

RECONSTRUCCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ESTACIONAL PARA EL BARLOVENTO DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL CON ANILLOS DE CRECIMIENTO DE *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

José Villanueva Díaz¹, Peter Z. Fulé², Julián Cerano Paredes¹,
Juan Estrada Ávalos¹ e Ignacio Sánchez Cohen¹

RESUMEN

El noroeste de México es una región de vanguardia en aspectos agrícolas pero con alta dependencia del agua de escurrimiento y de los acuíferos, cuya fuente de recarga son las cuencas hidrológicas de la Sierra Madre Occidental. Estudios paleoclimáticos para determinar la variabilidad hidroclimática son escasos en esta región. Se desarrollaron cronologías de madera temprana de 531 años (1472–2002) y 554 años (1449–2002) de extensión de *Pseudotsuga menziesii* para bosques templados en cuencas que drenan hacia la Planicie Costera del Pacífico; se generaron para Tutuaca, Chihuahua y El Cócono, Guanaceví, Durango, respectivamente, y son muy sensibles a la precipitación estacional acumulada invierno-primavera (octubre–mayo). Las reconstrucciones se asemejan entre sí ($r = 0.61$, $p < 0.00001$; período 1472–1999) e indican episodios secos que afectaron a esta región y que se presentaron con una intensidad y duración igual o superior a las sequías del siglo XX. Las más severas y prolongadas se verificaron en las décadas de 1560, 1700 y 1770 y algunas de ellas han sido reportadas en archivos históricos por producir hambrunas y epidemias generalizadas. El impacto de la fase cálida de ENSO en esta región de México incrementa la precipitación y la fase fría la disminuye, aunque este efecto no ha sido constante a través del tiempo, como lo confirma la relación existente entre precipitación reconstruida e Índice de Lluvia Tropical. La elaboración de un mayor número de cronologías es importante para conocer la variabilidad hidroclimática, especialmente la de verano, de mayor relevancia hidrológica en esta zona.

Palabras clave: Dendrocronología, ENSO, madera temprana, *Pseudotsuga menziesii*, sequía, Sierra Madre Occidental.

Fecha de recepción: 12 de marzo de 2008.

Fecha de aceptación: 16 de febrero de 2009.

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria - Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA), INIFAP. Correo-e: villanueva.jose@inifap.gob.mx

² Instituto de Restauración Ecológica, Facultad Forestal, Universidad del Norte de Arizona.

ABSTRACT

Northwest Mexico is a leader region in terms of agriculture, but is highly dependant on aquifers and on surface water from watersheds of the Sierra Madre Occidental draining toward the Pacific. Paleoclimate studies to determine historical hydroclimate variability are rare in this region. Two earlywood chronologies of *Pseudotsuga menziesii* were developed for mixed-conifer stands in the Sierra Madre Occidental. One of them is 531 years in length (1472–2002) and is located in Tutuaca, Chihuahua; the second one located in El Cócono, Guanaceví, Durango, is 554 years length (1449–2002). The earlywood chronologies are significantly related to the seasonal winter-spring precipitation (October–May) and respond similarly ($r = 0.61$, $p < 0.00001$; period 1472–1999) to precipitation. They detect drought periods of greater intensity than those witnessed during the 20th century. The most intensive and prolonged drought episodes were reconstructed for the 1560s, 1700s, and 1770s. Historical archives indicate that some of these droughts were related to famine and epidemic outbreaks. The warm phase of ENSO has a strong signal in this region and produces above normal precipitation, whereas the cold phase is related to drought. Moreover, the ENSO signal is not stable and changes through time as indicated by the correlation between precipitation and the Tropical Rainfall Index. The development of a greater number of tree-ring chronologies is basic to understand the hydroclimate variability of the warm season (summer), which is of greater hydrological importance.

Key words: Dendrochronology, ENSO, earlywood, *Pseudotsuga menziesii*, drought, Sierra Madre Occidental.

INTRODUCCIÓN

El clima de las regiones norte y noroeste de México se clasifica como semiárido debido a la presencia de los desiertos Chihuahuense y Sonorense, lo que implica que por esta característica ecofisiográfica, dicha región tan extensa de México sólo reciba una precipitación anual que en promedio no sobrepasa los 350 mm en el semidesierto y de 800 a 1,000 mm en partes elevadas de la Sierra Madre Occidental (SMO). Este macizo montañoso constituye la fuente principal de agua para asentamientos humanos que se ubican tanto en la Planicie Costera del Pacífico como en la Altiplanicie del Desierto Chihuahuense, con una población de casi seis millones de habitantes tan solo para los estados de Chihuahua y Sonora. Sin embargo, ha sufrido un fuerte deterioro a consecuencia de cambios en el uso del suelo, es decir, aprovechamientos forestales desmedidos, sobrepastoreo, apertura de áreas agrícolas, explotaciones mineras e incendios de origen antropogénico, lo que ha impactado el ciclo hidrológico y se ha traducido en problemas de erosión hídrica,

disminución de recarga de acuíferos, problemas de calidad de agua y pérdida de biodiversidad, entre otros (Comisión Nacional del Agua, 2007).

En los últimos años, el problema de disponibilidad de agua se ha incrementado de manera notoria en los estados de Nayarit, Sinaloa y Sonora. Aquí, más del 90% es utilizada para irrigar una superficie agrícola cercana a 1×10^6 ha, que procede de presas construidas a lo largo de los principales cauces de la vertiente occidental (barlovento) de la SMO que drenan hacia la Planicie Costera del Pacífico, así como de pozos profundos que se han perforado en el lugar para paliar el déficit de la última década y muchos de los cuales, por su excesiva extracción y abatimiento, muestran problemas serios de intrusión de agua salina y, por ende, de su limitada calidad para usos agrícolas; caso concreto son los acuíferos de Caborca, Guaymas y Costa de Hermosillo, Sonora. Menos del 10% del total de agua se destina a uso público e industrial, por lo que el conflicto entre el sector agrícola y un sector urbano cada vez más creciente, se ha acentuado, de tal forma que en ciudades como Hermosillo, las autoridades municipales han adoptado medidas estrictas para ahorrar este vital líquido (Stratus Consulting Incorporation-UNAM-Colegio de Sonora, 2004).

En la última década, el aumento poblacional e industrial en el noroeste de México aunado a la presencia de condiciones climáticas anómalas, ha provocado una disminución significativa en la precipitación y, en consecuencia, en la captación de agua en las presas y, por lo tanto, en su disponibilidad. De esta forma en el año 2001, este recurso fue declarado por el gobierno mexicano como tema de seguridad nacional (Comisión Nacional del Agua, 2007).

El calentamiento global y su impacto en el ciclo hidrológico son temas de gran relevancia, que demandan información detallada de la variabilidad hidroclimática pasada para entender e interpretar su comportamiento actual y contar con las herramientas técnicas para hacer inferencias futuras. Sin embargo, para modelar la disponibilidad del agua bajo diversos escenarios climáticos es necesario tener un conocimiento previo del comportamiento histórico del clima, así como cuantificar la influencia de patrones circulatorios que lo han afectado. Esto no puede derivarse exclusivamente de los datos climáticos instrumentales existentes, que por su corta extensión (<70 años) y calidad dudosa (datos faltantes, incongruencias, etc.), restringen su uso para generar antecedentes confiables que permitan inferir su futuro.

Los anillos de árboles constituyen la fuente “proxy” más apropiada de resolución anual para entender el clima ancestral, pues su crecimiento anual está influenciado por las condiciones ambientales dominantes durante la formación de los mismos.

Estudios dendroclimáticos en esta región de México han sido muy limitados en tiempo y espacio (Villanueva y McPherson, 1999; Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003), por lo que el objetivo de este estudio es generar cronologías de anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, de especímenes ubicados en ecosistemas de bosque mixto de la SMO y utilizarlos como “proxy” de la precipitación de los últimos 500 años para el parteaguas de las cuencas que drenan hacia la Planicie Costera del Pacífico y que son la fuente de agua para una superficie de riego que se aboca en gran medida a una agricultura de exportación. Esta información coadyuvará a determinar la variabilidad hidroclimática histórica de alta (anual) y baja frecuencia (decenal), presencia de eventos climáticos extremos, su ciclicidad en el tiempo e impacto de patrones de circulación atmosférica que han afectado la disponibilidad de agua en esta región. Con fundamento en lo anterior, se plantea la hipótesis de que el conocer esta variabilidad climática histórica permitirá el desarrollo de acciones tendientes a formular planes de manejo que coadyuven a un uso sustentable de los recursos hídricos en esta zona de alta productividad agrícola de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

Los sitios de interés se ubican en el parteaguas de las cuencas de la SMO que drenan hacia la Planicie Costera del Pacífico. Uno de ellos está en el área natural protegida Tutuaca o Bisaloachi, municipio de Temosachi, al oeste de Chihuahua (28° 39.72' N, 108° 17.43 W; 2,744 m) y uno más en el ejido El Cócono, municipio de Guanaceví, Durango (25 57.06' N, 106 21.36' W; 1,950 m) (Figura 1). La vegetación corresponde a un bosque mixto con un estrato dominante arbóreo de *Pinus durangensis* C.A. Ehrenb., *Pinus arizonica* Engelm, *Pinus ayacahuite* C.A. Ehrenb., *Pseudotsuga menziesii*, oyamel (*Abies durangensis* Martínez), madroño (*Arbutus xalapensis* Kunth.) y diversas especies de encino (*Quercus* spp). En el sotobosque se observa una gran variedad de especies arbustivas y herbáceas (González *et al.*, 2007).

El suelo es somero, rocoso y de origen volcánico con dominancia de material riolítico (riolitas, tobas ácidas, basaltos) y rocas piroclásticas, con una profundidad del primer horizonte que en general no sobrepasa los 20 cm, a excepción de sitios bajos y valles donde la profundidad de suelos de acarreo (aluvión) es notoria (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 1999a; 1999b).

El clima se clasifica como templado, semifrío y subhúmedo con lluvias de verano y de humedad media, tipo C(E)(w,) con un intervalo entre 500 y 800 mm anuales

de precipitación y una temperatura media anual de 5 a 12°C (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2003). En el pasado, estos rodales fueron aprovechados selectivamente, lo que permitió conservar especímenes arbóreos en partes del bosque de difícil acceso. Ahí muchos de los árboles de *Pseudotsuga* superan los 300 años de edad y en un paraje del ejido El Cócono se detectaron ejemplares vivos de 550 años, situación que es de suma importancia para definir la esperanza de vida de esta especie y para extender en el tiempo las cronologías de anillos de árboles existentes.

Los incendios también son un factor común que ha modificado la estructura y biodiversidad del área e históricamente se presentaron a intervalos medios de frecuencia de 3.9 a 5.2 años, aunque esta temporalidad ha declinado marcadamente en los últimos 50 años debido a cambios en el uso del suelo, supresión de incendios, muchos de ellos de origen antropogénico (Fulé *et al.*, 2005; Cerano, 2008; Drury y Veblen, 2008).

Una característica especial de estos sitios es que constituye hábitat de anidamiento de la cotorra o guacamaya serrana (*Rhynchopsitta pachyrhyncha* Swainson, 1827), especie catalogada en peligro de extinción (Lammertink *et al.*, 1996; Monterrubio-Rico y Enkerlin-Hoeflich, 2004).

Métodos utilizados

En los meses de noviembre de 2002, mayo y noviembre de 2003, en parajes de bosque mixto de la SMO al oeste de Chihuahua y noroeste de Durango, en cuencas hidrológicas que drenan hacia la planicie costera del Océano Pacífico, se muestrearon especímenes de *Pseudotsuga menziesii*, especie considerada de alta sensibilidad climática.

De cada árbol seleccionado, se extrajeron de dos a tres virutas (núcleos de crecimiento) por árbol a la altura del pecho, perpendicular a la pendiente, en lados opuestos al fuste y con el apoyo de un taladro de Pressler; así mismo, con motosierra se obtuvieron tramos transversales de tocones, árboles muertos o de madera semienterrada (subfósil) en el piso forestal.

Los núcleos de crecimiento se identificaron, montaron y pegaron en secciones acanaladas de madera para facilitar su manejo; posteriormente se les pulió intensamente con lija de diferente calibre, de grueso a fino (granos 120, 220, 360 y 400); el mismo procedimiento de pulido se aplicó a las secciones trasversales para resaltar sus estructuras de crecimiento.

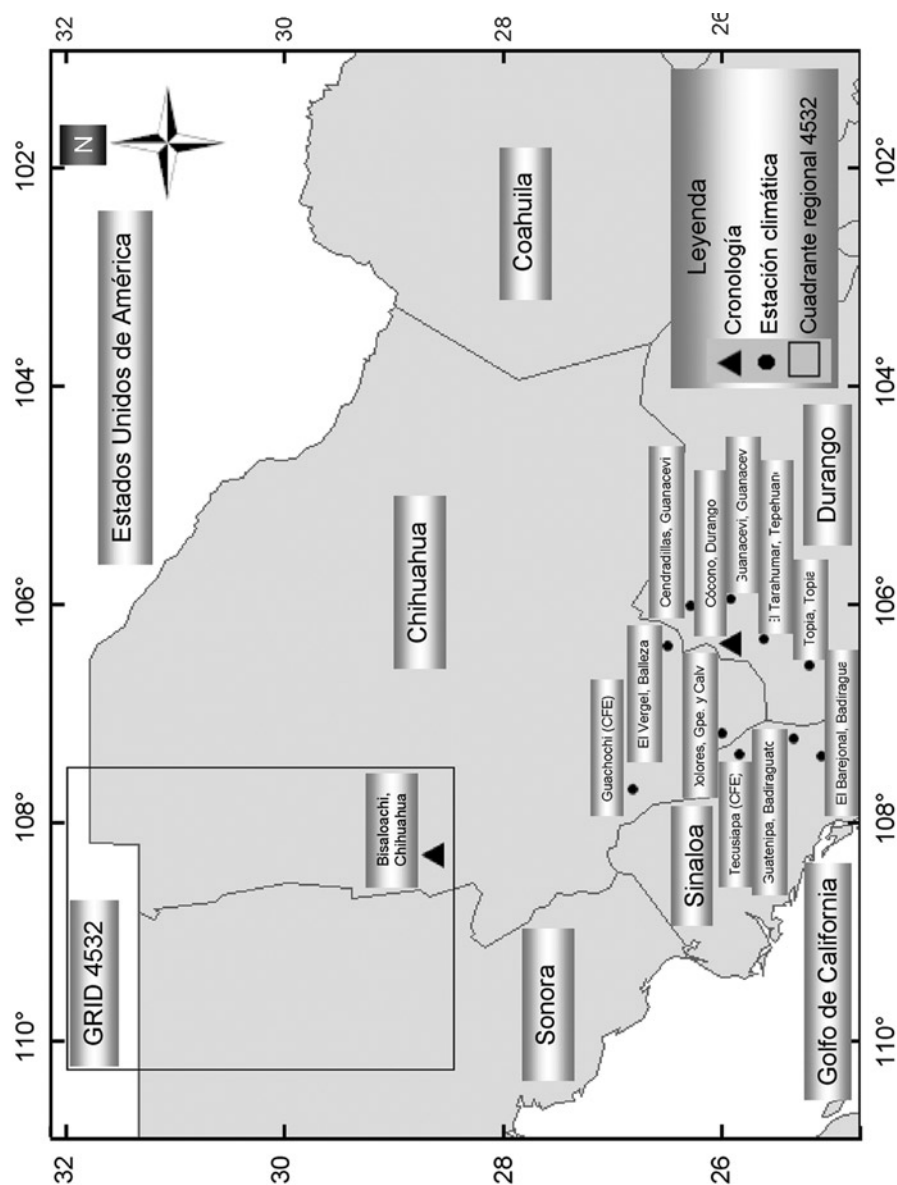


Figura 1. Distribución de los sitios de muestreo de *Pseudotsuga menziesii* en la Reserva de Flora y Fauna Silvestre Tutuaca, Bisaloachi, Chihuahua y el Cónico, Guanajuato, Durango.

En el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP y con el apoyo de un estereomicroscopio trinocular de alta resolución marca Olympus Corporation, modelo SZ2-IST y técnicas dendrocronológicas estándar, los anillos se contaron y fecharon al año exacto de su formación (Stokes y Smiley, 1968). La técnica del fechado cruzado o cofechado para determinar el año de formación de cada crecimiento, consistió en la identificación de patrones comunes de la variación interanual de los anillos de crecimiento, que se repiten de una muestra a otra, de tal forma, que a cada uno se le asignó una fecha exacta de formación.

Posterior al fechado de las muestras, cada anillo anual se dividió de forma visual en bandas de madera temprana (EW, siglas en Inglés) y de madera que se caracteriza por poseer células relativamente grandes, blanquecinas con pared celular delgada y grandes vacuolas; madera tardía (LW, siglas en Inglés), constituida por células más pequeñas, de pared lignificada y mayor densidad, lo que les confiere una coloración oscura, así como anillo total que integra tanto a la madera temprana como a la tardía (RW, siglas en Inglés) (Cleaveland, 1986).

Las bandas o secciones de crecimiento se midieron de modo individual con un sistema de medición VELMEX y en el caso de existir un anillo falso (anillo doble anual), la medición del inicio de la madera tardía se consideró a partir de la segunda banda de crecimiento falso (Cleaveland, 1988). El cofechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo se verificó con el programa COFECHA, el cual correlaciona períodos de 50 años con traslape entre ellos de 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Las tendencias biológicas (competencia, supresión, liberación) y geométricas (incremento en el área de fuste con la edad) no relacionadas con el 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. Esto creó una serie de índices normalizados (cronologías) con media de 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987).

Para determinar la influencia del clima en el crecimiento estacional de la cronología de *Pseudotsuga* del sitio Bisaloachi, Chihuahua se utilizó el cuadrante de precipitación regional "4532" que incluye parte de las estaciones climáticas ubicadas al noroeste de Chihuahua y al este de Sonora (Hulme *et al.*, 1998). Por otra parte, la cronología de El Cócono se comparó con datos promedio mensual de una precipitación regional que integra varias estaciones climáticas enclavadas en los límites fronterizos de los estados de Chihuahua, Durango y Sinaloa, dentro de la SMO.

La relación climática entre precipitación y crecimiento anual se investigó con la subrutina “Análisis de Función de Respuesta” (RESPO) incluida en el paquete de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés). Posteriormente, con la subrutina VERYFY5 (Calibración–Verificación) del paquete DPL, a la mitad de los datos climáticos disponibles se les aplicó una calibración entre la cronología y los registros estacionales de lluvias, con la mitad restante, se corrió una verificación (Fritts, 1991). Al final se obtuvo una ecuación de transferencia para el período total de datos disponibles de precipitación, que fue incorporada para desarrollar la reconstrucción de precipitación en la longitud total de las cronologías.

A las series de alta frecuencia (resolución anual) se les ajustó una curva decenal flexible (baja frecuencia) para resaltar eventos secos o húmedos presentes en las reconstrucciones (Cook y Peters, 1981). La semejanza entre ellas se analizó al correlacionar su período común y para subperíodos de 50 años. Los períodos de sequía detectados en las reconstrucciones, se validaron con documentos históricos en la medida de lo posible.

Para analizar el impacto de patrones atmosféricos circulatorios en la variabilidad hidroclimática de la región, se aplicó el Índice de Lluvia Tropical (TRI, siglas en inglés). Este índice constituye un estimativo de la variabilidad de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en Inglés) al usar anomalías de precipitación en la parte central del Pacífico y que se considera más estable que el índice de diferencias de presión Tahiti-Darwin (Wright, 1979).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Reconstrucción de la precipitación

Cronologías de madera temprana, tardía y anillo total de *Pseudotsuga menziesii* con una extensión de 531 años (1472–2002) y 554 años (1449–2002) se generaron para el Área Natural Protegida Tutuaca y El Cócono, respectivamente. Las cronologías muestran una sensibilidad climática alta, lo que es característico de coníferas como *Pseudotsuga* en estas latitudes del norte de México (Stahle *et al.*, 2000a) (Cuadro 1).

La función de respuesta entre las series de cronologías (EW, LW, RW) producidas para el sitio Bisaloachi, Chihuahua y los datos climáticos instrumentales indicó que sólo la cronología EW produjo una correlación significativa ($p < 0.05$) con datos climáticos de los meses de noviembre del año previo y febrero, marzo y abril del año actual de crecimiento y de manera estacional para el período de octubre

Cuadro 1. Estaciones climáticas y cronologías EW usadas en este estudio.

Nombre	Latitud °N	Longitud °W	Altitud (m)	Período	Datos disponibles (%)		
Estaciones climáticas							
Dolores, Guadalupe y Calvo, Chih.	26.00	107.18	885	1957-98	90.3		
Guachochi, Chih.	26.82	107.70	1320	1953-98	95.4		
El Vergel, Balleza, Chih.	26.50	106.38	2240	1961-2003	73.6		
Cendradillas, Guanaceví, Dgo.	26.30	106.02	2500	1961-2003	94.1		
El Tarahumar, Tepehuanes, Dgo.	25.62	106.32	2435	1964-2004	99.7		
Guanaceví, Guanaceví, Dgo.	25.93	105.95	2300	1922-2004	98.6		
Topia, Topia, Dgo.	25.20	106.57	1770	1947-85	97.0		
El Barejonal, Badiraguato, Sin.	25.10	107.40	122	1961-2001	98.2		
Guatenipa, Guadiraguato, Sin.	25.35	107.23	-----	1964-2001	99.8		
Tecusiapa, Sin.	25.85	107.38	640	1961-93	93.8		
Cuadrante regional 4532 (noroeste de Chihuahua y noreste de Sonora)	28.5 - 32	107.5 - 110.2	----	1900-98	100		
Cronologías EW de anillos de árboles							
Nombre	Latitud °N	Longitud °W	Altitud (m)	Período	No. de Árboles/ radios	SMA	Promedio
Bisaloachi, Chihuahua	28.66	108.29	2744	1472-2002	38/43	0.29	0.58b
Cócono, Durango	25.95	106.36	1950	1449-2002	20/34	0.27	0.61c

^a Sensitividad media, que consiste en el porcentaje promedio de cambio de los índices dendrocronológicos entre años (Fritts, 2001).

^bCorrelación media entre árboles para el período común 1778 – 1976.

^cCorrelación media entre árboles para el período común 1677 – 1904.

del año previo a mayo del año actual de crecimiento; caso similar ocurrió con la cronología EW de El Cócono que respondió de forma notoria al período estacional de precipitación noviembre-mayo.

Al correlacionar la cronología EW de Bisaloachi y la precipitación otoño-primavera (octubre-mayo) para el período total de registros climáticos disponibles (1950–1990), se obtuvo un coeficiente de determinación (r^2) de 0.513 (Figura 2), que se incrementó a 0.616 para el subperíodo 1970–1990 pero se redujo a 0.37 para el correspondiente a la verificación (1950–1969); no obstante este resultado, el programa VERIFY5 confirmó que, tanto la calibración como la verificación, pasaron la pruebas de significancia ($p < 0.05$) para la correlación, reducción de error, valor de “t” y primera diferencia significativa, por lo que la ecuación lineal para el período total de datos instrumentales se consideró estadísticamente válida para propósitos de reconstrucción.

La cronología de El Cócono mostró una asociación significativa con los datos regionales de precipitación de noviembre a mayo del período 1941–1990 con una r^2 de 0.64, valor que se incrementó a 0.71 para el subperíodo 1966–1990 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Calibración para las reconstrucciones de precipitación estacional octubre-mayo regional (cuadrante 4532) mediante la cronología EW de *Pseudotsuga menziesii* de Bisaloachi y de noviembre-mayo del territorio entre Durango, Chihuahua y Sinaloa.

Periodo	r ² ajustada	Coeficientes a	b	Error Estandar	Prueba de “t”	Probabilidad ¹
Bisaloachi, Chihuahua						
1950–1990	0.513	- 111.8	290.69	45.39	6.4	1.43E-07
1970–1990	0.616	- 87.62	288.04	52.14	5.52	2.5E-05
El Cócono, Guanaceví, Durango						
1941–1990	0.64	- 93.3	212.2	23.9	8.9	2.73E-11
1966–1990	0.71	- 85.5	226.4	30.7	7.4	2.9E-07

¹La calibración fue significativa para todos los casos ($p < 0.0001$).

Al igual que con la cronología de Bisaloachi, el programa VERIFY5 indicó que el proceso de calibración-verificación fue significativo para las pruebas estadísticas involucradas, por lo que la ecuación obtenida para el período total de calibración fue válida para la reconstrucción (Cuadro 3, Figura 3).

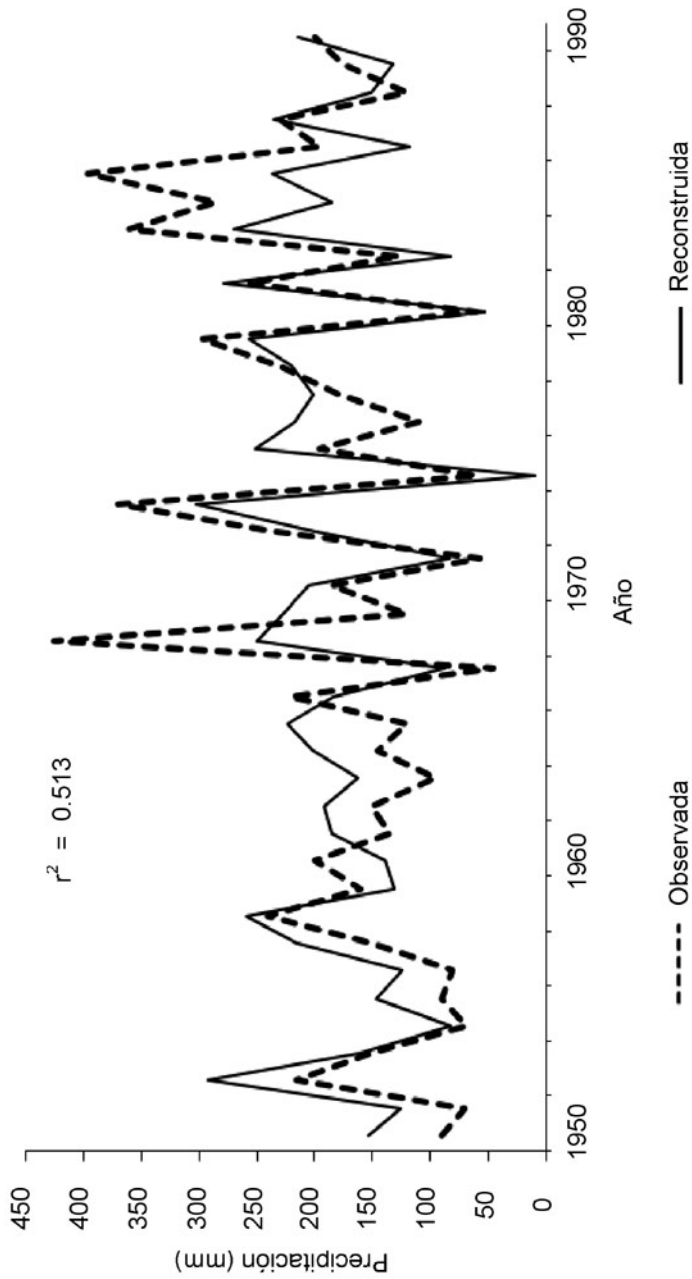


Figura 2. Comparación entre los datos de precipitación estacional (octubre–mayo) observados (línea punteada) y reconstruidos (línea sólida) del período 1950–1990.

Cuadro 3. Pruebas estadísticas de la verificación para la reconstrucción de precipitación estacional octubre–mayo (cronología EW de Bisaloachi y datos del cuadrante 4532) y para la reconstrucción estacional de precipitación noviembre–mayo (cronología EW de El Cócono).

Período	Correlación de Pearson (r)	Reducción de error ^a	Valor de t^{*b}	Prueba de signos ^c	Primera diferencia negativa ^d
Cronología EW de Bisaloachi, Chihuahua					
1950–1969	0.785*	0.6163*	3.32*	5*	2*
1970–1990	0.637*	0.372*	2.43*	6 NS	3*
Cronología EW de El Cócono, Durango					
1941–1965	0.849	0.72*	2.26*	10 NS	0*
1966–1990	0.823	0.71*	1.19 NS	12 NS	2*

*Significativos, $p < 0.05$; NS: No significativo ($p > 0.05$)

^aNo existe una prueba formal de significancia para este estadístico; sin embargo cualquier resultado sobre cero indica que la reconstrucción contribuye únicamente con información paleoclimática (Fritts, 2001).

^bComparación apareada de las medias observadas y reconstruidas. El resultado deseado es que no exista significancia (Steel y Torrie, 1980).

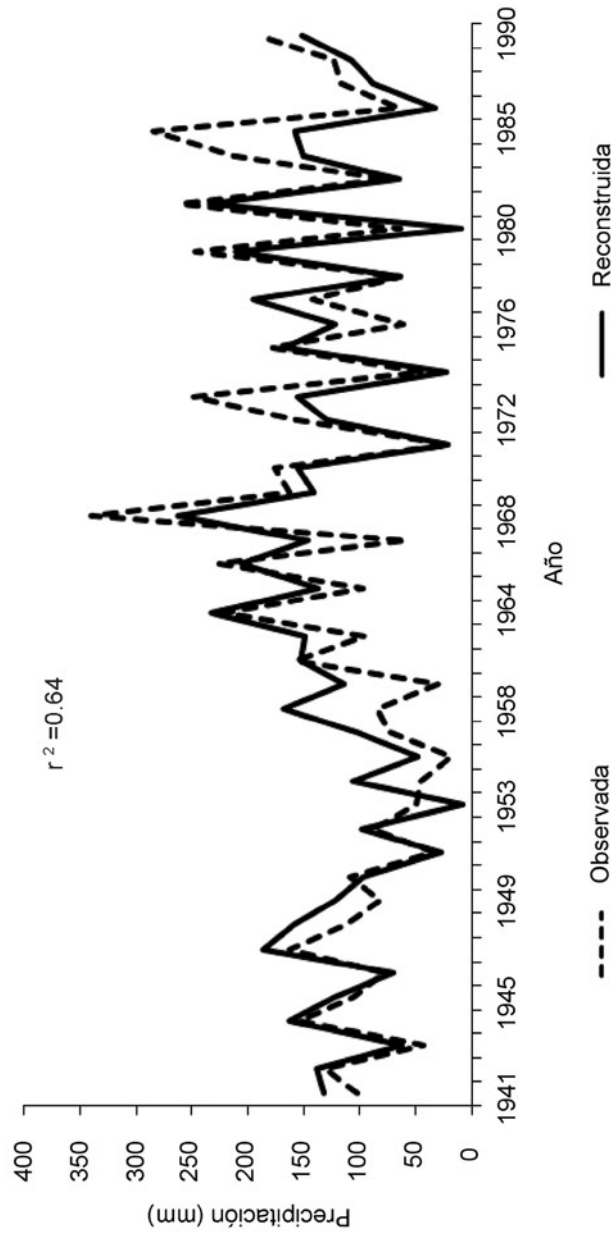
^cSe usa para comparar las diferencias entre dos muestras de datos tomados antes y después del tratamiento, cuyo valor central se espera que sea cero (Fritts, 2001).

^dPrimera diferencia de los datos observados y reconstruidos ($t - t-1$) (Fritts, 2001).

La reconstrucción de precipitación desarrollada con la cronología EW del sitio Bisaloachi para la región limítrofe de Chihuahua y Sonora destaca sequías recurrentes que afectaron a esta zona a lo largo de 531 años (1472–2002) (Figura 4).

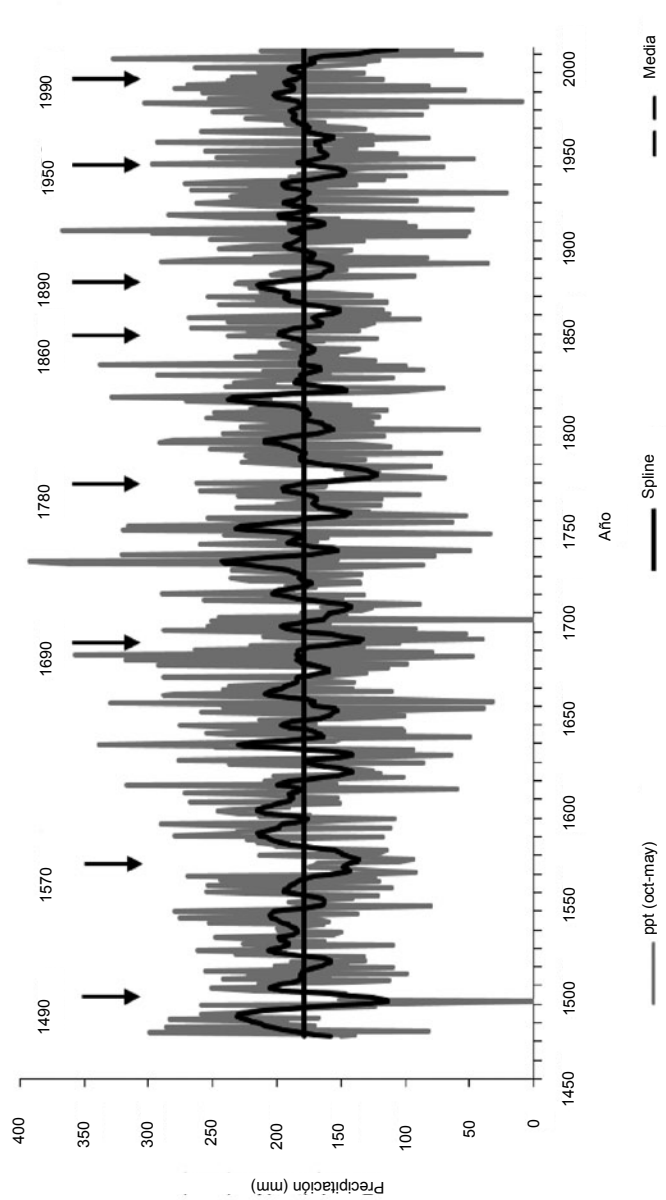
De manera similar, la reconstrucción correspondiente a la región que integra el área fronteriza de los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa, con la cronología EW de El Cócono indicó sequías continuas en más de 550 años (1450–2002) (Figura 5).

Probablemente dichas sequías se presentaron de manera simultánea en esta región del noroeste de México, con efectos más severos en algunos sitios que en otros debido a variaciones fisiográficas locales, aseveración que se fundamenta en la correlación de 0.61 ($p < 0.00001$) para el período común (1472–1999) de que ambas reconstrucciones.



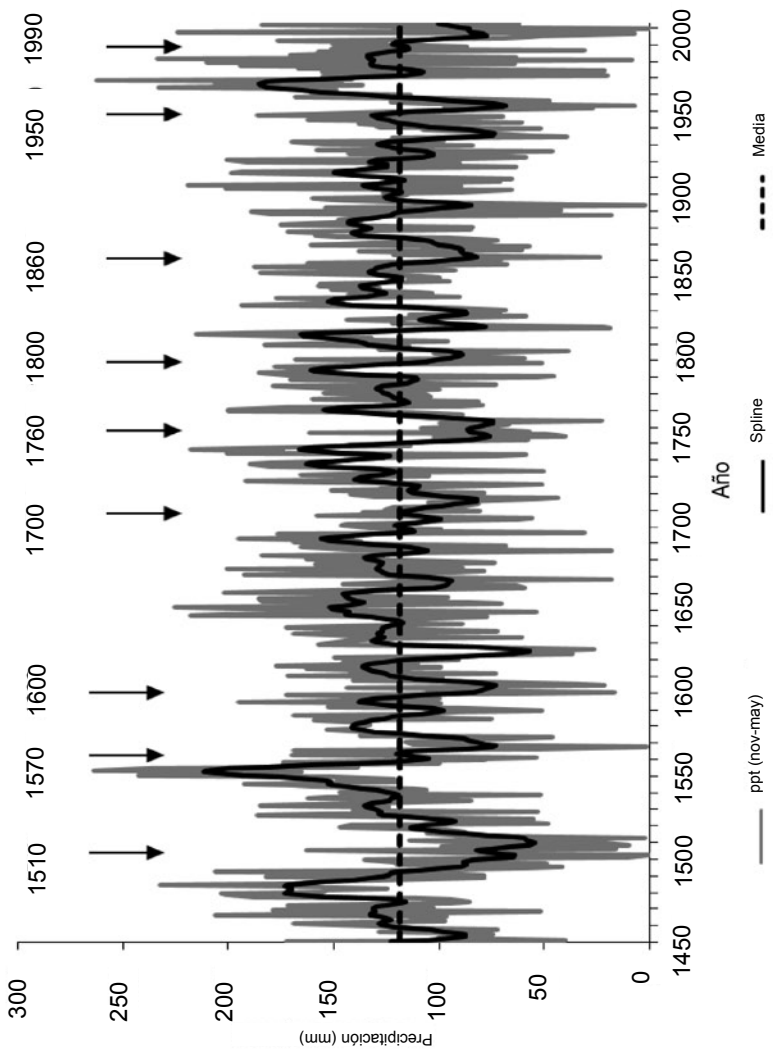
El período se dividió en dos subperíodos para dos corridas separadas de calibración (1941–1965 y verificación (1966–1990)).

Figura 3. Comparación entre los datos observados de precipitación estacional (noviembre–mayo) y reconstruidos del período 1941–1990.



La línea gruesa es una curva decenal flexible (spline), que enfatiza eventos a nivel década (baja frecuencia)

Figura 4. Serie de la precipitación reconstruida invierno-primavera (octubre–mayo) con madera temprana en el período de 1472–2002 para la región que comprende el noroeste de Chihuahua y noreste de Sonora.



La línea gruesa es una curva decenal flexible (spline), que enfatiza eventos a nivel década (baja frecuencia).

Figura 5. Serie de la precipitación reconstruida invierno-primavera (noviembre-mayo) con madera temprana en el periodo de 1450–2002 para el área limítrofe de los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa.

La similitud entre reconstrucciones se incrementó para subperíodos de 50 años con correlaciones superiores a 0.5 después de 1550 hasta alcanzar valores superiores a 0.7 después de 1850 (Figura 6). Esta similitud se advierte con mayor claridad al ajustar una curva decenal flexible a las dos reconstrucciones, en la que muchos de los eventos de baja frecuencia, los períodos secos en particular, ocurrieron de manera simultánea en ambas regiones, como las sequías de las décadas de 1490, 1560, 1630, 1690, 1760, 1800, 1860, 1890, 1950 y 1990 (Figura 7).

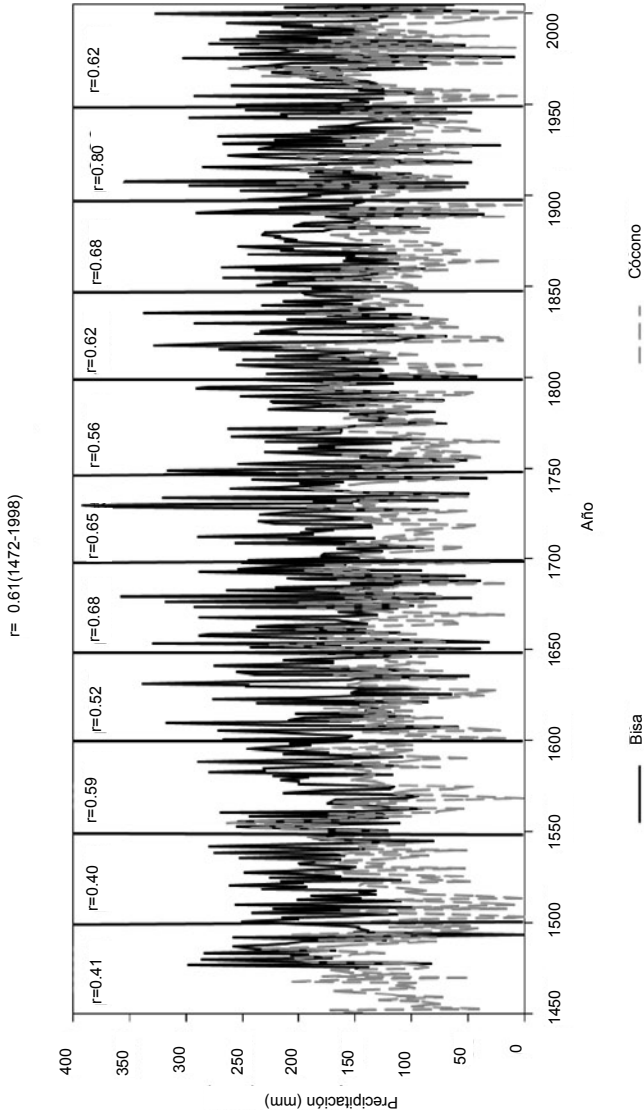
En la región de Chihuahua y Sonora, los 16 años comprendidos entre 1945 y 1960 han sido los más secos del siglo XX, pues en solo tres años (1947, 1952 y 1958) recibieron una cantidad de lluvia apenas mayor al promedio (143.2 mm). Los últimos 10 años de la reconstrucción (1993–2002), también fueron particularmente severos, a excepción de 1997 y 2001; en este aspecto esta reconstrucción coincide con la de la precipitación para el sur de Durango desarrollada por González *et al.* (2005), quienes confirmaron que este período fue el más seco de los últimos tres siglos.

No obstante lo anterior, en esta reconstrucción se detectaron sequías más intensas en el siglo XVIII para el período 1767–1778, en el que solo un año de un total de 12 superó la precipitación promedio (114.3 mm) para ese período especial.

Derivado de un estudio de archivos históricos para Chihuahua, Enfield y Fernández-Tejeda (2006) dieron a conocer que las sequías de las décadas de 1770 y 1780 aunadas a la presencia de heladas tempranas, afectaron gran parte del país y provocaron una de las mayores crisis agrarias en México. Fenómenos semejantes en este período también se reportan para la zona fronteriza de Sonora y Nuevo México (Villanueva y McPherson, 1999). Un caso similar está registrado para el intervalo de 1611 a 1626, cuando en solo tres años (1612, 1618 y 1620) se rebasó el promedio estacional de lluvia. Este lapso, aunque no está históricamente documentado, también aparece en otras reconstrucciones con anillos de árboles para Durango y noreste de México (Villanueva *et al.*, 2005a; 2005b).

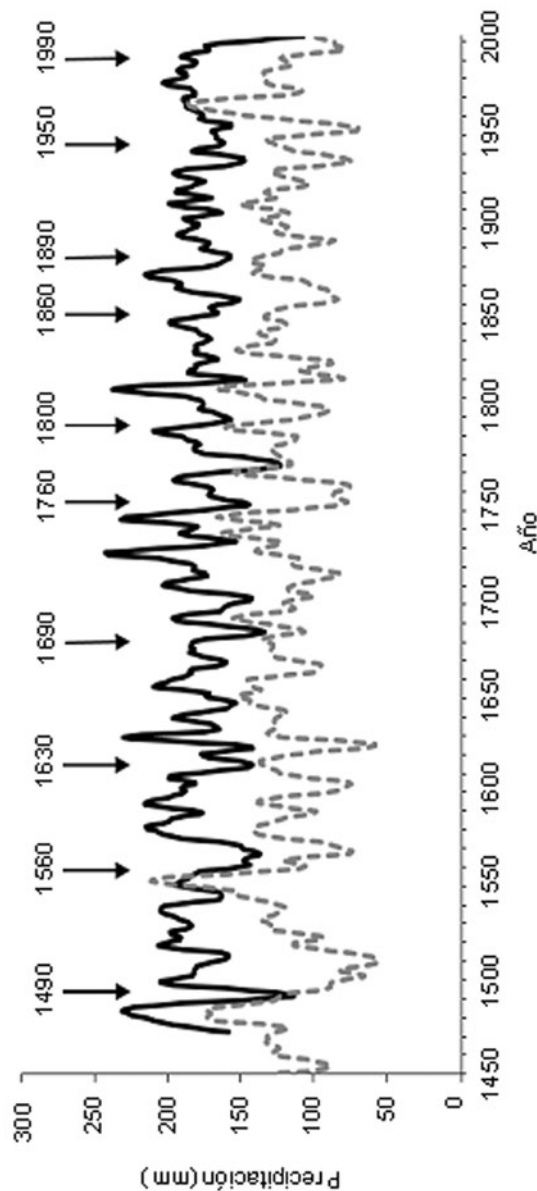
La etapa seca de 1552 a 1573 ha sido reportada por Cleaveland *et al.* (2003) como la más intensa de su reconstrucción para todo el estado de Durango, misma que se extendió hacia el norte a las regiones del noroeste y este de los Estados Unidos de América (Stahle *et al.*, 2000b; Fye *et al.*, 2003).

Dicha sequía sí aparece en esta reconstrucción, pero menos manifiesta. Además se verificó una sequía intensa en su porción temprana (1488–1496), lapso en el



La correlación para el período común de ambas reconstrucciones (1472–2002) indica una asociación significativa ($p < 0.0001$).

Figura 6. Grado de asociación entre las reconstrucciones de precipitación invierno-primavera para el barlovento de la SMO.



La curva flexible obscura continua corresponde a la reconstrucción para la región de Chihuahua y Sonora; la tenue y discontinua a la del área limítrofe entre los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa.

Figura 7. Curvas de decenales flexibles ajustadas a las reconstrucciones de precipitación para analizar la presencia de eventos de baja frecuencia comunes.

cual sólo se registró lluvia mayor a la media en 1489. Esta sequía pareciera ser artefacto de la reconstrucción; sin embargo, también se presenta en la de la zona limítrofe de Durango, Chihuahua y Sinaloa; por otra parte, una sequía de intensidad similar se observa para la reconstrucción de invierno en Durango (Cleaveland *et al.*, 2003), lo cual es indicativo de que fue verdadera y simultánea en varios estados del norte de México.

Para el caso de la reconstrucción de la zona limítrofe entre los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa, la sequía más prolongada se concentró en el período 1500–1517. Otros fenómenos de esta magnitud tuvieron lugar en los intervalos 1566–1573, 1599–1606, 1702–1705, 1702–1717, 1751–1768, 1785–1790, 1797–1805, 1859–1868, 1950–1957 y 1993 a 2000 (Figura 5, Cuadro 5). Muchas de estas sequías también están consignadas en documentos históricos para Chihuahua (Endfield y Fernández-Tejeda, 2006).

El efecto de la ausencia de lluvias tiene un fuerte impacto en las actividades socioeconómicas de una región, en especial en el norte de México, donde debido a las condiciones semiáridas que la caracterizan, la falta de agua repercute con mayor intensidad en la productividad agropecuaria y forestal, así como en el llenado de presas, cuya carga se destina a diversos fines productivos.

Las sequías más devastadoras fueron las que afectaron el centro y norte de México, en particular las que coincidieron con heladas (Endfield y Fernández-Tejeda, 2006). Los años secos de 1624, 1740, 1785, 1808, 1810 reportados por Florescano (1980) y que provocaron crisis agrícolas nacionales, en su mayoría están incluidos en estas reconstrucciones y en otras previamente desarrolladas para Chihuahua (Díaz *et al.*, 2002), lo cual es una forma independiente y documentada de verificar la validez de la misma. Para esta última entidad, la carencia de lluvia dentro del período 1817–1910 están documentadas en archivos históricos, específicamente para los años de 1886, 1887, 1893, 1896, 1908 y 1909, y estuvieron presentes en la reconstrucción, excepto 1896 cuando la reconstrucción indica precipitación superior (174.3 mm) a la media (143.2 mm).

No obstante que en este estudio se hace énfasis en la presencia de sequías debido a su efecto socioeconómico negativo, la reconstrucción también detectó períodos lluviosos, en los que la precipitación superó por mucho al promedio (cuadros 4 y 5), como sucedió en el período 1477–1486, igualmente registrado en la reconstrucción de Durango (Cleaveland *et al.*, 2003); el período húmedo de 1549 a 1558 reportado por Fye *et al.* (2003) para el oeste de Estados Unidos de América abarcó un área extensa que incluye el noroeste de México y en la reconstrucción de precipitación para el área limítrofe de Durango, Chihuahua

y Sinaloa este período húmedo comprendió 14 años (1543 a 1556), aunque probablemente no tuvo lugar en el suroeste de Arizona y suroeste de Nuevo México.

Por otra parte, el período húmedo de 1831 a 1856, reportado por Cleaveland *et al.* (2003) para Durango, también se advierte en esta reconstrucción y fue precedido por una sequía observada en la reconstrucción de Durango, Chihuahua y Sinaloa de 1826 a 1831. El período húmedo de 1807–1816, incluyó prácticamente todo el noroeste de México (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; González, 2003).

Cuadro 4. Sequías y períodos húmedos consecutivos detectados en la reconstrucción de precipitación para la región de Chihuahua-Sonora.

Sequías consecutivas de 3 a 4, 5 a 9 y más de 10 años						
3 a 4 años			5 a 9 años		>10 años	
No.	Período	% del del promedio	Período	% de del promedio	Período	% del del promedio
1	1490-1492	46.4	1490-1494	59.8	1487-1496	79.3
2	1559-1561	65.8	1511-1515	83.2	1506-1515	89.4
3	1566-1568	60.5	1542-1546	85.9	1559-1568	74.9
4	1622-1624	67.2	1559-1563	75.7	1610-1619	83.7
5	1631-1633	66.0	1564-1568	74.1	1644-1653	86.5
6	1652-1654	61.6	1613-1617	75.6	1696-1705	78.4
7	1683-1685	55.5	1622-1626	67.2	1752-1761	84.8
8	1732-1734	66.4	1633-1637	83.4	1770-1779	73.3
9	1752-1754	60.8	1644-1648	75.0	1797-1806	89.6
10	1771-1773	61.5	1666-1670	78.9	1817-1826	86.1

continúa...

continuación Cuadro 4...

Sequías consecutivas de 3 a 4, 5 a 9 y más de 10 años

3 a 4 años			5 a 9 años			>10 años	
No.	Período	% del del promedio	Período	% de del promedio	Período	% del del promedio	
11	1776-1778	68.9	1681-1685	72.7	1855-1864	89.2	
12	1818-1820	52.3	1701-1705	73.2	1934-1943	86.8	
13	1830-1832	67.1	1751-1775	76.4	1948-1957	89.7	
14	1885-1887	69.6	1771-1775	66.6	1993-2002	83.6	
15	1937-1939	64.4	1797-1801	84.5			
16	1954-1956	65.9	1817-1821	75.5			
17	1998-2000	63.8	1860-1864	78.0			
18			1883-1887	75.1			
19			1934-1938	79.7			
20			1953-1957	81.6			
21			1998-2002	69.0			

Períodos húmedos consecutivos 3 a 4, 5 a 9 y más de 10 años

3 a 4 años			5 a 9 años			>10 años	
No.	Período	% del del promedio	Período	% de del promedio	Período	% del del promedio	
1	1483-1485	134.8	1477-1481	127.1	1477-1486	125.2	
2	1580-1582	137.7	1483-1487	126.4	1516-1525	114.3	
3	1592-1594	131.6	1497-1501	116.9	1531-1540	113.3	
4	1627-1629	154.4	1516-1520	122.7	1549-1558	110.1	

continuación Cuadro 4...

Períodos húmedos consecutivos 3 a 4, 5 a 9 y más de 10 años						
No.	3 a 4 años		5 a 9 años		>10 años	
	Período	% del promedio	Período	% del promedio	Período	% del promedio
5	1649-1651	136.6	1522-1526	117.1	1577-1586	116.4
6	1654-1656	140.0	1536-1540	123.0	1590-1599	115.5
7	1726-1728	168.9	1549-1553	115.5	1627-1636	111.9
8	1744-1746	159.2	1559-1553	115.5	1654-1663	111.5
9	1791-1793	141.1	1578-1582	120.6	1722-1731	121.4
10	1813-1815	149.7	1592-1596	123.4	1741-1750	114.7
11	1903-1905	132.8	1606-1610	121.2	1783-1792	110.9
12	1912-1914	130.1	1627-1631	135.2	1807-1816	121.3
13	1918-1920	132.7	1654-1658	123.3	1868-1877	114.9
14	1940-1942	134.7	1710-1714	115.8	1975-1984	112.5
15			1725-1729	131.8		
16			1743-1747	139.7		
17			1812-1816	141.0		
18			1848-1852	119.9		
19			1865-1869	115.2		
20			1873-1877	123.0		
21			1910-1914	116.4		
22			1926-1930	118.2		
23			1975-1979	128.0		
24			1983-1987	116.4		

Cuadro 5. Sequías y períodos húmedos consecutivos detectados en la reconstrucción de precipitación para el área limítrofe de los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa.

Sequías consecutivas de 3 a más de 10 años						
3 a 4 años			5 a 9 años		>10 años	
No.	Período	% del promedio	Período	% del promedio	Período	% del promedio
1	1457-1459	84.7	1451-1455	67.3	1506-1517	54.7
2	1462-1465	86.6	1566-1573	57.8	1750-1768	73.4
3	1473-1476	96.3	1622-1628	52.8	1859-1868	70.2
4	1500-1503	36.7	1712-1717	64.7	1950-1959	74.9
5	1521-1524	56.8	1797-1805	77.2		
6	1559-1561	58.8	1934-1939	57.9		
7	1587-1590	71.5	1993-2000	71.6		
8	1599-1602	57.4				
9	1604-1606	38.7				
10	1662-1664	53.9				
11	1666-1669	74.9				
12	1683-1685	68.8				
13	1696-1698	66.9				
14	1702-1705	69.5				
15	1847-1850	88.0				

continúa...

continuación Cuadro 5...

Sequías consecutivas de 3 a más de 10 años						
No.	3 a 4 años		5 a 9 años		>10 años	
	Período	% del promedio	Período	% del promedio	Período	% del promedio
16	1871-1873	68.6				
17	1892-1894	48.4				
18	1921-1923	66.8				
Períodos húmedos consecutivos de 3 a más de 10 años						
No.	3 a 4 años		5 a 9 años		>10 años	
	Período	% del promedio	Período	% del promedio	Período	% del promedio
1	1518-1520	115.5	1529-1533	119.0	1478-1486	143.0
2	1525-1527	135.8	1629-1636	114.0	1543-1556	151.0
3	1562-1565	127.8	1690-1695	137.0	1474-1486	114.2
4	1612-1614	117.6	1734-1741	107.2	1960-1970	145.3
5	1638-1640	120.3	1791-1796	143.0		
6	1650-1652	157.2	1812-1817	140.0		
7	1658-1661	131.6	1833-1837	138.0		
8	1680-1682	132.8	1842-1846	123.0		

continúa...

continuación Cuadro 5...

Períodos húmedos consecutivos de 3 a más de 10 años						
No.	3 a 4 años		5 a 9 años		>10 años	
	Período	% del promedio	Período	% del promedio	Período	% del promedio
9	1699-1701	118.4	1881-1886	126.0		
10	1706-1708	119.6	1910-1915	128.1		
11	1726-1729	131.9				
12	1744-1747	159.5				
13	1769-1771	160.4				
14	1851-1853	125.1				
15	1874-1876	133.7				
16	1895-1897	115.1				
17	1940-1942	111.3				
18	1946-1948	130.7				
19	1975-1977	135.3				

Teleconexión de la reconstrucción con los índices ENSO

La precipitación invernal en el norte de México y suroeste de los Estados Unidos de América está ligada estrechamente con índices de ENSO (Ropelewski y Harper, 1989; Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999). Esta relación se registra de manera clara y significativa en los anillos de crecimiento, en particular en la porción de madera temprana de especies arbóreas como *Pseudotsuga menziesii*, que se desarrolla en los macizos montañosos de las Sierra Madre Occidental en Chihuahua y Durango (Stahle *et al.*, 1998)). La frecuencia con que ENSO se ha presentado históricamente en el norte de México es en períodos de 4 a 6 años, donde los análisis espectrales (Jenkins y Watts, 1968) revelan una mayor concentración de la varianza (Stahle *et al.*, 1998; Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003).

La teleconexión extratropical de ENSO en el norte de México es importante, pero su intensidad y extensión varían a través del tiempo (Cleaveland *et al.*, 2003). Dicha aseveración se corrobora en esta reconstrucción de precipitación regional, al comparar la precipitación estacional reconstruida de octubre-mayo con los índices TRI para el período 1896–1995 y al seccionarlos en subperíodos de 20 años. De este modo, se encontró que dicha correlación fluctuó a través del tiempo, con correlaciones que tuvieron un intervalo de 0.28 hasta 0.69 para la zona de Chihuahua-Sonora y valores de 0.14 hasta 0.71 para la región limítrofe de los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa (figuras 8 y 9).

Fluctuaciones similares entre 0.27 y 0.78 han sido reportadas para los estados de Chihuahua y Durango, respectivamente (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003). Lo anterior es indicativo de cambios multidecenales en la teleconexión de ENSO con la precipitación invierno-primavera que ocurre en esta región y que tiene una influencia significativa en la producción de madera temprana, que para algunas especies representa más del 70% de la producción total anual; por ende, su trascendencia económica es innegable en áreas de elevado aprovechamiento forestal, como los bosques templados de dichas entidades.

Este fenómeno también impacta favorablemente la producción de forraje, en una época en la que, por lo general, existe baja disponibilidad y está ligada con la frecuencia histórica de incendios que han repercutido en los ecosistemas forestales de la Sierra Madre Occidental (Fulé y Covington, 1996; Fulé *et al.*, 2005; Cerano, 2008; Drury y Veblen, 2008).

Al comparar uno de los períodos más secos de la reconstrucción del siglo XX, y que se ubica en el subperíodo 1955-1974, con el TRI se obtuvo una correlación

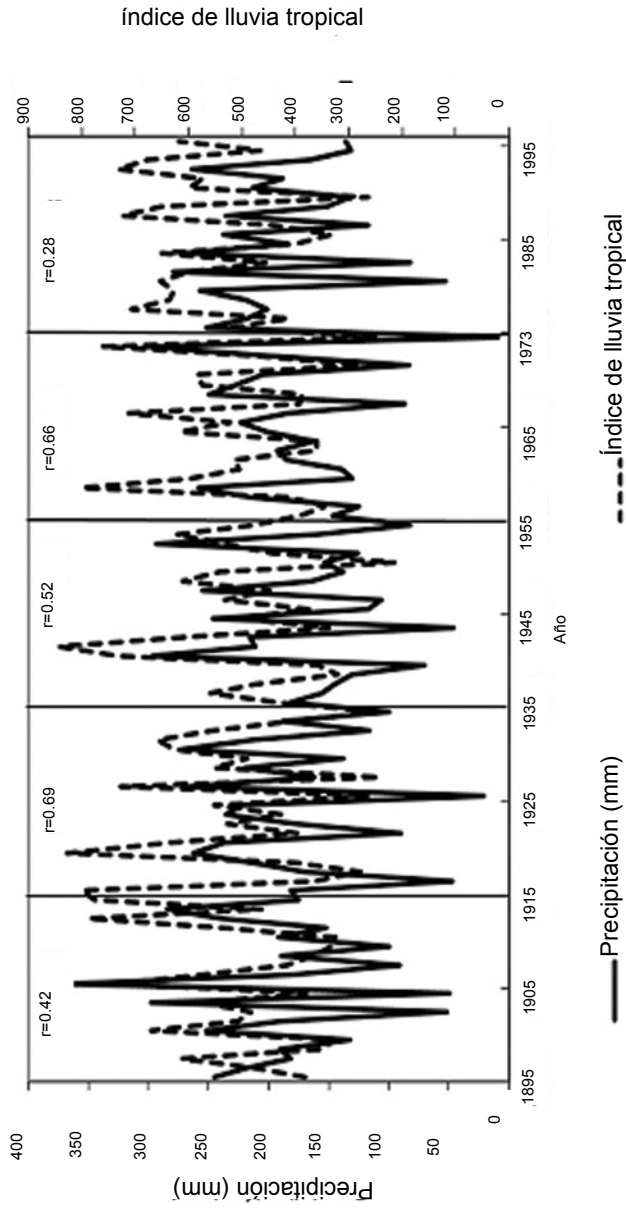


Figura 8. Correlación entre la precipitación reconstruida del período octubre-mayo para la región noroeste de Chihuahua y noreste de Sonora y el TRI, para el período 1896–1995 y dividido en subperíodos de 20 años.

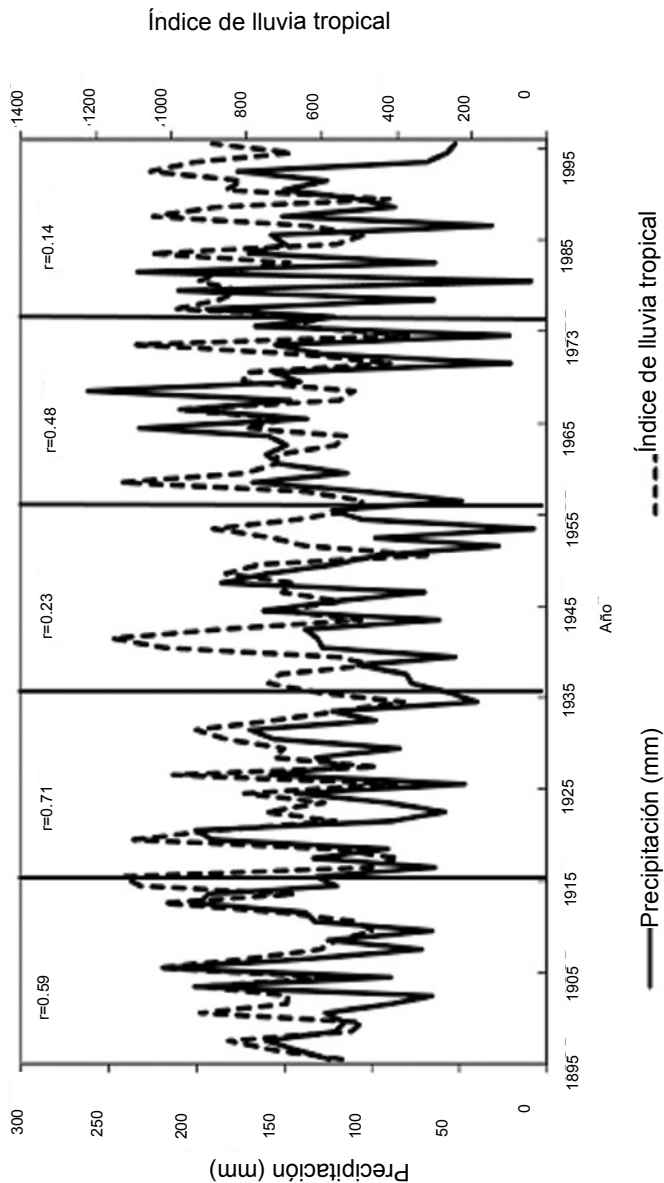


Figura 9. Correlación entre la precipitación reconstruida del período noviembre-mayo para el área limitrofe de Durango, Chihuahua y Sinaloa y el TRI, para el período 1896–1995 y dividido en subperíodos de 20 años.

de 0.66 y 0.48 ($p < 0.01$) para las dos reconstrucciones, respectivamente, lo que implica que el clima en esta región y en otras áreas del norte de México pudiera estar relacionado a una fuerte respuesta de ENSO; de esta manera, condiciones extremas aportadas por La Niña (fase fría), como las ocurridas en las décadas de 1850 y 1860 probablemente fueron la causa de sequías generalizadas, que en ciertos períodos tuvieron lugar al mismo tiempo en una extensa superficie de México e inclusive en otras regiones de Norteamérica (Herweijer *et al.*, 2006).

Otro caso particular es la mega sequía del siglo XVI que sufrió el Valle de México y gran parte de los Estados Unidos de América (Stahle *et al.*, 2000b; Therrell *et al.*, 2006). La misma situación se presentó con la influencia de la fase cálida de ENSO (El Niño), que en años particulares 1958, 1964, 1981, 1987 y 1992 provocaron intensa lluvia invernal en el norte de México, con implicaciones benéficas en la producción forestal, incremento en la recarga de acuíferos, agua almacenada en las presas, entre otras repercusiones a los ecosistemas.

CONCLUSIONES

El crecimiento de la madera temprana de especies forestales en ecosistemas de bosque mixto, como *Pseudotsuga menziesii* en la SMO explicó hasta 64% de la variabilidad en la precipitación que se genera en la vertiente occidental de dicha cordillera.

Desde el punto de vista económico, la precipitación más importante en esta región es la de verano, que representa más del 70% del total anual; la función de respuesta entre madera tardía y precipitación de verano no fue significativa ($p > 0.05$), lo cual limita una reconstrucción para este período. La falta de asociación se puede atribuir a que el crecimiento anual de esta especie ya ha cesado cuando se presenta el período lluvioso. La porción correspondiente a la madera tardía no representa más del 30% del total anual.

Las reconstrucciones de precipitación invierno-primavera para la región del noroeste de Chihuahua y noreste de Sonora y del área limítrofe entre Durango, Chihuahua y Sinaloa son las primeras que se desarrollan en donde se tiene una gran dependencia del agua producida en las cuencas que drenan hacia la planicie costera del Pacífico y que se destina a cultivos.

La variabilidad hidroclimática detectada a lo largo de 531 y 553 años de estas reconstrucciones, muestran eventos secos que afectaron a esta región con una intensidad y duración igual o superior a las sequías experimentadas en el siglo XX,

pero ninguna es comparable con la mega sequía del siglo XVI que afectó el centro, el norte de México y otras regiones de Norteamérica.

Estos fenómenos quizás se deban a la continua teleconexión de ENSO en su fase fría (La Niña). Los eventos cálidos ENSO (El Niño) en el norte de México originan lluvias copiosas en la estación invierno-primavera, como lo indica la reconstrucción de precipitación en esta región que, por lo general, supera al promedio en años con El Niño.

La generación de cronologías climáticamente sensitivas en las Sierras Madre Occidental, Oriental y otras montañas del centro y sur de México pueden ayudar a reconstruir y a entender la variabilidad hidroclimática en el último milenio, y por lo tanto, constituyen una fuente de información inigualable para analizar las condiciones dominantes durante el establecimiento, florecimiento y decadencia de civilizaciones prehispánicas. Además, son fundamentales para analizar el impacto de patrones circulatorios como ENSO, NAMS, Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) que impactan grandes regiones de manera simultánea. Esta información es esencial para la planeación de los recursos hídricos con así como para la conservación de ecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento otorgado a través de fondos del Instituto Interamericano para Investigación del Cambio Climático (IAI), proyecto CRN # 2047, a su vez financiado por el US/Nacional Science Foundation (Grant GEO-0452325).

REFERENCIAS

- Cerano P., J. 2008. Variabilidad climática regímenes de incendios e influencia de patrones circulatorios para el suroeste de Chihuahua. Tesis de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas. Universidad Autónoma de Chapingo, Universidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Dgo. México. 118 p.
- Cleaveland, M. K. 1986. Climatic response of densitometric properties in semiarid site tree rings. *Tree-Ring Bulletin* 46: 13 – 29.
- Cleaveland, M. K. 1988. Corrigendum to climate response of densitometric properties in semiarid site tree rings. *Tree-Ring Bulletin* 48: 41 – 47.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Díaz and B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369 – 388.

- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47: 37 – 59.
- Cook, E. R. and K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41: 45 – 53.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2007. Estadísticas del agua en México. Edición 2007. México, D. F. México. 259 p.
- Díaz C., S., M. D. Therrell, D. W. Stahle and M. K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate Research* 22: 237 – 244.
- Drury, S. A. and T. T. Veblen. 2008. Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico. *Plant Eco-log* 197: 299 – 316.
- Enfield, G. H. and I. Fernández-Tejeda. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climatic Change* 75: 391 – 419.
- Florescano, E. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México, D. F. México. 121 p.
- Fritts, H. C. 1991. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data. University of Arizona Press. Tucson, Arizona. USA. 286 p.
- Fulé, P. Z. and W. W. Covington. 1996. Changing fire regimes in Mexican pine forests: ecological and management implications. *Journal of Forestry* 94: 33 – 38.
- Fulé, P. Z., J. Villanueva-Díaz and M. Ramos-Gómez. 2005. Fire regime in a conservation reserve in Chihuahua, Mexico. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 320 – 330.
- Fye, F. K., D. W. Stahle and E. R. Cook. 2003. Paleoclimatic analogs to twentieth-century moisture regimes across the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84 (7): 901 – 909.
- González-Elizondo, M. 2003. Indicadores de cambio climático en algunas especies de pináceas de la Sierra Madre Occidental. Tesis Doctoral en Ciencias con Especialidad en Manejo de Recursos Naturales. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Subdirección de Postgrado. Linares, N. L. México. 192 p.
- González-Elizondo, M., E. Jurado, J. Navar, M. S. González-Elizondo, J. Villanueva, O. Aguirre and J. Jiménez. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681 – 2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management* 213: 39 – 53.

- González E., M. S., M. González E. y M. A. Márquez L. 2007. Vegetación y ecorregiones de Durango. Plaza y Valdés, S. A. de C. V. México, D. F. México. 219 p.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57(2): 205 – 221.
- Herweijer, C., R. Seager and E. R. Cook. 2006. American droughts of the mid to late nineteenth century: a history, simulation and implication for mediaeval drought. *Holocene* 16(2): 159 – 171.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69 – 78.
- Hulme, M., T. J. Osborn and T. C. Johns. 1998. Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HadCM2 simulation. *Geophysical Research Letters* 25: 3379 – 3382.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1999a. Estudio hidrológico del estado de Chihuahua. Aguascalientes, Ags. México. 222 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1999b. Carta Geológica Tecoripa H12-12, Escala 1:250,000. Dirección General de Geografía.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003. Síntesis de información geográfica del estado de Chihuahua. Aguascalientes, Ags. México. 145 p.
- Jenkins, G. M. y D. G. Watts. 1968. Spectral analysis and its applications. Holden-Day, San Francisco, CA. USA. 525 p.
- Lammertink, J. M., J. A. Rojas-Tomé, F. Orona-Casillas and R. L. Otto. 1996. Status and conservation of old-growth forests and endemic birds in the pine-oak zone of the Sierra Madre occidental, Mexico. Institute for Systematics and Population Biology (Zoological Museum), University of Amsterdam. Amsterdam. The Netherlands. 103 p.
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa E. y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. In: V. Magaña (Ed.). Los impactos de El Niño en México. SEP - CONACYT. Mexico, D. F. México. pp. 23 – 68.
- Monterrubio-Rico, T. and E. Enkerlin-Hoeflich. 2004. Present use and characteristics of thick-billed parrot nest sites in northwestern Mexico. *Journal of Field Ornithology* 75: 96 – 103.
- Ropelewski, C. F. and M. S. Halpert. 1989. North American precipitation and temperature patterns associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Monthly Weather Review* 114: 2352 – 2362.
- Stahle, D. W., R. D. D'Arrigo, P. J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. B. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Guy, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva-Díaz and L. G. Thompson. 1998. Experimental

- dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 70(10): 2137 – 2152.
- Stahle, D. W., J. Villanueva, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell, G. J. Paull, B. T. Burns, W. Salinas, H. Suzan and P. Z. Fulé. 2000a. Recent tree-ring research in Mexico. *In*: F. A. Roig (Comp.) *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC. Mendoza, Argentina. pp. 285 – 306.
- Stahle, D. W., E. R. Cook, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell, D. M. Meko, H. D. Grissino-Mayer, E. Watson and B. H. Luckman. 2000b. Tree-ring data document 16th century megadrought over North America. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 81(12): 121 – 125.
- Steel, R. G. D. and J. H. Torrie. 1980. *Principles and procedures of statistics*. McGraw Hill Co. New York, NY. USA. 633 p.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. *An introduction to tree-ring dating*. The University of Chicago Press. Chicago, Illinois. USA. 73 p.
- Stratus Consulting Incorporation- UNAM- Colegio de Sonora. 2004. *Adaptación al cambio climático: Hermosillo, Sonora, un caso de estudio*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-United States Environmental Protection Agency. México, D. F. México. 66 p.
- 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* 74: 493 – 504.
- Villanueva D, J. and G. R. McPherson. 1999. Estudios dendroclimáticos en montañas del suroeste de los Estados Unidos de América y del Norte de México. *Rev. Cien. For. en Méx.* 24(86): 37 – 64.
- Villanueva-Díaz, J., B. H. Luckman, D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, J. Cerano-Paredes, G. Gutiérrez-García, J. Estrada-Ávalos and R. Ja-sso-Ibarra. 2005a. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrocronologia* 22(3): 215 – 223.
- Villanueva D, J., J. Cerano, D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland and B. H. Luckman. 2005b. Estudios paleoclimáticos en México utilizando anillos de crecimiento de especies arbóreas. *In*: Benavides S., J. de D., F. Becerra L., T. Hernández T., C. González S. y G. Flores G. (Ed.) *Contribución al estudio de los servicios ambientales*. Libro Técnico No. 1. INIFAP/CIRPAC. Guadalajara, Jal. México. pp. 7-32.
- Wright, P. B. 1979. Persistence of rainfall anomalies in the Central Pacific. *Nature* 277: 371 – 374.