

Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán

Recibido: 16 de enero de 2012. Aceptado en versión final: 1 de abril de 2013.

Julián Cerano Paredes*

José Villanueva Díaz*

Rosalinda Cervantes Martínez*

Lorenzo Vázquez Selem**

Ramón Trucios Cacicano*

Vidal Guerra de la Cruz***

Resumen. Desde la perspectiva del recurso hídrico, el Pico de Tancítaro representa una riqueza hidrológica para la región y el principal elemento para su desarrollo económico. Los registros climáticos instrumentales son muy cortos y los estudios dendrocimáticos que permitan analizar su variabilidad en el tiempo son nulos. En este contexto, este trabajo se planteó como objetivos: *a)* reconstruir la variabilidad de la precipitación para el Pico de Tancítaro con base en los anillos de crecimiento de *Abies religiosa* y *b)* determinar frecuencias importantes en la variabilidad climática de la región. Mediante técnicas dendrocronológicas estándar se logró fechar al año exacto cada uno de los crecimientos de 25 muestras ($p < 0.05$). Se reconstruyó la variabilidad de la

precipitación de finales del siglo XIX a la primera década del siglo XXI (1884-2010, 127 años). Las sequías más intensas reconstruidas para el oeste del estado de Michoacán se registraron en los periodos 1890-1896, 1948-1957, 1968-1971, 1982-1989 y 1998-2010. El intervalo de tiempo 1960-1966 representa el periodo más húmedo de los últimos 127 años. Se identificó que la recurrencia de intensas sequías multianuales (1891-1896, 1942-1956 y 1998-2010) es de 42 a 43 años, mismas que están relacionadas con frecuencias significativas ($p < 0.05$) de 42 años.

Palabras clave: Pico de Tancítaro, dendrocronología, sequías, *Abies religiosa*.

* INIFAP CENID-RASPA, Km 6.5 margen derecha del Canal Sacramento, 35140, Gómez Palacio, Durango, México. E-mail: cerano.julian@inifap.gob.mx; villanueva.jose@inifap.gob.mx; cervantes.rosalinda@inifap.gob.mx; trucios.ramon@inifap.gob.mx

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D.F. E-mail: lselem@igg.unam.mx

*** INIFAP-Tlaxcala, Km. 2.5 Carr. Tlaxcala-Chiautempan, Col. Industrial Sta. Chiautempan, 90800, Tlaxcala, México. E-mail: guerra.vidal@inifap.gob.mx

Cómo citar:

Cerano Paredes, J., J. Villanueva Díaz, R. Cervantes Martínez, L. Vázquez Selem, R. Trucios Cacicano y V. Guerra de la Cruz (2014), "Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 83, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 41-54, dx.doi.org/10.14350/rig.35190.

Winter-spring precipitation reconstruction for the Pico de Tancítaro National Park, Michoacán

Abstract. From the water resource perspective, the Tancítaro Peak is the most important hydrologic wealth for the region and a chief element for the economic development. The instrumental records of climate are very short and paleoclimatic studies dealing with rainfall variability are non-existent. The objectives of this study were: (1) to reconstruct the variability of precipitation for the Tancítaro Peak based on growth rings of *Abies religiosa*; (2) to determine important frequencies on climate variability of the region. Using standard dendrochronological techniques 25 samples were accurately dated ($p < 0.05$). Precipitation variability was reconstructed for the last years of XIX century to first

decade of XXI century (1884-2010, 127 years). The most severe droughts reconstructed for the western Michoacán state were reconstructed for the periods 1890-1896, 1948-1957, 1968-1971, 1982-1989 and 1998-2010. The period 1960-1966 represents the wettest period of the last 127 years. Severe multi-annual droughts (1891-1896, 1942-1956 y 1998-2010) have recurrence of 42 to 43 years, and are related to a significant frequency ($p < 0.05$) of 42 years.

Key words: Tancítaro Peak, dendrochronology, droughts, *Abies religiosa*.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para todos los procesos biológicos (Fuentes y Bocco, 2003; Toledo, 2006). Sin embargo, su utilidad en los procesos humanos productivos ha ocasionado que también sea fuente de conflictos de la era moderna (Ortiz *et al.*, 1998).

En la mayor parte del país la presión sobre el recurso hídrico va de media a fuerte. Aunque la disponibilidad de agua actualmente asciende a 4 841 m³/hab, las cifras muestran un panorama nacional difícil de resolver, en el que el manejo del agua debería involucrar aspectos relacionados con su vulnerabilidad, enfocados a una mejor administración de este recurso (CNA, 2002).

Para el caso de Michoacán, la Comisión Nacional del Agua (CNA) clasifica a la región del Balsas con una presión media a fuerte de su recurso hídrico y con una disponibilidad natural base media per cápita de 2 844 m³; es decir, poco más de la mitad del promedio nacional. Michoacán comparte con los estados vecinos las regiones hidrológicas de los sistemas Armería-Coahuayana, Lerma-Santiago, Costa de Michoacán, Balsas y Costa Grande. De éstos, una de las cuencas de mayor relevancia por su extensión y significado, tanto socioeconómico como ambiental en el ámbito nacional y estatal, es la del río Balsas, a la cual pertenece el Pico de Tancítaro (INEGI-SEMARNAP, 1997).

El Pico de Tancítaro da origen a 16 cuencas hidrográficas, cuya configuración en el Parque

Nacional del mismo nombre, refleja una distribución centrípeta de éstas, en el macizo volcánico, resultado de la configuración casi cónica del relieve, lo que permite una disponibilidad de agua para toda la región (Fuentes y Bocco, 2003). Desde la perspectiva del recurso hídrico, el Pico de Tancítaro constituye la base para el desarrollo de por lo menos 40 000 habitantes en 82 poblaciones y comunidades que se dedican al cultivo de aguacate, durazno, manzana, pera, agricultura de temporal y ganadería extensiva. La producción de aguacate de exportación en esta zona es la más importante del país y se le conoce como el corredor aguacatero de Uruapan (Torres y Bocco, 1999).

El Pico de Tancítaro representa una riqueza hidrológica para la región y un elemento fundamental en su desarrollo económico, por lo que el análisis histórico de su variabilidad climática es de la mayor importancia. Sin embargo, el registro de las variables climáticas por microrregiones es deficiente, dado que no existen actualmente estaciones dentro del parque nacional y las localizadas en los alrededores carecen de registros extensos y de calidad (IMTA, 2009).

La dendrocronología es una ciencia que permite reconstruir la variabilidad climática y ambiental empleando los anillos de crecimiento anual de los árboles (Fritts, 1976). Recientemente para algunas regiones de México se han reconstruido series tan extensas en el tiempo como la longevidad de los árboles existentes, lo que ha permitido analizar el

clima de varios siglos en el pasado, por ejemplo, 600 años para el norte de México (Cerano *et al.*, 2011a) y 1 200 años para el centro del país (Stahle *et al.*, 2011). Un estudio con *Abies religiosa* en la región de la mariposa monarca en Michoacán mostró que las variaciones en el ancho de los anillos están relacionadas con la variabilidad climática anual (Huante *et al.*, 1991).

En este contexto, los registros de los anillos de los árboles pueden ser empleados para recuperar información climática del pasado en una escala de resolución anual. Este trabajo tuvo como objetivos: *a)* reconstruir la variabilidad de la precipitación invierno-primavera para el Pico de Tancítaro basándonos en los anillos de crecimiento anual de *Abies*

religiosa; *b)* analizar la variabilidad de la precipitación del siglo XX y primera década del siglo XXI, y *c)* determinar frecuencias importantes de eventos extremos en la variabilidad climática de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área en estudio

El Parque Nacional Pico de Tancítaro se localiza en la parte centro occidente de México, en el oeste del estado de Michoacán, entre las coordenadas 19° 20'00"y 19° 32'00" N, 102° 13'05"y 102° 23'05" W (Figura 1). Es el Área Natural Protegida (ANP) más grande y de mayor elevación

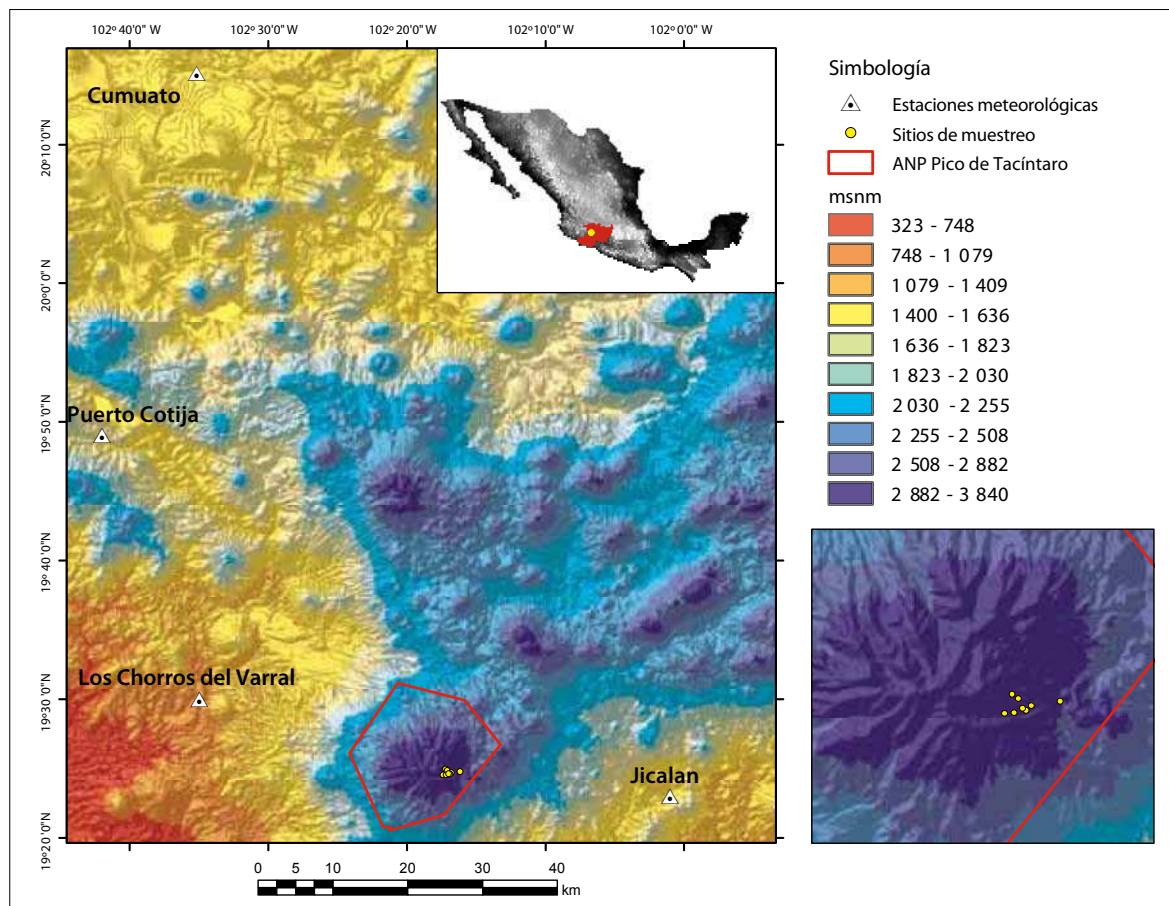


Figura 1. Modelo digital de elevación que muestra la localización geográfica del área en estudio Parque Nacional Pico de Tancítaro y las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis dendroclimático en la región oeste del estado de Michoacán.

del estado, con más de 23 000 ha y un rango altitudinal de 2 200 a 3 860 msnm, enclavada en la cadena montañosa del Eje Neovolcánico Transversal. Comprende los municipios de Tancítaro, San Juan Nuevo Parangaricutiro, Peribán de Ramos y Uruapan (INEGI, 1996).

Etapas de campo

Basándonos en recorridos previos se seleccionaron rodales de *Abies religiosa* en el área en estudio, en los cuales se tomó un total de 42 muestras, 23 de árboles vivos con el apoyo de taladros de Pressler y 19 secciones transversales de árboles muertos (trozas tiradas y tocones) con una motosierra STIHL modelo MS 660 (Figura 2). Las muestras se etiquetaron con información específica del árbol y del sitio para una mejor interpretación de resultados en laboratorio.

Etapas de laboratorio

Las muestras se prepararon para su análisis en el Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA, INIFAP, localizado en Gómez Palacio, Durango, con diferentes grados de lijas (de 120 a 1 200) para resaltar las estructuras de crecimiento anual y facilitar el análisis microscópico. Cada uno de los anillos de crecimiento fue fechado al año exacto de

formación mediante la técnica dendrocronológica estándar denominada “Fechado Cruzado” (Cross Dating, en inglés), principio de la dendrocronología que permite determinar el año exacto de formación de cada anillo con base en la similitud de los patrones de crecimiento, esta técnica es imprescindible cuando las mediciones del ancho de los anillos son comparadas con variables climáticas (Stokes y Smiley, 1995). Cada anillo anual de crecimiento se midió individualmente empleando un sistema de medición VELMEX con precisión de 0.001 mm conectado a una computadora donde se almacenan las bases de datos (Robinson y Evans, 1980).

El fechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983). Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN, al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y luego al dividir cada valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva (Cook y Holmes, 1984). La función utilizada por ARSTAN para la estandarización aplicando el modelo de la curva exponencial negativa es la mencionada por Fritts *et al.* (1969).

$$Q_t = a e^{-bt} + k$$



Figura 2. Recorridos para la selección y toma de muestras de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Pico de Tancítaro (a). Se colectaron muestras de árboles vivos empleando el taladro de Pressler (b) y secciones transversales de árboles caídos y tocones con motosierra (c).

donde:

Q_t = Valor promedio proyectado (amplitud de anillo proyectada al tiempo t).

a , b y k = Coeficiente de regresión estimados para cada especie.

t = Tiempo.

e = Base de logaritmos naturales.

y el ajuste lineal donde b_0 es el intercepto y b_1 es la pendiente es el indicado por Holmes (1994).

$$Q_t = b_0 + b_1 t$$

Al dividir el valor real del ancho del anillo entre el valor correspondiente de la curva o el crecimiento esperado por el modelo, se genera el índice de crecimiento.

$$I = W/Y$$

donde:

I = Índice de ancho de anillo o índice de crecimiento.

W = Ancho de anillo (incremento anual).

Y = Ancho de anillo proyectado.

De esta manera se generó una serie de índices normalizados (cronologías) con media 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987; Fritts, 2001).

La cronología (serie de índices) se comparó con datos regionales de precipitación y temperatura de las estaciones más cercanas al área en estudio, con los registros más completos y considerando una elevación lo más aproximada al área en estudio (Tabla 1). Los datos se extrajeron del programa Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC), (IMTA, 2009). Dado que las estaciones tanto de precipitación (Tabla 1) como las de temperatura, mostraron de manera individual una correlación positiva con la cronología, indicando una variabilidad climática común, se combinaron y se generaron bases de datos regionales para el análisis dendroclimático.

Para determinar la influencia de la variabilidad climática en el crecimiento anual de *Abies religiosa*, se empleó el análisis de "Función de Respuesta", el cual se generó mediante análisis de correlación entre los índices de anillo y los datos observados regionales de precipitación y temperatura, y se verificó con el programa PRECON (Fritts, 1999).

Una vez determinado que la precipitación es la variable climática que más influye en el crecimiento de la especie y el periodo de lluvia más importante (respuesta climática), se generó una ecuación de transferencia entre los datos observados de precipitación y el índice de anillo total empleando el programa STATISTICA Kernel release 5.5 (Stat

Tabla 1. Cronología de anillo total y estaciones meteorológicas empleadas para el análisis dendroclimático

Nombre	Longitud W	Latitud N	Elevación (msnm)	Longitud de cronología	SM ^a	r ^b
Área de trabajo Pico de Tancítaro	102.282	19.410	3000	1884-2010 (127 años)	0.37	0.473
Estaciones Meteorológicas	Longitud W	Latitud N	Elevación (msnm)	Periodo total	Periodo analizado	Núm. Años
Cumuato	102.586	20.253	1524	1951-1999	1979-1995	17
Puerto Cotija	102.700	19.817	1580	1947-1996	1979-1995	17
Los Chorros del Varal	102.583	19.500	930 ^c	1966-1994	1979-1994	16
Jicalan	102.017	19.383	1610	1963-1998	1979-1995	17

^a Sensibilidad Media, porcentaje promedio de los cambios de los índices de la cronología de un año a otro (Fritts, 2001).

^b Correlación promedio entre todas las series de crecimiento ($p < 0.01$).

^c La elevación de la estación Los Chorros del Varal fue corregida con base en el SMN.

Soft Inc., 2000). Con el modelo generado se reconstruyó la precipitación para el periodo común de datos observados, con la subrutina VERYFY5 del paquete de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL por sus siglas en inglés) se desarrollaron las pruebas de calibración y verificación. A la mitad de los datos climáticos, tanto observados como reconstruidos, se les aplicó una prueba de calibración, y a la mitad restante, una de verificación (Fritts, 1991). La calibración permite examinar la relación entre ambas variables, mientras que la verificación tiene como objetivo validar la reconstrucción.

La ecuación de transferencia se validó para el periodo total de datos de precipitación disponibles. Esta ecuación fue utilizada para desarrollar la reconstrucción de precipitación en la longitud total de la serie dendrocronológica. A la serie de alta frecuencia (resolución anual) se le ajustó un Spline cúbico (k-3) con una rigidez de cinco años (baja frecuencia) adecuado para series dendrocronológicas que permite resaltar eventos secos y lluviosos (Cook y Peters, 1981). Los periodos de sequía detectados en la reconstrucción se validaron con documentos históricos y estudios dendrocronológicos desarrollados para el norte y centro de México.

Finalmente se aplicó un análisis espectral a la serie de precipitación reconstruida para por medio de gráficos de densidad espectral *versus* frecuencia, identificar las frecuencias dominantes o recurrencias de anomalías en la serie paleoclimática.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De un total de 42 series de crecimiento (53% de árboles vivos y 47% de árboles muertos y madera semienterrada) de *Abies religiosa*, 25 muestras se lograron fechar al año exacto de su formación. Los resultados de COFECHA indicaron una intercorrelación significativa entre series ($r = 0.473$; $p < 0.01$). Dado que el programa establece para el exacto fechado y calidad de la respuesta climática como mínima correlación significativa entre series de crecimiento $r = 0.3281$ ($p < 0.01$), (Holmes, 1983), se puede concluir que las series de *Abies religiosa* tienen potencial para ser consideradas proxy de la variabilidad climática de la región.

Se generó una cronología o serie de tiempo para los últimos 127 años que cubre el periodo de 1884 a 2010, la cual indica una gran variabilidad interanual y decadal (Figura 3).

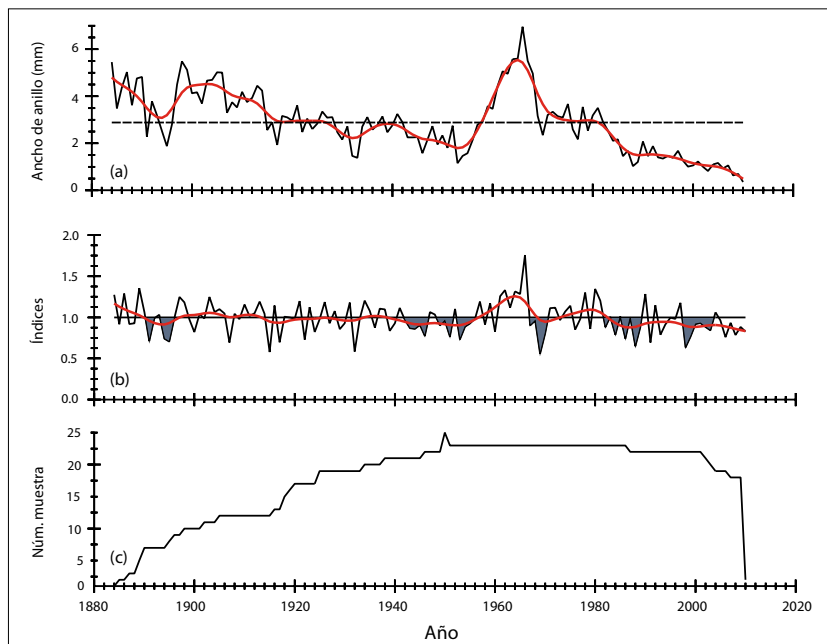


Figura 3. Cronología generada para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, que indica la variabilidad de alta y baja frecuencia durante los últimos 127 años. El gráfico superior (a) muestra la serie promedio de ancho de anillo (mm) con crecimiento exponencial negativo de los árboles por efecto de la edad; (b) es la cronología generada una vez eliminado el efecto de la edad y maximizada la señal climática por medio de estandarización de cada una de las series de crecimiento, que indica la variabilidad ambiental de la región (sequías y eventos húmedos), y (c) el tamaño de muestra para cada uno de los segmentos de la cronología.

Función de respuesta

Al asociar los índices de crecimiento y los registros de precipitación mensual regional para el periodo común 1979-1995, se determinó que la mejor correlación ($r = 0.81$, $p < 0.001$) corresponde al periodo enero-mayo; el de precipitación invierno-primavera es el que influye de manera más significativa en el crecimiento de la especie (Figura 4a). Huante *et al.* (1991) encontraron resultados similares para *Abies religiosa* en la región oriental del estado de Michoacán.

La respuesta del crecimiento de coníferas a la precipitación invernal en México y suroeste de los Estados Unidos de America, ha sido corroborado

por diversos estudios paleoclimáticos (Stahle *et al.*, 1999; Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; Constante *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2009 y 2011b).

Con respecto a la temperatura se encontró una relación significativa ($p < 0.05$) de la temperatura media y mínima de los meses de enero y febrero (Tabla 2), en el crecimiento anual de *Abies religiosa*. Así mismo, la temperatura media y mínima del mes de mayo influye de forma altamente significativa ($p < 0.01$) en el crecimiento anual (Tabla 2). Un estudio exploratorio al oriente del estado de Michoacán para conocer la relación entre el crecimiento de *Abies religiosa* y el clima, reporta

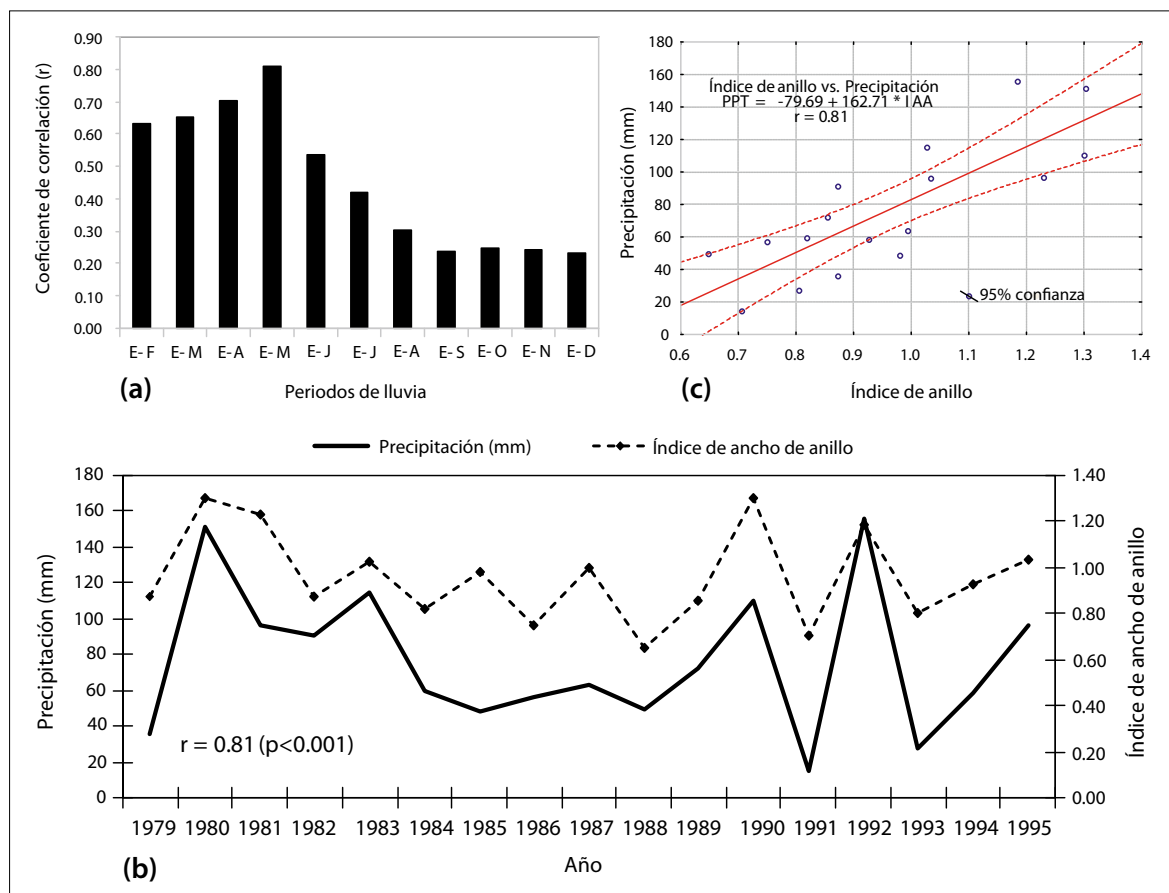


Figura 4. (a) Coeficiente de correlación entre el índice de anillo total y la precipitación regional estacional (Cumuato, Puerto Cotija, Los Chorros del Varal y Jicalan) para el periodo 1979-1995; (b) relación entre la precipitación estacional enero-mayo (mejor correlación) y el índice de anillo total que indica excelente asociación y potencial para desarrollar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la precipitación, y (c) diagrama de dispersión del modelo de regresión lineal generado.

Tabla 2. Coeficiente de correlación entre el índice de ancho de anillo de *Abies religiosa* y la temperatura mensual promedio de las estaciones Cumuato y Jicalan. La TMAX es el promedio máximo diario de temperatura, TMED es el promedio diario de temperatura y TMIN es el promedio mínimo diario de temperatura para el periodo 1952-1999

MES	TMAX	TMED	TMIN
Enero	-0.309*	0.303*	0.372**
Febrero	-0.378**	0.255*	0.292*
Marzo	-0.179	0.087	0.144
Abril	-0.304*	0.090	0.298*
Mayo	-0.241	0.350**	0.450**
Junio	-0.271	0.024	0.093
Julio	-0.072	0.096	0.030
Agosto	-0.030	-0.072	-0.130
Septiembre	-0.065	0.041	0.129
Octubre	-0.154	-0.182	0.028
Noviembre	-0.086	-0.071	-0.043
Diciembre	-0.175	0.059	0.029

* $p < 0.05$

** $p < 0.01$

correlación significativa de la temperatura media y mínima de los meses de enero y febrero sobre el crecimiento anual (Huante *et al.*, 1991). La temperatura invernal influye de manera significativa en el crecimiento de *Abies religiosa*, aunque la precipitación es la principal variable que limita su crecimiento y la lluvia de invierno-primavera representa el periodo más importante.

Reconstrucción de la precipitación

Al relacionar el periodo de lluvia estacional enero-mayo con el índice de ancho de anillo para el periodo común (1979-1995) se observó una relación altamente significativa ($r = 0.81$; $p < 0.001$), (Figura 4b), lo que indica potencial para generar un modelo de regresión y reconstruir la variabilidad de la precipitación invierno-primavera para la longitud total de la cronología (Figura 4c), 127 años.

Calibración y verificación

Aplicado el modelo, se reconstruyó la variabilidad de la precipitación para el periodo común de datos (1979-1995). Al comparar la precipitación

observada y reconstruida (Figura 5a), el modelo se calibró en el subperiodo 1987-1995 y se verificó en el subperiodo 1979-1986 (Tablas 3 y 4).

Los resultados del modelo indican una $r = 0.84$ ($r^2 = 0.71$, $p < 0.05$) entre la precipitación observada y la reconstruida, lo cual explica 71% de la variabilidad de la precipitación para el periodo de calibración. La verificación presentó una $r = 0.77$ y explica 59% ($r^2 = 0.59$, $p < 0.05$) de la variabilidad. La correlación entre el periodo total de precipitación observada y la reconstruida fue de $r = 0.81$ ($r^2 = 0.66$, $p < 0.001$), (Figura 5a).

Debido a que los subperiodos con los cuales se realizó tanto la calibración como la verificación del modelo mostraron una asociación significativa, se utilizó el periodo total de datos climáticos disponibles (1979-1995) para generar la ecuación de reconstrucción, que mostró una $r = 0.81$ ($r^2 = 0.66$, $p < 0.001$), (Tabla 3).

La subrutina VERIFY5 del DPL indicó que tanto la calibración como la verificación pasaron la prueba de significancia ($p < 0.05$) para la correlación, reducción de error, valor de "t" y primera diferencia significativa (Tabla 4). El modelo de regresión obtenido para el periodo 1979-1995 se consideró estadísticamente válido para reconstruir la precipitación en el periodo total de la serie dendrocronológica (1884-2010).

El modelo bivariado utilizado fue el siguiente:

$$Y_t = -79.69 + 162.70 * X_t$$

donde:

Y_t = Valor de la precipitación (mm) enero-mayo para un año específico.

X_t = Índice de anillo total para un año específico.

Variabilidad de la precipitación reconstruida

Se reconstruyó la variabilidad de la precipitación de finales del siglo XIX a la primera década del siglo XXI (127 años, 1884-2010) para el Pico de Tancitaro, Michoacán. La precipitación indica una gran variabilidad interanual y decadal (Figura 5b). Las sequías más intensas reconstruidas para la región oeste del estado de Michoacán, se registraron en los periodos 1890-1896, 1948-1957, 1968-1971, 1982-1989 y 1998-2010, este último representa

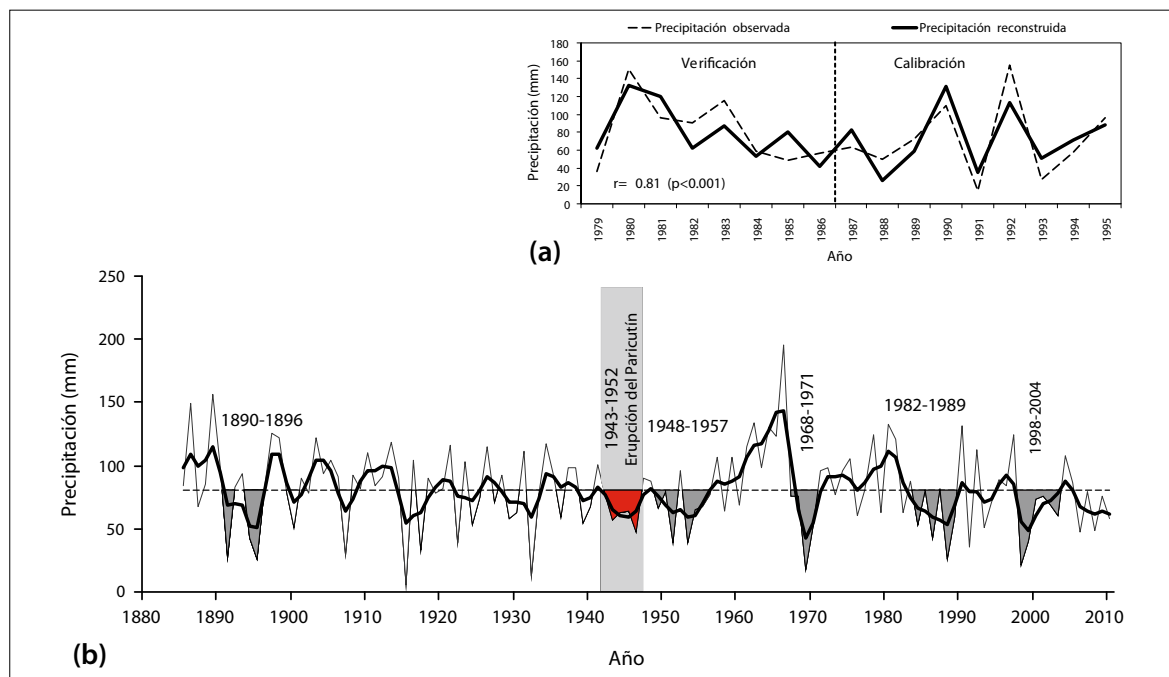


Figura 5. Calibración y verificación del modelo de regresión al comparar la precipitación observada y la reconstruida para el periodo común de datos (1979-1995). (a) Reconstrucción de la variabilidad de la precipitación de los últimos 127 años para el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán, que indica en color oscuro las sequías más severas y en color rojo el efecto de la erupción del volcán Parícutín en las condiciones ambientales de la región, la línea gris de fondo indica la variabilidad anual, la negra representa un spline cúbico con una rigidez de cinco años y la línea punteada representa la media (b).

Tabla 3. Calibración del modelo para la reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (enero-mayo)

Periodo	R^2	Coeficientes		Err. St		Prueba (t)		p	
		a	b	a	b	a	b	a	b
1979-1986	0.59	-66.62	150.97	51.83	51.87	-1.28	2.91	0.246	0.026
1987-1995	0.71	-87.85	169.92	40.49	42.13	-2.16	4.03	0.066	0.004
1979-1995	0.66	-79.69	162.70	29.89	30.53	-2.66	5.32	0.017	0.000

Tabla 4. Pruebas estadísticas de la verificación para la reconstrucción de la precipitación invierno-primavera (enero-mayo)

Periodo	Correlación Pearson (r)	Reducción del error	Valor de (t)	Prueba de signos	Primera diferencia significativa
1979 - 1986	0.77*	0.608*	1.527ns	2ns	2ns
1987 - 1995	0.84*	0.713*	3.502*	1*	0*
1979 - 1995	0.81*	0.654*	3.412*	3*	2*

* = Significativos, $p < 0.05$.

ns = No significativos, $p > 0.05$.

13 años de reducida precipitación donde únicamente el 2004 rebasa la precipitación media (Figura 5b). De igual manera, se reconstruyeron periodos húmedos, el intervalo de tiempo 1960-1966 representa el periodo más húmedo de los últimos 127 años (Figura 5b).

Reconstrucciones paleoclimáticas generadas para el centro de México (Puebla, Tlaxcala, Guanajuato y Querétaro) reportan intensas sequías en periodos similares, en las décadas 1890, 1950, 1970, 1980 y 1990 (Therrell *et al.*, 2006; Cardoza, 2010; Cortés *et al.*, 2010; Stahle *et al.*, 2011). Se observa una misma variabilidad, lo cual se atribuye a que fenómenos climáticos comunes modulan las condiciones climáticas en la región centro de México.

Las sequías de finales del siglo XIX (1890-1896), mediados de siglo XX (1948-1957) y la sequía de finales del siglo XX y principios del XXI (1998-2010), representan intervalos de tiempo con sequías importantes tanto por su extensión en el tiempo como por su intensidad y estragos en la sociedad (Figura 5b).

La sequía reconstruida para la región del Tancítaro a finales del siglo XIX, es un periodo repor-

tado en otros trabajos como sequía severa tanto para el norte de México (Cerano *et al.*, 2011b) como para el centro del país (Escobar, 1997; Therrell *et al.*, 2006) con fuertes estragos sobre la agricultura.

A diferencia de los trabajos paleoclimáticos generados para el centro del país, los anillos de crecimiento de *Abies religiosa* en el Pico de Tancítaro muestran una fuerte disminución en crecimiento en la década de 1940 (Figuras 5b y 6). Lo anterior puede confundirse con una disminución en la lluvia, sin embargo, esto es consecuencia de la erupción del volcán Parícutín (situado a 10 km al NW de la cima del Tancítaro), que estuvo activo en 1943-1952, con mayor actividad en 1943-1948, provocando una supresión en el crecimiento y cambios en la estructura anatómica de los anillos de anuales (Figura 6). Esto mismo fue observado en anillos de crecimiento de pino de la misma zona por Sheppard *et al.* (2008).

La sequía de mediados del siglo XX, que para la región de Tancítaro se observa entre 1948 y 1957, se considera como una de las sequías más intensas registrada desde el sur de Estados Unidos (Stahle

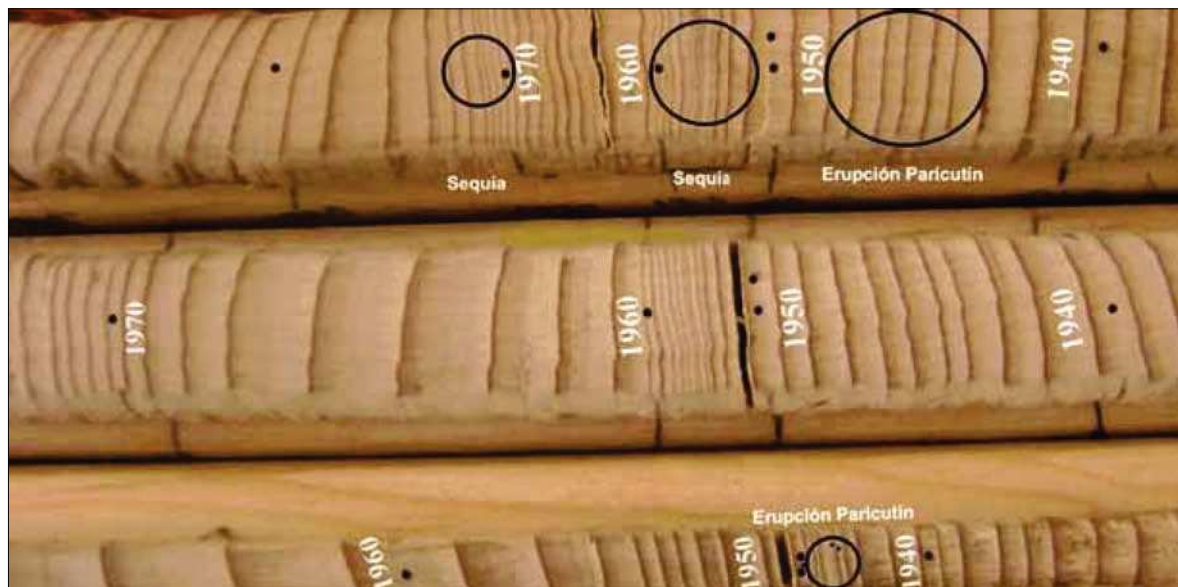


Figura 6. Crecimientos anuales de *Abies religiosa* que permiten observar la variabilidad en el crecimiento anual a consecuencia de la variabilidad ambiental. Se advierte una reducción en el crecimiento de 1943-1948 como efecto de la erupción del volcán Parícutín, así como una fuerte supresión en el crecimiento en las décadas de 1950 y 1970 como consecuencia de las severas sequías que asolaron la región.

y Cleaveland, 1988), norte (Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano *et al.*, 2011a) y centro de México (Therrell *et al.*, 2006; Cardoza, 2010; Stahle *et al.*, 2011). De igual manera, historiadores reportan este periodo como intensa sequía a nivel nacional, propiciando en particular para la región norte del país, un incremento significativo de la migración a los Estados Unidos (Florescano, 1980; Figura 5b).

Otro periodo que es importante destacar por su efecto en la región es la sequía de 1968-1971 (Figura 5b), fuerte sequía que se acompañó de un severo ataque de defoliadores sobre los bosques de la región que magnificó la disminución en los incrementos anuales (Méndez y Tovar, 1985). Huante *et al.* (1991) reportan bajos índices de crecimiento en anillos de *Abies religiosa* en el oriente de Michoacán durante el mismo periodo.

La sequía registrada en 1998-2010, representa 13 años de una progresiva disminución en las condiciones de lluvia en la región. Para el siglo XX y principios del siglo XXI, las sequías de los años cincuenta y 1998-2010 son los eventos extremos (sequías) más severos para la región de Tancítaro en los últimos 127 años.

Basados en datos instrumentales como precipitación, temperatura y el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés), Stahle *et al.* (2009) indican que las sequías más intensas que han asolado el sur de los Estados Unidos y la mayor parte de México durante el siglo XX y principios del siglo XXI, se registraron en la década de los cincuenta y en el periodo 1999-2004, cuyos efectos tuvieron una intensidad e impacto sobre la sociedad muy similar.

Frecuencias importantes

Los gráficos de densidad espectral *versus* frecuencia, permiten observar las frecuencias dominantes de las anomalías en la serie dendroclimática (Figura 7). La Figura 7 presenta información útil sobre las frecuencias significativas ($p < 0.05$) contenidas en la serie analizada, pero no indica en qué tiempo ocurrieron dichas frecuencias.

Para la región de Tancítaro se identificaron importantes frecuencias significativas ($p < 0.05$) en la serie dendroclimática, ciclos de 3.6, 5.5, 7, 10, 11, 16, 18, 21, 25 y 42 años (Figura 7). La variabilidad

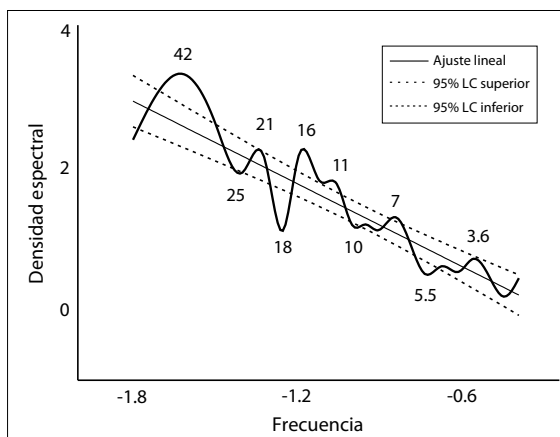


Figura 7. Gráfico de densidad espectral de la variabilidad de la precipitación reconstruida para la región del Tancítaro, Michoacán, México, que indica frecuencias significativas ($p < 0.05$) de eventos extremos.

climática reconstruida, cuyas frecuencias se observan entre 3.7 a 7 años, puede estar relacionada con la variabilidad del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) que presenta un ciclo errático de dos a siete años (MacMynowski y Tziperman, 2008). Las frecuencias de 42 años ($p < 0.05$) se relacionan con la recurrencia de sequías intensas para la región de Tancítaro, Michoacán, dado que las sequías más importantes se observan para los periodos 1891-1896, 1942-1956 y 1998-2010, que presentan un intervalo de recurrencia aproximado de 42 a 43 años.

Un estudio reciente sobre la recurrencia de sequías para el norte de México, determinó que en los últimos 600 años el norte del país se ha visto afectado por fuertes sequías con intervalos de 50 años aproximadamente, cada finales e inicios de siglo y mediados de siglo (Cerano *et al.*, 2011a). Las sequías más severas reconstruidas para la región de Tancítaro (1890-1896, 1948-1957 y 1998-2010) presentan una temporalidad similar, indicando una misma variabilidad, lo que puede atribuirse a que fenómenos climáticos comunes en periodos específicos modulan la variabilidad climática a gran escala (norte y centro de México).

CONCLUSIONES

La reconstrucción de precipitación generada representa la primer serie dendroclimática para la región del Pico de Tancítaro, en el occidente de Michoacán, que ha permitido analizar la variabilidad de la precipitación a nivel anual y decadal de los últimos 127 años. Se reconstruyeron fuertes sequías para los periodos 1890-1896, 1948-1957, 1968-1971, 1982-1989 y 1998-2010. El intervalo de tiempo 1960-1966 representa el periodo más húmedo de los últimos 127 años. Las sequías más severas para esta región (1890-1896, 1948-1957 y 1998-2010) se han reportado en otros trabajos paleoclimáticos tanto para el centro como para el norte del país, lo que indica que fenómenos climáticos de circulación general en periodos específicos afectan a gran escala.

La serie dendroclimática muestra frecuencias significativas ($p < 0.05$) de 3.6 a 7 años, que pueden estar relacionadas con la variabilidad del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur que presenta un ciclo errático de dos a siete años. Las sequías más severas para la región de Tancítaro, Michoacán (1891-1896, 1942-1956 y 1998-2010) presentan una recurrencia aproximada de 42 a 43 años, eventos relacionados con las frecuencias dominantes de 42 años ($p < 0.05$) y con una cobertura a gran escala.

Es importante considerar la frecuencia significativa de eventos extremos (sequías) para una mejor planeación del recurso agua, vital para el desarrollo económico de esta región. De igual manera y no menos importante, es necesario considerar que durante la segunda mitad de siglo XX las sequías se registraron con mayor frecuencia y amplitud, propiciando mayores estragos sobre la sociedad y mayor presión sobre el recurso agua.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento otorgado por los fondos SEP-CONACYT a través del proyecto “Estudio de la relación clima-incendios en el norte-centro de México” y el 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”.

REFERENCIAS

- Cardoza, M. G. F. (2010), *Reconstrucción de precipitación anual empleando métodos dendrocronológicos, para Santa María de las Cuevas, Tlaxcala, México*, tesis de Maestría, Facultad de Agricultura y Zootecnia, UJED.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva Díaz, P. Z. Fulé, J. G. Arreola Ávila, I. Sánchez Cohen y R. D. Valdez Cepeda (2009), “Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México”, *Madera y Bosques*, vol. 15, núm. 2, pp. 27-44.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva Díaz, R. D. Valdez Cepeda, J. Méndez González y V. Constante García (2011a), “Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México”, *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp. Núm. 2*, pp. 235-249.
- Cerano Paredes, J., J. Villanueva Díaz, R. D. Valdez Cepeda, E. H. Cornejo Oviedo, I. Sánchez Cohen y V. Constante García (2011b), “Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila”, *Rev. Mex. Cienc. For.* vol. 2, núm. 4, pp. 33-46.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva Díaz and B. T. Burns (2003), “Tree-ring reconstructed winter precipitation in Durango, Mexico”, *Climatic Change*, no. 59, pp. 369-388.
- CNA (2002), *Compendio básico del agua*, Comisión Nacional del Agua, México.
- Constante García, J., J. Villanueva Díaz, J. Cerano Paredes, E. H. Cornejo Oviedo y S. Valencia Manzo (2009), “Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucciones de precipitación estacional para el sureste de Coahuila”, *Rev. Cien. For.*, vol. 34, núm. 106, pp. 17-39.
- Cook, E. R. and K. Peters (1981), “The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies”, *Tree-Ring Bulletin*, no. 41, pp. 45-53.
- Cook, E. R. and R. H. Holmes (1984), *Program ARSTAN and users manual*, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Cook, E. R. (1987), “The decomposition of tree-ring series for environmental studies”, *Tree-Ring Bulletin*, no. 47, pp. 37-59.
- Cortés, B. E. N., J. Villanueva Díaz, J. Estrada Ávalos, C. N. Pascual Pola, V. Guerra De la Cruz y O. Vázquez Cuecuecha (2010), “Utilización de *Taxodium mucronatum* ten. para determinar la variación estacional de

- la precipitación en Guanajuato”, *Rev. Mex. Cien. For.*, vol. 1, núm. 1, pp. 113-121.
- Díaz Castro S., M. D. Therrell, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland (2002), “Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992”, *Climate Research*, no. 22, pp. 237-244.
- Escobar Ohmstede, A (1997), “Las sequías y sus impactos en la sociedad del México decimonónico, 1856-1900”, en García, A. V. (coord.), *Historia y desastres en América Latina*, volumen II, LA RED, pp. 191-213.
- Florescano Mayet, E. (1980), *Análisis histórico de las sequías en México*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México.
- Fritts, H. C., J. E. Mosimann and C. P. Bortorff (1969), “A revised computer program for standardizing tree-ring series”, *Tree Ring Bulletin*, no. 29, pp. 15-20.
- Fritts, H. C. (1976), *Tree-rings and climate*, Academic Press, New York.
- Fritts, H. C. (1991), *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*, University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Fritts, H. C. (1999), “An empirical model of the tree-ring response to monthly variations in climate”, *Laboratory of Tree-Ring Research*, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Fritts, H. C. (2001), *Tree-rings and climate*, Blackburn Press, Caldwell, NJ.
- Fuentes, J. y G. Bocco (2003), “El agua: dinámica y análisis regional”, Capítulo 6, en Velázquez, A., A. Torres y G. Bocco (comps.), *Las enseñanzas de San Juan, Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*, INE-SEMARNAT, México, pp. 95-125.
- Holmes, R. L (1983), “Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement”, *Tree-Ring Bulletin*, no. 43, pp. 69-78.
- Holmes, R. L (1994), *Dendrochronology Program Library. Users Manual*, Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Huante, P., E. Rincón and T. W. Swetnam (1991), “Dendrochronology of *Abies religiosa* in Michoacán, Mexico”, *Tree-Ring Bulletin*, no. 51, pp. 15-27.
- IMTA (2009), *Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC)*, Software, Jiutepec, Morelos, México.
- INEGI (1996), *Anuario Estadístico del Estado de Michoacán*, INEGI-Gobierno del Estado de Michoacán, México.
- INEGI-SEMARNAP (1997), *Estadísticas del Medio Ambiente. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente*, Instituto de Estadística, Geografía e Informática, México.
- MacMynowski, D. G. and E. Tziperman (2008), “Factors affecting ENSO’s period”, *J. Atmosph. Sci.*, no. 65, pp. 1570-1586.
- Méndez, J. T. and D. C. Tovar (1985), “Impacto del ataque de *Zadiprion vallicola*, defoliador de los pinos, sobre el incremento de diámetro de *Pinus montezumae*, en la Meseta Tarasca”, *Memoria de los Simposium Nacionales de Parasitología Forestal II y III*, Publicación Especial No. 46, Sociedad Mexicana de Entomología, México, pp. 249-255.
- Ortiz, R. G., F. Cruz y J. C. Valencia (1998), “Aspectos relevantes de la política del agua en México, en el marco de desarrollo sustentable”, *Conferencia Internacional Agua y Desarrollo Sostenible*, París, Francia.
- Robinson, W. J. and R. Evans (1980), “A microcomputer-based tree-ring measuring system”, *Tree-Ring Bulletin*, no. 40, pp. 59-64.
- Sheppard, R. P., M. H. Ort, K. C. Anderson, M. D. Elson, L. Vázquez Selem, A. W. Clemens, N. C. Little and R. J. Speakman (2008), “Multiple dendrochronological signals indicate the eruption of Parícutín Volcano, Michoacán, Mexico”, *Tree-Ring Research*, vol. 64, no. 2, pp. 97-108.
- Stahle, D. W. and M. K. Cleaveland (1988), “Texas drought history reconstructed and analyzed from 1698 to 1980”, *Climate*, no.1, pp. 59-74.
- Stahle, D. W., M. K. Cleaveland, M. D. Therrell and J. Villanueva Díaz (1999), “Tree-ring reconstruction of winter and summer precipitation in Durango, Mexico, for the past 600 years”, *10th Conference of Global Change Studies. American Meteorological Society, 79th Annual Meeting*, January 10-15, Dallas, Texas, pp. 205-211.
- Stahle, W. D., E. R. Cook, J. Villanueva Díaz, F. K. Fye, D. J. Burnette, D. Griffin, R. Acuña Soto, R. Seager and R. R. Heim (2009), “Early 21st Century Drought in Mexico”, *EOS*, vol. 90, no. 11, pp. 89-90.
- Stahle, D. W., J. Villanueva Díaz, D. J. Burnette, J. Cerano Paredes, R. R. Heim Jr., F. K. Fye, R. Acuña Soto, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland and D. K. Stahle (2011), “Major Mesoamerican droughts of the past millennium”, *Geophysical Research Letters*, vol. 38, L05703, pp. 1-4.
- Stat Soft Inc (2000), *STATISTICA Kernel release 5.5 A Copyright © 1984-2000*.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley (1995), *An Introduction to Tree-Ring Dating*, University of Arizona Press, Tucson.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, J. Villanueva Díaz, E. Cornejo Oviedo and M. K. Cleaveland (2006), “Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474-2001”, *Climatic Change*, no. 74, pp. 493-504.
- Toledo, A (2006), *Agua, hombre y paisaje*, INE-SEMARNAT, México.

Torres, A. y G. Bocco (1999), “Cambio de uso de suelo por cultivo de aguacate en la Meseta Tarasca, Michoacán para los años de 1970 y 1990/92”, en Bocco, G. y M. Mendoza, *Evaluación de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo en Michoacán (1975-*

1995), Lineamientos para la Ordenación Ecológica de su Territorio, Programa SIMORELOS-CONACYT, Informe Técnico, Departamento de Ecología de los Recursos Naturales-Instituto de Ecología, UNAM, Campus Morelia, Michoacán, México.