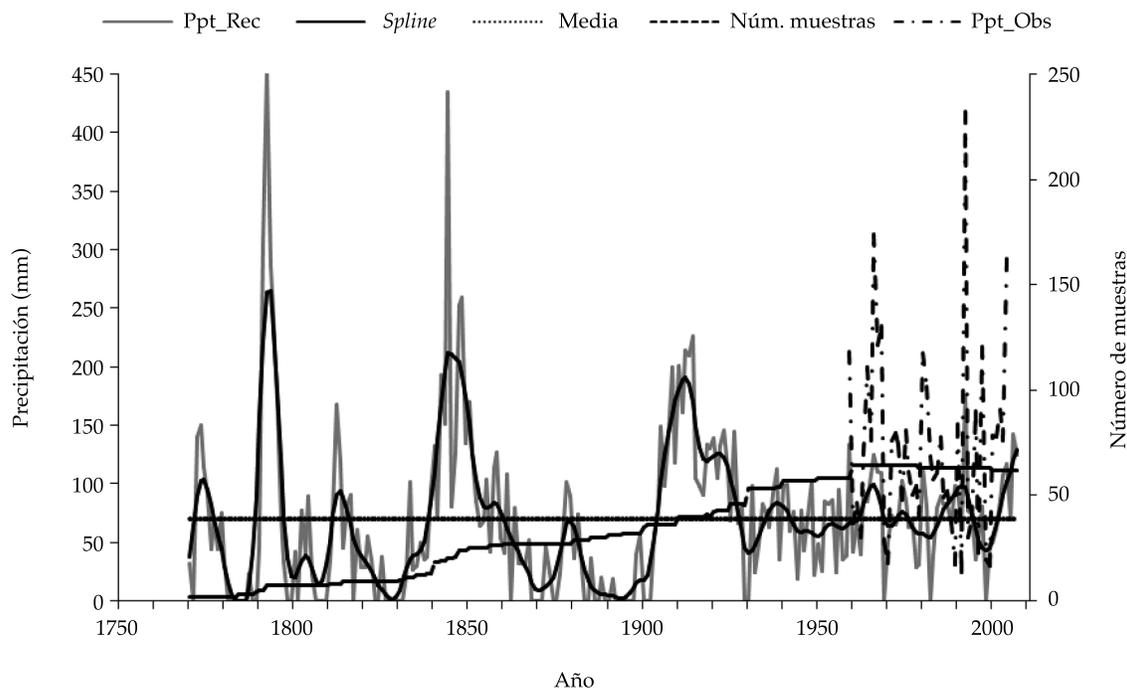


Figura 6. Precipitación reconstruida enero-mayo del periodo 1770-2007 para la parte centro-sur de Guanajuato, con una cronología regional de *Taxodium mucronatum*. La línea gris representa los valores acumulados reconstruidos de precipitación durante los meses de enero a mayo para un año específico; la línea oscura es una curva flexible para resaltar eventos por década; la línea quebrada constituye el número de radios utilizados para obtener los índices en un año determinado; la línea discontinua oscura representa los datos de precipitación estacional observados o registrados, y la línea horizontal es la media de la precipitación reconstruida.

periodo en el que se tiene la mayor precipitación durante el año y que es fundamental para el establecimiento de cultivos de temporal, recarga de acuíferos y producción forrajera con fines ganaderos. La precipitación reconstruida para el noreste de Guanajuato indica alta variabilidad en el tiempo, con sequías severas en los periodos de 1796-1797, 1803-1808, 1812-1817, 1835-1837, y en los años de 1919, 1928, 1953, 1959, 1979, 1982, 1989, 1999 y 2006 (figura 9).

El periodo estacional reconstruido constituye el 87% de la lluvia total anual que acontece en la región y por ende es representativa de la precipitación que caracteriza a la región noroeste del estado de Guanajuato, además de ser un buen indicador de la variabilidad hidroclimática histórica de los últimos 200 años.

Una cronología de pino piñonero en el sitio "La Paloma", municipio de San Felipe, en las cercanías de la Sierra del Cubo, Guanajuato, mostró un comportamiento diferente a la cronología de piñonero del sitio Ibarra, no obstante su relativa cercanía con dicho lugar. Con fines comparativos, se integró una estación climática regional compuesta por las estaciones San Pedro de los Almoloya, Pañuelitas, Lobos, San Isidro, Ocampo y San Felipe. Se encontró una correlación significativa ($r = 0.70$, $p < 0.01$) entre los índices dendrocronológicos y la precipitación total anual del periodo 1979-2003. Con base en esta relación, se generó una ecuación lineal con fines de reconstrucción, la cual fue significativa (cuadro 5).

No fue posible verificar la reconstrucción con datos climáticos independientes debido a lo

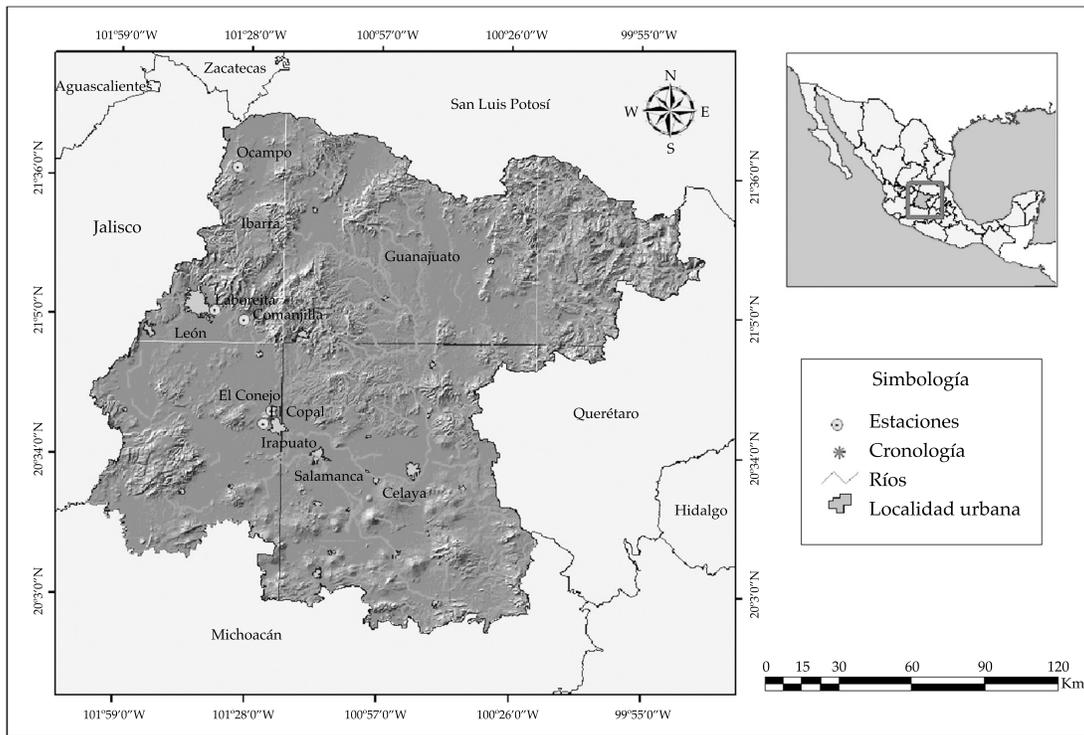


Figura 7. Ubicación geográfica de la cronología de pino piñonero y de las estaciones climáticas utilizadas para generar una base de datos de precipitación regional para el noroeste de Guanajuato.

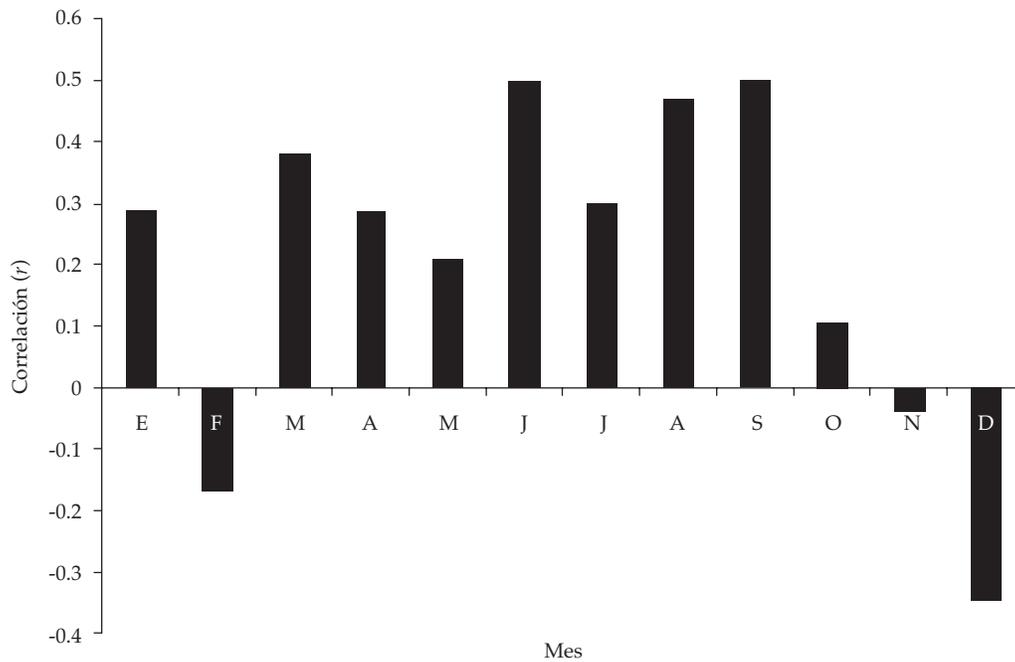


Figura 8. Correlación entre los índices dendrocronológicos de ancho de anillo total y registros de precipitación promedio de estaciones aledañas al sitio de colecta en Ibarra, Guanajuato.

Cuadro 4. Análisis de regresión entre los índices dendrocronológicos de pino piñonero en el sitio Ibarra del municipio de Ocampo, Guanajuato, y la precipitación acumulada estacional marzo-septiembre del periodo 1977-2004.

Periodo	R ²	Coefficientes	Error estándar	Prueba de "t"	Probabilidad
1977-2004	0.51	379.1596	51.64162	7.342132	0.000000
		261.9748	52.14363	5.024098	0.000039

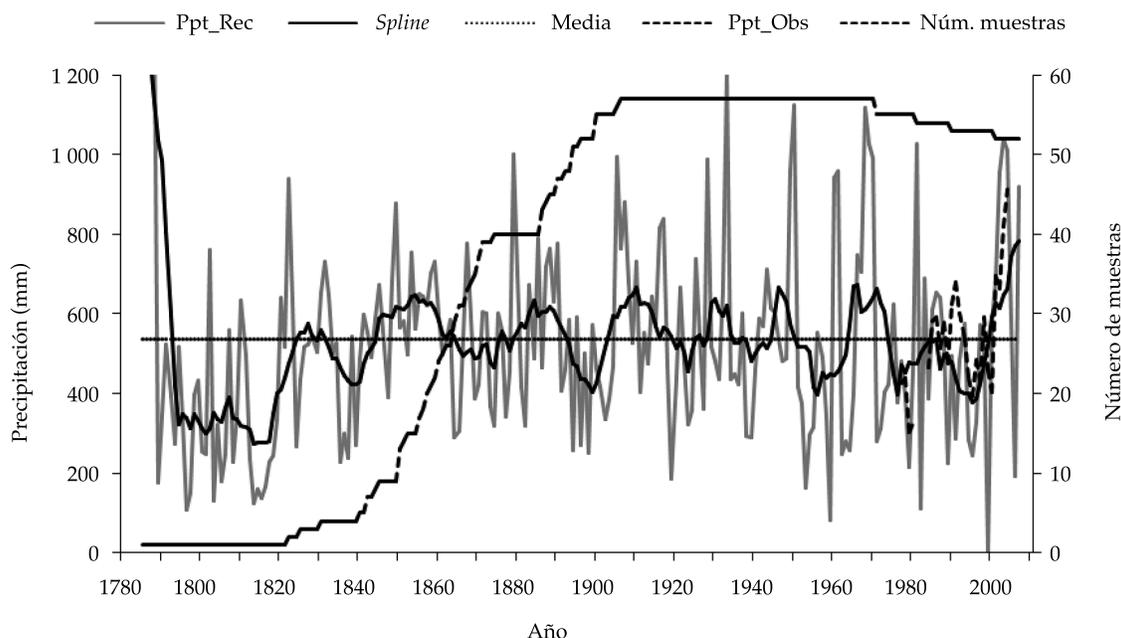


Figura 9. Precipitación estacional reconstruida marzo-septiembre. La línea gris representa los valores acumulados de precipitación durante los meses de marzo a septiembre para un año específico; la línea oscura es una curva flexible para resaltar eventos por década; la línea quebrada constituye el número de radios utilizados para obtener los índices en un año determinado; la línea punteada discontinua muestra la precipitación observada o registrada, y la línea horizontal es la media de la precipitación reconstruida.

limitado de los registros climáticos disponibles. La ecuación lineal generada fue la siguiente:

$$Y_t = 234.7 + 183.7 * X_t$$

Donde Y_t es el valor de la precipitación reconstruida anual en milímetros, y X_t es el índice de anillo total para el mismo año.

Con los índices dendrocronológicos como variable independiente, se generó una re-

construcción de precipitación anual para los últimos 158 años (1850-2007) (figura 10).

Mediante el proceso de comparación de las curvas flexibles decenales (*splines*), correspondientes a eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones del centro-sur (Manuel Doblado-Jerécuaro-Chamácuaro), noroeste (Ibarra) y norte (Palomas) de Guanajuato, se determinó que no obstante la baja asociación entre las reconstrucciones de

Cuadro 5. Análisis de regresión entre los índices dendrocronológicos de pino piñonero en el sitio Palomas, municipio de Ocampo, Guanajuato, y la precipitación acumulada anual del periodo 1979-2003.

Periodo	R ²	Coefficientes	Error estándar	Prueba de "t"	Probabilidad
1979-2003	0.48	234.7387	44.32908	5.295366	0.000035
		183.6762	41.99327	4.373944	0.000294

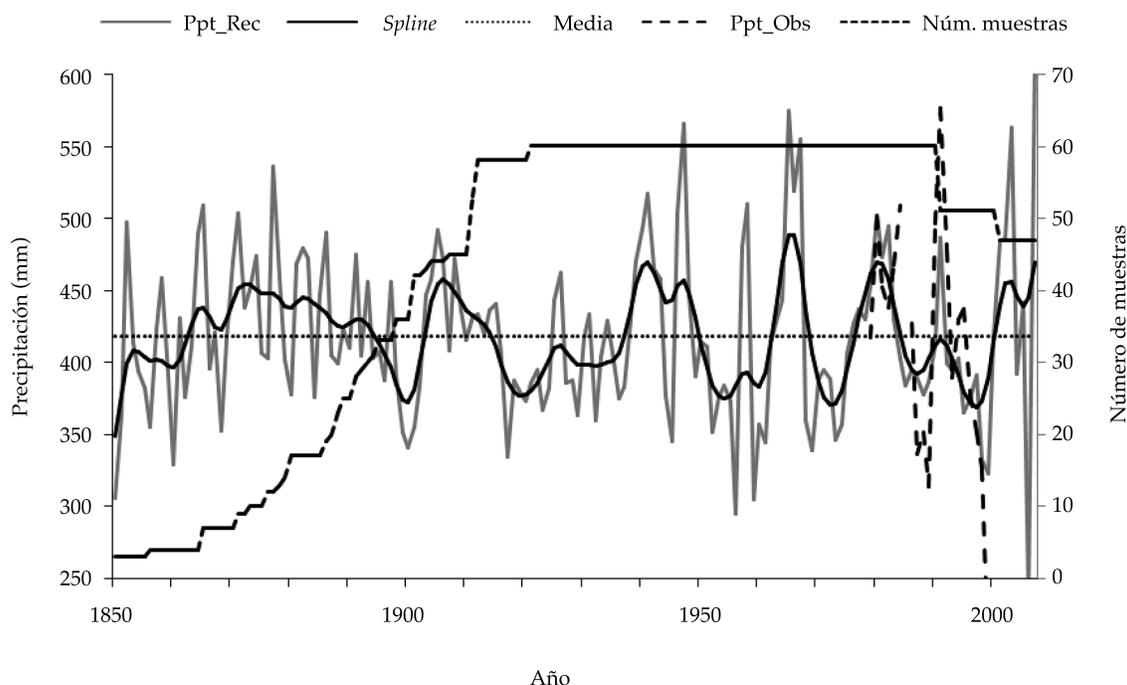


Figura 10. Precipitación estacional reconstruida anual. La línea gris representa los valores acumulados de precipitación anual para un año específico; la línea oscura es una curva flexible para resaltar eventos por década; la línea quebrada constituye el número de radios utilizados para obtener los índices en un año determinado; la línea punteada discontinua muestra la precipitación observada o registrada, y la línea horizontal es la media de la precipitación reconstruida.

precipitación con las cronologías de piñonero de los sitios Ibarra y Paloma, se detectó un comportamiento similar para ciertos periodos, en particular después de 1900 (figura 11). Los periodos de comportamiento común corresponden a sequías generalizadas presentes en Guanajuato y otras regiones de país. Tal es el caso de aquellas ocurridas en las décadas de 1890-1900, 1920, 1950, 1970 y 1990, las cuales se han asociado con la influencia de patrones

circulatorios que impactaron amplias regiones de México (Villanueva et al., 2009; Stahle et al., 2012).

Análisis de las sequías y los periodos húmedos en Guanajuato

Las sequías reconstruidas cubren 1778-1789, 1798-1811, 1817-1839, 1862-1905, 1944-1961, 1977-1985 y 1995-2002; estos periodos abarcan

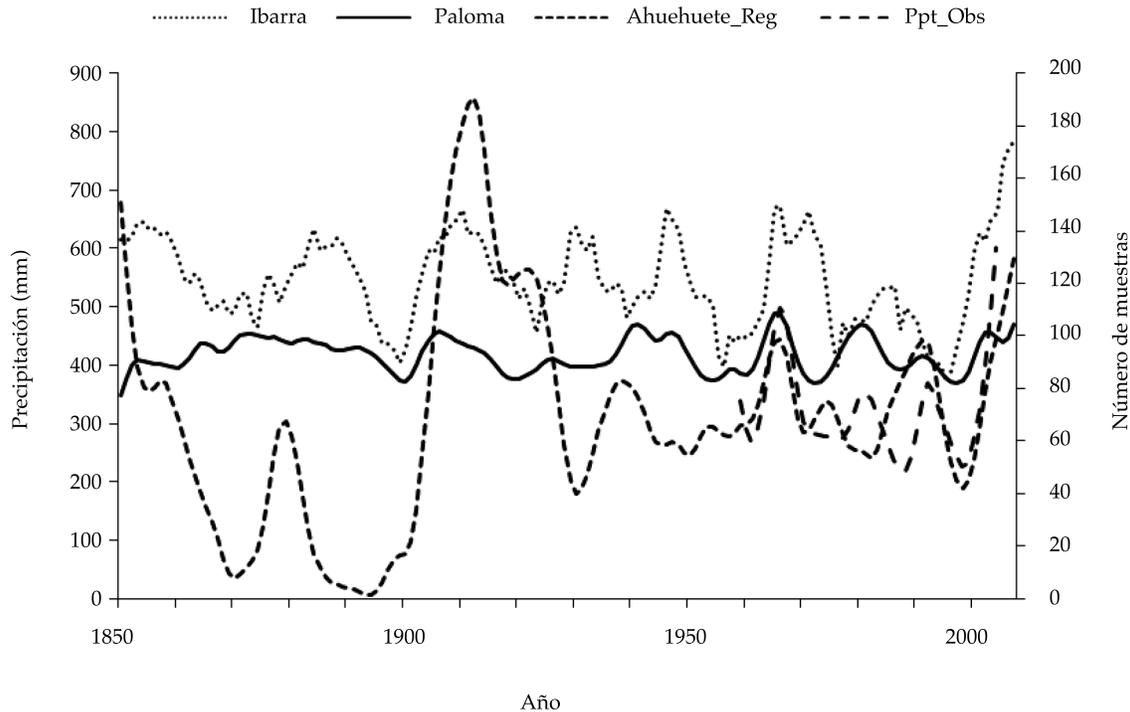


Figura 11. Curvas flexibles decenales que resaltan eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones de precipitación con cronologías de piñonero (Ibarra, Palomas), ahuehuete (regional centro-sur de Guanajuato) y precipitación estacional del centro-sur de Guanajuato. Se consideró el periodo 1850-2007 de las reconstrucciones.

algunos de los eventos más importantes que han afectado al estado de Guanajuato y a otras regiones de la república mexicana, además de estar respaldados por reconstrucciones de precipitación para el centro y norte de México (cuadro 6).

La sincronía entre eventos de baja frecuencia (periodos húmedos y secos) no fue similar entre las diversas reconstrucciones de precipitación invierno-primavera, en particular si se compara la precipitación reconstruida del centro-sur de Guanajuato, contra otras desarrolladas para el norte y noreste de México (figura 12). Esta situación pudiera atribuirse al impacto diferente de ENSO para dichas regiones, al ser el efecto de mayor intensidad, en específico su fase cálida para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999; Seager *et al.*, 2009). No obstante lo anterior, es importante señalar que

ciertos periodos húmedos fueron comunes para las reconstrucciones, lo cual significa que eventos ENSO de alta intensidad pudieron haber impactado gran parte del territorio nacional, incluyendo al estado de Guanajuato.

Entre el periodo de 1788 a 1811, en el estado de Guanajuato ocurrieron seis subperiodos secos en los años de 1780, 1784-1786, 1793, 1803 y 1809 (Endfield *et al.*, 2004), aunque eventos aislados de sequía se reportan para los años de 1877, 1880, 1894, 1895, 1896, 1902 y 1905 (Contreras, 2005). A escala nacional, sólo se presentaron dos sequías, que abarcaron de 1808 a 1809, y de 1810 a 1811, que provocaron pérdidas de cosecha y trajeron aparejadas serias repercusiones económicas (Florescano, 1980; García, 1993), así como hambrunas, carestías e incremento en los precios de los alimentos básicos (Contreras, 2005). La falta de alimento, aunado a la escasa disponibilidad de

Cuadro 6. Sequías y periodos secos y húmedos reconstruidos y documentados para el estado de Guanajuato, y el impacto social y económico producido.

Anomalía climática	Periodo reconstruido	Periodo documentado (archivos históricos)	Efectos sociales y económicos	Fuente
Déficit de precipitación (sequía)	1778-1789	1778, 1780, 1784-1786	Pérdida de cultivos, escasez de grano, hambruna, "Año del hambre"	Florescano, 1980; García, 1993; Acuña-Soto <i>et al.</i> , 2002; Endfield <i>et al.</i> , 2004
	1798-1811	1793, 1803, 1809	Siniestro de cultivos, precios elevados de granos	Contreras, 2005; Endfield <i>et al.</i> , 2004
	1817-1839	1826-1828, 1830, 1836	Pérdida de cultivos, escasez de grano	García, 1993
	1862-1908	1862-1864, 1866-1870, 1872-1873, 1878-1879, 1889-1900	Pérdida de cultivos, escasez de grano, muerte de ganado	García, 1993; Escobar, 1997; Contreras, 2005
	1944-1961	1946	Pérdida de cultivos, escasez de grano, muerte de ganado	Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato, 2006
	1977-1985	1977, 1982	Problemas de abastecimiento de agua, siniestro de 88% de superficie cultivada en temporal en El Niño de 1982	INEGI, 1998; Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato, 2006
	1995-2002	1997, 1998, 2000, 2002	Siniestro de cultivos de temporal, incendios forestales, muerte de ganado	Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato, 2006
Exceso de precipitación	1772	1772	Inundación	Endfield <i>et al.</i> , 2004
	1788-1797	1788, 1791	Inundaciones, destrucción de infraestructura	Endfield <i>et al.</i> , 2004
	1839-1860	Sin información	Sin información	Sin información
	1906-1927	1908, 1912, 1926	Desbordamiento de ríos, inundación, destrucción de infraestructura	Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato, 2006
	1963-1970	Sin información	Sin información	Sin información
	1987-1994	1991	Inundaciones	INEGI, 2006
	2003-2007	2003, 2006, 2007	Desbordamiento de ríos, inundaciones, pérdida de viviendas, destrucción de infraestructura	Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato, 2006

agua aun para aseo personal, se asocia con la presencia de una epidemia de tifus que afectó el Valle de México entre 1785 y 1786 (Acuña Soto *et al.*, 2002).

Sequías históricas detectadas en el centro-sur de Guanajuato se han presentado de forma simultánea hasta en regiones consideradas húmedas, como es el caso de la península de Yucatán, donde en los periodos 1822-1823 y

1833-1834 ocasionaron migración, hambre y tumulto. Esta última sequía también originó alza de precios en Michoacán (Contreras, 2005).

En el periodo 1862-1905 se reporta la muerte masiva de ganado en Sinaloa, al igual que en la década de 1860. La sequía de la década de 1870 originó carestía de grano para la misma región (Escobar, 1997). Para el centro-norte de México, las sequías de

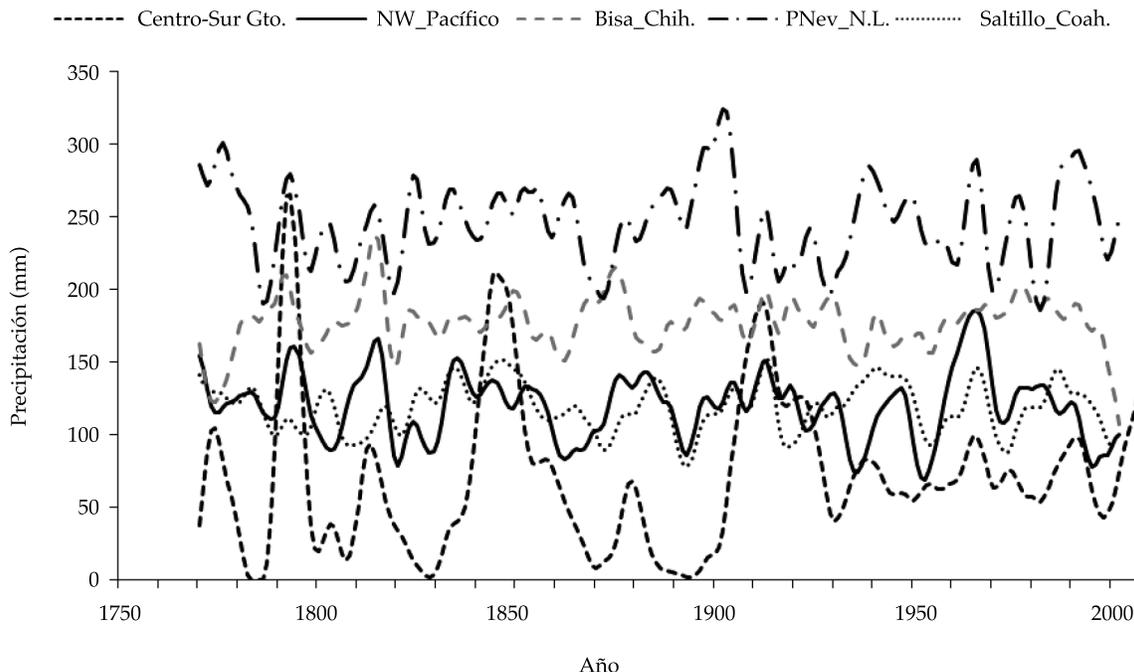


Figura 12. Tendencias de la precipitación reconstruida invierno-primavera para diversas regiones de México, incluyendo la obtenida para el centro-sur de Guanajuato.

1882-1883, 1889-1890 y 1891-1895 afectaron drásticamente la ganadería (Escobar, 1997; Contreras, 2005), mientras que la de mediados del siglo XX (1944-1961), que afectó en mayor grado la parte norte y centro del país, dio pie a la migración masiva de campesinos del medio rural a núcleos urbanos, y fomentó el bracerismo hacia los Estados Unidos de América (Sánchez *et al.*, 2008, 2012).

Las condiciones de precipitación reconstruida por arriba del promedio regional se presentaron en 1789-1797, 1839-1860, 1906-1927, 1963-1970, 1987-1995 y 2003-2007. Antes de la década de 1950 se reconstruyeron tres de los periodos más húmedos, entre los que destacan 1789-1797, 1840-1860 y 1905-1927. Posterior a 1950, se reconstruyeron tres nuevos eventos con precipitación por arriba de la media regional, aunque a diferencia de los anteriores a 1950, el año más húmedo apenas alcanzó condiciones de precipitación por arriba de la media.

En el estado de Guanajuato se tienen registros documentados de inundaciones desde el siglo XVII hasta nuestros días. Durante el periodo de 1770 a 2003 se documentaron 55 inundaciones severas en 19 municipios del estado, entre las que destacan las ocurridas en los años 1770, 1772, 1780, 1788, 1803, 1883, 1887, 1888, 1890, 1967, 1971, 1973, 1998 y 2003 (Endfield *et al.*, 2004). Las consecuencias de estas inundaciones, provocadas por lluvias extraordinarias, fue el desbordamiento de ríos, que ocasionó la muerte y desaparición de personas, pérdida de casas, e inundación de caminos y terrenos situados aguas abajo; sin embargo, no todas ellas fueron provocadas por las intensas lluvias, sino por causas antropogénicas, como establecimiento de viviendas en sitios más susceptibles a daños, deforestación intensiva, sobrepastoreo y, en consecuencia, incremento en la erosión hídrica (Endfield *et al.*, 2004; Escobar, 2004; Contreras, 2005; Conagua, 2007).

Aunque no todas las inundaciones se reflejan en un crecimiento superior en los árboles, las reconstrucciones analizadas, en especial las derivadas de la cronología regional Manuel Doblado-Jerécuaro-Chamácuaro y la de Ibarra, Ocampo, Guanajuato, concuerdan en alto grado con documentos históricos, lo cual constituye una verificación de los datos reconstruidos.

Impacto de El Niño-Oscilación del Sur

El fenómeno ENSO es uno de los patrones atmosféricos circulatorios de mayor importancia en el mundo y que determina en gran medida la variabilidad hidroclimática en el norte y centro de México (Ropelewski y Harper, 1989; Stahle et al., 1998; Magaña et al., 1999; Seager et al., 2009). Para analizar el grado de influencia de este fenómeno en las condiciones climáticas del estado de Guanajuato, se compararon las series de tiempo dendrocronológicas con los índices ENSO y en particular con el Índice de Lluvia Tropical (TRI, por sus siglas en inglés), el cual constituye un estimativo de dicho fenómeno (Wright, 1979).

Al comparar la cronología regional Manuel Doblado-Jerécuaro-Chamácuaro, estimativo de las condiciones climáticas de la región centro-sur de Guanajuato, contra los índices del TRI del periodo estacional octubre-abril, el Análisis de Ondeleta (Torrence y Compo, 1998) determinó que este fenómeno ha impactado de manera significativa ($p < 0.05$) en esta región en frecuencias de cuatro a ocho años, para los periodos 1905-1922 y 1942-1965. El efecto observado se manifiesta con un incremento en la precipitación invernal; sin embargo, para otros periodos con alta precipitación, la influencia de este fenómeno no fue significativa, lo cual sugiere que otros fenómenos atmosféricos pudieran dominar y tener una mayor influencia en determinar las condiciones climáticas prevalecientes, o bien que acciones como el calentamiento global pudieran estar modificando el clima en esta región y exacerbando algunas de las sequías recientes (Stahle et al., 2011) (figura 13).

La comparación de los valores de los índices de la cronología regional de ahuehuate y de piñonero, con eventos de la fase fría y cálida de ENSO, no indicó una influencia definida de este fenómeno en los valores de las cronologías, así por ejemplo, para la cronología de ahuehuate, cuando se compara contra índices de ENSO en el periodo 1869-2007, durante el cual se presentaron 37 eventos de la fase fría, en 15 de ellos (40.5%) se observaron crecimientos superiores a la media (> 1.0), mientras que para los 22 restantes (59.5%), el crecimiento fue inferior (< 1.0). De igual forma, durante el mismo periodo se presentaron treinta eventos cálidos de ENSO, aunque sólo nueve de ellos (30%) produjeron crecimiento superior a la media (> 1.0) y 21 de ellos (70%), crecimiento inferior (< 1.0). Un comportamiento en crecimiento sin mucha relación con el efecto de El Niño también se observó para las cronologías de pino piñonero (cuadro 7).

Información similar se puede derivar de la superficie siniestrada de temporal en Guanajuato y la influencia de las fases de ENSO (Niño o Niña) para el periodo 1980-2005. De esta manera, en ciertos años Niños, como los de 1982, 1987, 1992 y 2005, la superficie siniestrada de cultivos de temporal alcanzó hasta cerca del 50%, pero durante años Niña, particularmente 1989, 1996, 1999 y 2000, la superficie siniestrada fue igual o superior a la ocurrida en años Niño, e incluso algunos años catalogados como "Normales", como los de 1980, 1981 y 1982, también mostraron alto porcentaje de siniestralidad (Secretaría de Desarrollo Agropecuario, 2006).

Con esta información se puede argumentar la falta de claridad del impacto del fenómeno ENSO en esta región de Guanajuato, cuyo crecimiento de los árboles *Taxodium mucronatum* y *Pinus cembroides* está influenciado por este fenómeno, siempre y cuando la señal sea muy intensa, en cuyo caso el impacto de este fenómeno puede afectar amplias zonas del país.

Otros fenómenos atmosféricos, como tormentas tropicales o ciclones, e inclusive el

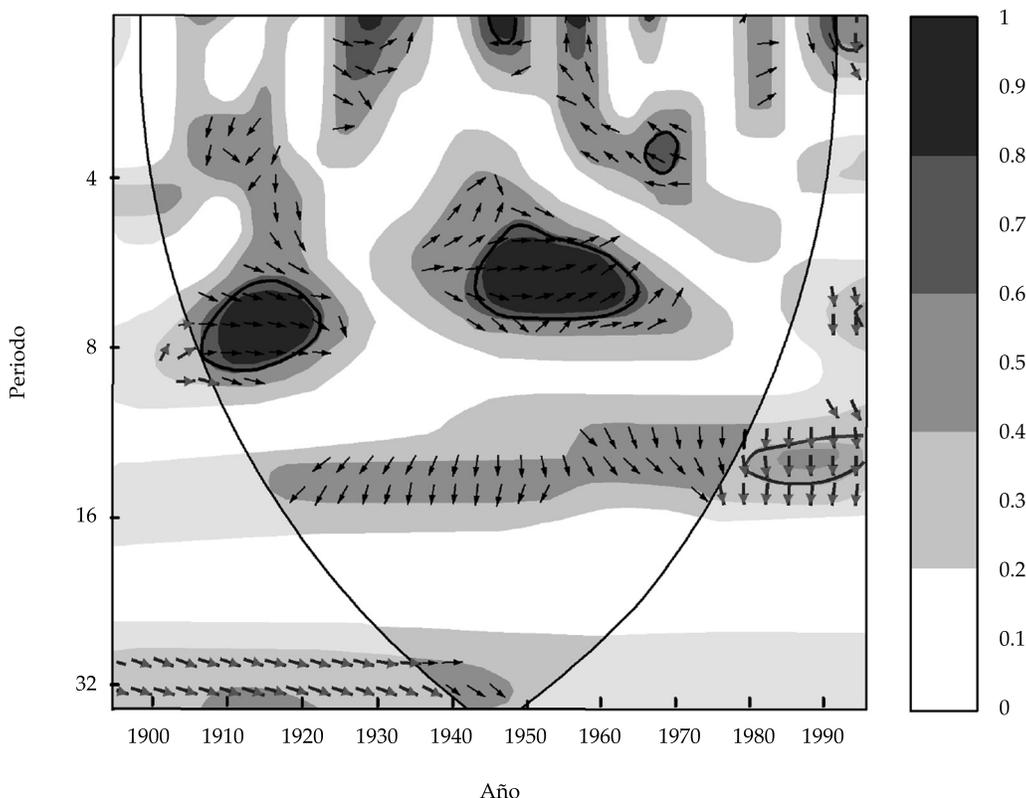


Figura 13. Análisis de Ondeleta entre la serie regional dendrocronológica de ahuehuate para los sitios Manuel Doblado, Jerécuaro y Chamácuaro, ubicados en la región centro-sur de Guanajuato, y los índices de lluvia tropical (TRI) en un estimativo de ENSO. Las manchas negras delimitadas por una línea oscura indican una relación significativa ($p < 0.05$) entre ambas variables. Las flechas horizontales hacia la derecha indican que ambos fenómenos están en fase (que su relación es positiva) y cuando las flechas apuntan hacia la izquierda sugieren antifase o relación negativa. Las flechas que se presentan en forma vertical indican que los fenómenos están desfasados.

monzón mexicano o de norteamérica, pudieran tener un mayor impacto en el clima de la región (Therrell et al., 2002).

Conclusiones

En este estudio, los anillos de crecimiento de especies arbóreas mostraron adecuado potencial para el desarrollo de reconstrucciones paleoclimáticas en el estado de Guanajuato, así como para determinar la presencia de eventos de baja frecuencia, y analizar sus posibles causas y tendencias históricas, situación que puede contribuir a mejorar algunos modelos utilizados con fines climáticos predictivos. En el

presente estudio se generaron series de tiempo dendrocronológicas con una extensión cercana a 250 años tanto para el estado de Guanajuato como para entidades circunvecinas dentro de la cuenca Lerma Chapala.

Se utilizaron dos especies para este propósito: *Taxodium mucronatum* y *Pinus cembroides*. Las cronologías de *T. mucronatum* mostraron una respuesta climática similar y se integraron en una cronología regional de la parte centro-sur de Guanajuato. En contraste, las cronologías de *P. cembroides*, ubicadas en el norte del estado, no se correlacionaron de forma significativa y se utilizaron de manera independiente para reconstrucciones de precipitación individual.

Cuadro 7. Relación entre los índices de crecimiento (IAA) de la cronología regional de *T. mucronatum* para el centro-sur de Guanajuato (MDO) y las cronologías de *P. cembroides* para los sitios Ibarra (IBA) y Palomas (PAL), y el efecto de la fase fría y cálida de ENSO.

Año (fase fría)	MDO	IBA	PAL	Año (fase cálida)	MDO	IBA	PAL
	IAA				IAA		
1906	1.0584	1.376	1.294	1905	1.2804	1.790	1.399
1908	1.5023	1.223	1.292	1911	1.3305	0.727	1.070
1909	1.1461	0.947	1.098	1913	1.5455	0.856	1.004
1910	1.5076	1.317	0.983	1918	1.2104	0.849	0.831
1916	1.0601	1.469	0.928	1940	1.0585	0.831	1.406
1922	1.2060	0.856	0.869	1963	1.0402	0.503	1.065
1924	1.1175	0.642	0.801	1965	1.1009	0.721	1.848
1938	1.1216	0.525	1.064	2002	1.0068	1.717	1.366
1954	1.0660	0.532	0.814	2006	1.2517	1.655	2.073
1956	1.0444	0.992	0.327				
1964	1.0026	0.460	1.136				
1967	1.1110	1.270	1.742				
1974	1.0774	0.762	0.668				
1975	1.0079	1.120	0.935				
2007	1.1726	1.655	2.073				

Se desarrolló una reconstrucción estacional de precipitación invierno-primavera (enero-mayo) del periodo 1700-2007 para la región centro-sur de Guanajuato; mientras que para el noroeste del estado se generaron dos reconstrucciones de precipitación estacional marzo-septiembre y a nivel anual (enero-diciembre), con las cronologías de los sitios Ibarra y la Paloma, las cuales tuvieron una extensión de 208 años (1790-2007) y 158 años (1850-2007), respectivamente.

Las reconstrucciones coincidieron en gran medida con eventos históricos documentados relacionados con sequías e inundaciones para el estado de Guanajuato, y otros estados de la república mexicana.

Un análisis minucioso del efecto histórico del ENSO en la disponibilidad de lluvia y producción de cultivos de temporal mostró alta inconsistencia en su impacto y sólo aquellos eventos clasificados como de alta intensidad por su incidencia en una amplia región de Norte América afectaron la precipitación en Guanajuato con un efecto detrimental en

la superficie cultivada de temporal y en los crecimientos radiales de las especies arbóreas utilizadas. Dicho comportamiento es un indicativo de que para lograr un conocimiento más sólido de la influencia de este fenómeno en la región de estudio es necesario analizar el comportamiento de variaciones en temperatura, presión atmosférica, dirección e intensidad de los vientos, humedad relativa y otras variables meteorológicas que, aunado a información climatológica actualizada procedente del monitoreo del Pacífico tropical, pueda soportar un entendimiento más completo de la influencia histórica de ENSO en Guanajuato.

La información generada aporta conocimiento relacionado con la variabilidad histórica del clima de los últimos 250 años en la parte centro-sur, y de 158 y 208 años para el noroeste del estado de Guanajuato, así como de la influencia del ENSO.

El desarrollo de una red más completa de cronologías de anillos de árboles, aunado al conocimiento dendroclimático ya generado,

permitirá en un futuro mejorar el entendimiento de fenómenos atmosféricos de circulación general y también contribuir con información que complemente modelos de predicción climática.

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado con fondos Conafor-Conacyt de la convocatoria 2006-1, dentro del proyecto *Manejo integral de los recursos naturales en el ámbito de la ciudad de León, Guanajuato*, clave: 33366. También se recibió apoyo del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático (IAI), a través del proyecto CRN # 2047 *Documentación, Entendimiento y Proyección de los Cambios en el Ciclo Hidrológico en la Cordillera Americana*, financiado a su vez por el US/National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

Recibido: 19/05/09
Aceptado: 10/04/12

Referencias

- ACUNA-SOTO, R., STAHL, D.W., CLEVELAND, M.K., and THERRELL, M.D. Megadrought and megadeath in 16th century Mexico. *Emerging Infectious Diseases*. Vol. 8, No. 4, 2002, pp. 360-362.
- BRADLEY, S.R. *Paleoclimatology: reconstructing climates of the quaternary*. International Geophysic Series. Vol. 68. Amsterdam: Elsevier Academic Press., 1999, 614 pp.
- CONAGUA. *Estadísticas del agua en México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007, pp. 259.
- CONTRERAS, S.C. Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*. Vol. 56, 2005, pp. 118-133.
- COOK, E.R. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*. Vol. 47, 1987, pp. 37-59.
- Cook, E.R. and Peters K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies: *Tree-Ring Bulletin* Vol. 41, 1981, pp. 45-53.
- COOK, E.R., WOODHOUSE, C.A., EAKIN, C.M., MEKO, D.W., and STAHL, D.W. Long-term aridity changes in the Western United States. *Science*. Vol. 306, 2004, pp. 1015-1018.
- COOK, E.R., SEAGER, R.R., CANE, M.A., and STAHL, D.W. North American drought: reconstruction, cause, and consequences. *Earth Science Review*. Vol. 81, 2007, pp. 93-124.
- DELGADO, C.S. Aplicaciones estadísticas en análisis dendrocronológicos. In: *Dendrocronología en América Latina*. Roig, F.A. (comp.). Mendoza, Argentina: EDIUNC, 2000, pp. 79-102.
- DOUGLASS, A.E. A method of estimating rainfall by the growth of trees. In: *The Climatic Factor*. Huntington, E. (editor). Washington, D.C: Publication No. 192, Carnegie Institution of Washington, 1914, pp. 101-122.
- DOUGLASS, A.E. Precision of ring dating in tree-ring chronologies. *University of Arizona Bulletin*. Vol. XVII, No. 3, 1946, 21 pp.
- ENDFIELD, G.H., FERNÁNDEZ, I.T., and O'HARA, S.L. Conflict and cooperation: water, floods and social response in colonial Guanajuato, Mexico. *Environment History*. Vol. 9, 2004, pp. 222-247.
- ESCOBAR, O.A. Las sequías y su impacto en las sociedades del México decimonónico, 1856-1900. *Historia y Desastres en América Latina*. Vol. II. Acosta, G.V. (coordinadora), México, D.F., 1997, pp. 170-2002
- FLORESCANO, E.M. *Análisis histórico de las sequías en México*. México. D.F.: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980, 158 pp.
- FRITTS, H.C. *Tree rings and climate*. London: Academic Press Inc., Ltd., 1976, 565 pp.
- FRITTS, H.C. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. Tucson: University of Arizona Press., 1991, 286 pp.
- GARCÍA, A.V. Las sequías históricas de México. *Desastres y Sociedad*. Vol. 1, No. 1, 1993, pp. 1-18.
- HOLMES, R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*. Vol. 43, 1983, pp. 69-78.
- INE. *Diagnóstico bio-físico y socio-económico de la cuenca Lerma-Chapala*. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología, Dirección de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas, 2003.
- INEGI. *Estudio Hidrológico del Estado de Guanajuato*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Gobierno del Estado de Guanajuato, 1998, 151 pp.
- MAGAÑA, R.V., PÉREZ, J.L., VÁZQUEZ, J.L., CARRIZOSA, E. y PÉREZ, J. El Niño y el clima. En: *Los impactos de El Niño en México*. Magaña, R.V. (editor). México, D.F: SEP-Conacyt, 1999, pp. 23-68.
- ROPELEWSKI, C.F. and HALPERT, M.S. North American precipitation and temperature patterns associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review*. Vol. 114, 1989, pp. 2352-2362.
- SÁNCHEZ-COHEN, I., OJEDA-BUSTAMANTE, W., CHEBHOUNI, G., ORONA-CASTILLO, I., VILLANUEVA-DÍAZ, J., GONZÁLEZ-BARRIOS, J.L. y GONZÁLEZ-CERVANTES, G. Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y

- económicos. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 4, octubre-diciembre de 2008, pp. 5-24.
- SÁNCHEZ COHEN, I., OSWALD, S.U., DÍAZ PADILLA, G., CERANO PAREDES, J., INSUNZA-IBARRA, M.A., LÓPEZ, R., and VILLANUEVA DÍAZ, J. Forced migration, climate change, mitigation and adaptation policies in Mexico: some functional relationships. *International Migration*. 2012, Doi: 10.1111/J. 1468-2435.2012.00743.
- SEAGER, R., TING, M., DAVIS, M., CANE, M., NIKE, N., NAKUMARA, J., LIE, C., COOK, E., and STAHL, D.W. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera*. Vol. 22, No. 1, 2009, pp. 1-31.
- SECRETARÍA DE DESARROLLO AGROPECUARIO DEL ESTADO DE GUANAJUATO. *La agricultura de temporal en Guanajuato: análisis para mejorar la productividad*. Guanajuato, México: Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato, 2006, 12 pp.
- STAHL, D.W., D'ARRIGO, R.D., KRUSIC, P.J., CLEVELAND, 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. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 70, No. 10, 1998, pp. 2137-2152.
- STAHL, D.W., COOK, E.R., VILLANUEVA-DÍAZ, J., FYE, F.K., BURNETT, D.J., GRIFFIN, R.D., ACUÑA-SOTO, R., SEAGER, R., and HEIM, R.R. Early 21st-century drought in Mexico. *Eos*. Vol. 90, No. 17, 2009, pp. 89-90.
- STAHL, D.W., VILLANUEVA-DÍAZ, J., BURNETTE, D.J., CERANO-PAREDES, J., HEIM, R.R. FYE, F.K., ACUÑA-SOTO, R., THERRELL, M.D., CLEVELAND, M.K., and STAHL, D.K. 2011. Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*. Vol. 38, L05703.
- STAHL, D.W., BURNETTE, D.J., VILLANUEVA, J., CERANO, J., FYE, F.K., GRIFFIN, R.D., CLEVELAND, M.K., STAHL, D.K., EDMONDSON, J.S., and WOLFF, K.P. Tree-ring analysis of ancient baldcypress trees and subfossil wood. *Quaternary Science Review*. Vol. 34, No. 1, February, 2012, pp. 1-15.
- STOKES, M.A. and SMILEY, T.L. *An introduction to tree-ring dating*. Chicago: The University of Chicago, 1968, 73 pp.
- THERRELL, M.D., STAHL, D.W., CLEVELAND, M.K., and VILLANUEVA-DÍAZ, J. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 107 (D14), 2002, pp. 6-1 - 6-7.
- TORRENCE, C. and COMPO, G.P. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 79, No. 1, January, 1998, pp. 61-78.
- TROPICAL ATMOSPHERE OCEAN PROJECT. TAO/TRITON Data display. Citado el 21 de febrero de 2011 [en línea]. Disponible para World Wide Web: <http://www.pmel.noaa.gov/tao/>.
- VILLANUEVA, J., STAHL, D.W., LUCKMAN, B.H., CERANO, P.J., THERRELL, M.D., MORÁN, M.R., and CLEVELAND, M.K. Potencial dendrocronológico de *Taxodium mucronatum* Ten. y acciones para su conservación en México. *Ciencia Forestal*. Vol. 32, núm. 101, 2007, pp. 9-37.
- VILLANUEVA, J., FULÉ, P.Z., CERANO, P.J., ESTRADA A.J. y SÁNCHEZ, C.I. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Ciencia Forestal en México*. Vol. 34, núm.105, 2009, pp. 37-69.
- WRIGHT, P.B. Persistence of rainfall anomalies in the central Pacific. *Nature*. Vol. 277, 1979, pp. 371-374.

Abstract

VILLANUEVA-DÍAZ, J., CERANO-PAREDES, J., ESTRADA-ÁVALOS, J., CONSTANTE-GARCÍA, V. & CORTÉS-BARRERA, E.N. *Hydroclimate variability reconstructed with tree rings for the Lerma Chapala basin in Guanajuato*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 4, October-December, 2012, pp. 5-26.

A historic understanding of climate is essential to determine its long-term variability and trends. Six tree-ring chronologies covering roughly 250 years were developed for the Lerma Chapala basin, in the states of Guanajuato, Jalisco and Queretaro. Two species were used for this purpose, *Taxodium mucronatum* and *Pinus cembroides*. For the central-southern region of Guanajuato, one seasonal winter-spring (January-June) precipitation reconstruction was developed for the period 1770-2007, and for the northwestern section two were generated—one for the period March-September, extending back 208 years (1790-2007) and an annual reconstruction (January-December) covering 158 years. Severe hydroclimatic events were present in the reconstructions, as reported by historical records, including those producing grain scarcity, famine, epidemic outbreaks, migrations, as well as other disasters such as droughts in the 1860s, 1890s, 1920s, 1950s, 1970s, and 1990s. These serve to verify the reliability of the reconstructions. A historical analysis of ENSO and its impact on precipitation, ring width indices, and rainfed crop production was very inconsistent and only severe ENSO events affecting precipitation in Guanajuato were detected. This behavior indicates the need to more thoroughly investigate other climatic variables that, in addition to the ENSO phenomenon, may explain the hydroclimate variability in this region.

Keywords: Guanajuato, Lerma Chapala, dendrochronology, ring width index, reconstructed precipitation, hydroclimate variability, ENSO, droughts.

Dirección institucional de los autores

Dr. José Villanueva Díaz
M.C. Julián Cerano Paredes
Dr. Juan Estrada Ávalos
Ing. Vicenta Constante García

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas
y Pecuarias
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación
Agua, Suelo, Planta, Atmósfera
INIFAP-CENID-RASPA
Km 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento
35140 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO
Teléfonos: + 52 (871) 1590 104, 1590 105, 1590 107
Fax: +52 (871) 7191 134
villanueva.jose@inifap.gob.mx
cerano.julian@inifap.gob.mx
estrada.juan@inifap.gob.mx
constante.garcia@inifap.gob.mx

M.C. Eunice N. Cortés Barrera

Universidad Autónoma de Tlaxcala
Ciencias Biológicas,
Centro de Investigación en Genética y Ambiente
Carretera a Ocotlán s/n
90000 Tlaxcala, Tlaxcala, MÉXICO
Teléfono: +52 (246) 4652 700
nayeli_coba@yahoo.com.mx