

PRECIPITACIÓN Y GASTO RECONSTRUIDO EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO NAZAS

RAINFALL PRECIPITATION AND RECONSTRUCTED EXPENSE OF THE NAZAS RIVER LOWER BASIN

José Villanueva Díaz ¹, Julián Cerano Paredes ¹, Juan Estrada Ávalos ¹,
Roque Morán Martínez ¹ y Vicenta Constante García ¹

RESUMEN

La Comarca Lagunera se caracteriza por una extrema variación en la disponibilidad de agua y por la carencia de datos climáticos amplios. Para extender en el tiempo las series de precipitación y de flujo; además de analizar la variabilidad hidroclimática de alta y baja frecuencia en la cuenca baja del río Nazas, se aplicó un modelo regresivo a partir de series dendrocronológicas de *Taxodium mucronatum*. La cronología generada superó los 500 años (1500 - 2003) y al compararla con la precipitación regional de verano (julio-septiembre) correlacionó significativamente ($r = 0.83$, $p < 0.0001$). Una respuesta similar se obtuvo con el flujo estacional otoño-invierno (agosto-febrero), ($r = 0.94$, $p < 0.0001$), con lo que se hizo la reconstrucción de las variables indicadas. La de precipitación mostró alta variabilidad interanual y multianual; sequías recurrentes sucedieron en los periodos: 1509-1520, 1548-1559, 1621-1622, 1684-1691, 1758-1763, 1784-1789, 1809-1811, 1846-1849, 1860-1865, 1922-1923, 1949-1956, 1962-1963, 1981-1985 y 1995-2000. Eventos húmedos con precipitación superior al 100% de la media reconstruida se presentaron en los años 1526, 1649, 1791, 1830 y 1991. Flujos reconstruidos con gasto extraordinario estuvieron ligados con el fenómeno de El Niño en su fase cálida, como los ocurridos en: 1717, 1725, 1752, 1805, 1855, 1870, 1880, 1888, 1894, 1904, 1925, 1947, 1958 1968, 1974 y 1991. Esta información puede ser usada por los administradores del agua y tomadores de decisiones en la Comarca Lagunera, para establecer la frecuencia de sequías y de avenidas extraordinarias con fines de manejo del recurso hídrico en la región.

Palabras clave: Dendrocronología, flujo hídrico, frecuencia, precipitación, reconstrucción climática, sequía.

ABSTRACT

The Comarca Lagunera region has an extreme hydroclimatic variability and the lack of extended and reliable instrumental climatic data. To extend back in time precipitation, streamflow, and other climatic information and to analyze their long-term high and low frequency variability a ring width chronology of *Taxodium mucronatum* was developed from trees located in a riparian area of the lower watershed in the Nazas River. The ring width chronology was longer than 500 years (1500-2003) and when compared against a seasonal summer regional precipitation (July-September) produced a significant correlation ($r = 0.83$, $p < 0.0001$). The chronology showed a similar significant response ($r = 0.94$, $p < 0.0001$) when compared to a regional seasonal fall-winter (August-February) streamflow. The reconstructed precipitation was highly variable at high (annual) and low frequencies (inter-annual). Drought episodes took place in the periods 1509-1520, 1548-1559, 1621-1622, 1684-1691, 1758-1763, 1784-1789, 1809-1811, 1846-1849, 1860-1865, 1922-1923, 1949-1956, 1962-1963, 1981-1985, and 1995-2000. Wet episodes surpassing a precipitation over 100% of the reconstructed mean were present in years 1526, 1649, 1791, 1830 y 1991. High streamflow volumes were associated with the warm ENSO phase which has been reported for years 1717, 1725, 1752, 1805, 1855, 1870, 1880, 1888, 1894, 1904, 1925, 1947, 1958 1968, 1974, and 1991. This information could be used by water managers and decision makers to determine the frequency of droughts and extraordinary streamflow events important for the proper management of water resources in the Comarca Lagunera.

Key words: Dendrochronology, streamflow, frequency, precipitation, climatic reconstruction, drought.

Fecha de recepción: 26 de abril de 2007.

Fecha de aceptación: 09 de marzo de 2010.

INTRODUCCIÓN

El norte de México posee una alta variabilidad hidroclimática, que se traduce en escasez de lluvia y que en años de baja precipitación, se produzcan condiciones de sequía extrema y en los húmedos, exceso de flujo superficial, que acelera los procesos erosivos; acción que está influenciada en alto grado por la deforestación y otros cambios en el uso del suelo. A pesar de ello, la Comarca Lagunera, ubicada en el área limítrofe de los estados de Durango y Coahuila, dentro de la zona semiárida, paradójicamente constituye la cuenca lechera más importante de México; donde la producción agropecuaria avocada en alto grado a la de forraje para alimentación de ganado, depende en gran medida de la explotación del acuífero y del escurrimiento superficial que se genera en la parte alta de la cuenca del río Nazas, enclavada en la vertiente oriental de la Sierra Madre Occidental. Estas escorrentías son retenidas en principio, en grandes reservorios como las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco y liberadas meses más tarde durante el ciclo agrícola, a través de una red de canales principales y secundarios para irrigar, en los últimos 58 años (1947 - 2004), una superficie promedio de 67,000 ha año⁻¹ en el distrito de riego 017 (Jasso *et al.*, 2001; Villanueva *et al.*, 2006).

En décadas recientes, el agua destinada para irrigación en dicho distrito ha excedido substancialmente el volumen captado en las presas, por lo que este déficit se ha subsanado mediante la extracción del agua del subsuelo. Lo anterior ha conducido a un abatimiento alarmante del manto

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

freático, que en ciertos lugares supera los 1.5 m por año, situación que también altera la calidad del agua en sitios específicos de la Comarca Lagunera, por efecto de metales pesados y por altas concentraciones de arsénico, con repercusiones en la salud de la población que la consume, paralelamente se ha incrementado la salinidad del suelo, entre otros problemas colaterales (Brouste *et al.*, 1997).

Un período de sequía entre 1992 y 2003 exacerbó la falta de disponibilidad de agua en la región, por lo que el área cultivada se redujo en más del 80%; de esta manera, en los años 1996, 1997, 2002 y 2003 el área cultivada decreció a menos de 25,000 ha año⁻¹ (Villanueva *et al.*, 2005).

Dada la gran variabilidad de la precipitación, la predicción a largo plazo de tendencias climáticas extremas, es de gran relevancia para el manejo adecuado del recurso hídrico. Sin embargo, las predicciones se tornan difíciles de establecer, al no contar con una base climática instrumental sólida y confiable; ya que muchos de los registros climáticos disponibles tienen la limitante de su corta extensión, poca representatividad, datos faltantes y calidad dudosa. Una opción para extender las series climáticas o de flujo en el tiempo es mediante la aplicación de modelos de regresión a partir de indicadores o "proxys" (fuentes indirectas) del clima de alta resolución, como son los anillos de árboles.

Los crecimientos anuales de especies longevas, en particular las coníferas, se utilizan con frecuencia para estudios paleoclimáticos, reconstrucción de flujos o gastos hidrológicos y eventos climáticos extremos (Stahle y Cleaveland, 1993; Meko *et al.*, 1996). En México, no obstante su biodiversidad y presencia de árboles centenarios y milenarios, hasta hace unos cuantos años, pocos eran los estudios dendrocronológicos; aunque en la década más reciente se ha trabajado intensamente para integrar una red con el fin de desarrollar reconstrucciones de precipitación y flujo que permitan analizar las tendencias hidroclimáticas históricas que han caracterizado al centro y norte de México en los últimos 500 años (Villanueva *et al.*, 2005, 2006, 2009a).

La Comarca Lagunera, a pesar de su aridez, posee especies con potencial dendrocronológico como es el sabino o ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.), presente en los bosques de galería de los ríos Nazas y Aguanaval. Especie que además de interrelacionar ecológicamente con otros taxa de hábitat ripario, fomenta la biodiversidad y mejora la calidad del ambiente; también constituye un archivo climático histórico, debido a que el grosor de sus anillos de crecimiento anual está relacionado directamente con las condiciones climáticas prevalecientes previo o durante la formación de los mismos, de tal suerte que pueden funcionar como referentes para reconstruir factores climáticos y variables hidrológicas a través del tiempo.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar una cronología de anillos de crecimiento de ahuehuete o sabino y generar reconstrucciones de precipitación y de flujo hidrológico para la cuenca baja del río Nazas, con el fin de conocer la variabilidad hidroclimática histórica, eventos de alta y baja frecuencia y tendencias en el tiempo; información que es importante para

apoyar el desarrollo de estrategias a corto mediano y largo plazo en el manejo sustentable de los recursos hídricos, que impactan sobre el entorno social y económico de la Comarca Lagunera.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización geográfica

El área de estudio se localiza en las coordenadas 25° 16' N - 103° 46' W y 25° 27' N - 103° 43' W, dentro del municipio de Lerdo, Durango, área comprendida entre la presa Francisco Zarco y la comunidad de Saporiz, en un transecto aproximado de 18 km de longitud (Figura 1). El clima de la región es desértico, semicálido, con invierno fresco y lluvias de verano y una precipitación anual que oscila de 200 a 350 mm, distribuidos principalmente en el periodo mayo - octubre. La temperatura máxima promedio es de 33.6°C y la mínima de 5.6°C, con una media anual de 20°C. En los suelos, dominan los litosoles, aunque en la parte baja de laderas hay regosoles y sobre el lecho del río, fluvisoles.

En laderas de las serranías con suelos ricos en calizas predomina la vegetación de matorral rosetófilo, integrado por especies como: lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr.) y guapilla (*Hechtia glomerata* Zucc.) con abundancia de guayule (*Parthenium argentatum* Gray) y mariola (*Parthenium incanum* Kunth), además de un estrato alto dominado por palma (*Yucca* sp.) y uno inferior compuesto por una gran diversidad de cactus. En la parte baja de las laderas vegeta el matorral micrófilo caracterizado por gobernadora (*Larrea tridentata* Sessé & Moc. ex DC.), hojas éñ (*Flourensia cernua* DC.), ocotillo (*Fouquieria splendens* Engelm.) y elementos codominantes de huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.) y mezquite (*Prosopis glandulosa* var. *torreyana* (L. Benson) M.C. Johnston). En la zona de inundación o área riparia se desarrolla la vegetación de galería, constituida por álamo (*Platanus occidentalis* L.), sauz (*Salix nigra* L.), fresno (*Fraxinus berlandierana* De Candolle.) y sabino o ahuehuete (*Taxodium mucronatum*).

El escurrimiento en la zona de estudio, tiene su origen en la parte superior de las cuencas hidrológicas, que drenan hacia la vertiente oriental de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, a partir de la confluencia de los afluentes Sextín y Ramos, los cuales conforman el río Nazas (Descroix *et al.*, 1993). Aguas abajo de su cause principal están las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco, la primera diseñada para almacenamiento y la segunda para distribución, en donde se concentran los flujos con fines de riego.

Usos de la rivera del río Nazas

En la longitud del área estudiada se distinguen diversos usos del suelo, lo que permite diferenciar dos tramos: el primero, con alto grado de disturbio que se extiende desde la población de Saporiz hasta el sitio donde comienza el Cañón de Fernández. En este tramo, se practica pastoreo extensivo con ganado caprino, así como agricultura en las zonas de inundación; mientras que, en el segundo, que se prolonga desde el Cañón de Fernández hasta la presa Francisco Zarco, el cambio del uso del suelo ha sido mínimo y presenta poco disturbio. Un uso adicional del suelo en sitios

muy específicos de la rívera consiste en la extracción de arena sobre el cauce del río; recolecta de leña, obtención de postes para cercado, extracción de carrizo (*Arundo donax* L.) y de otras especies invasivas.

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.

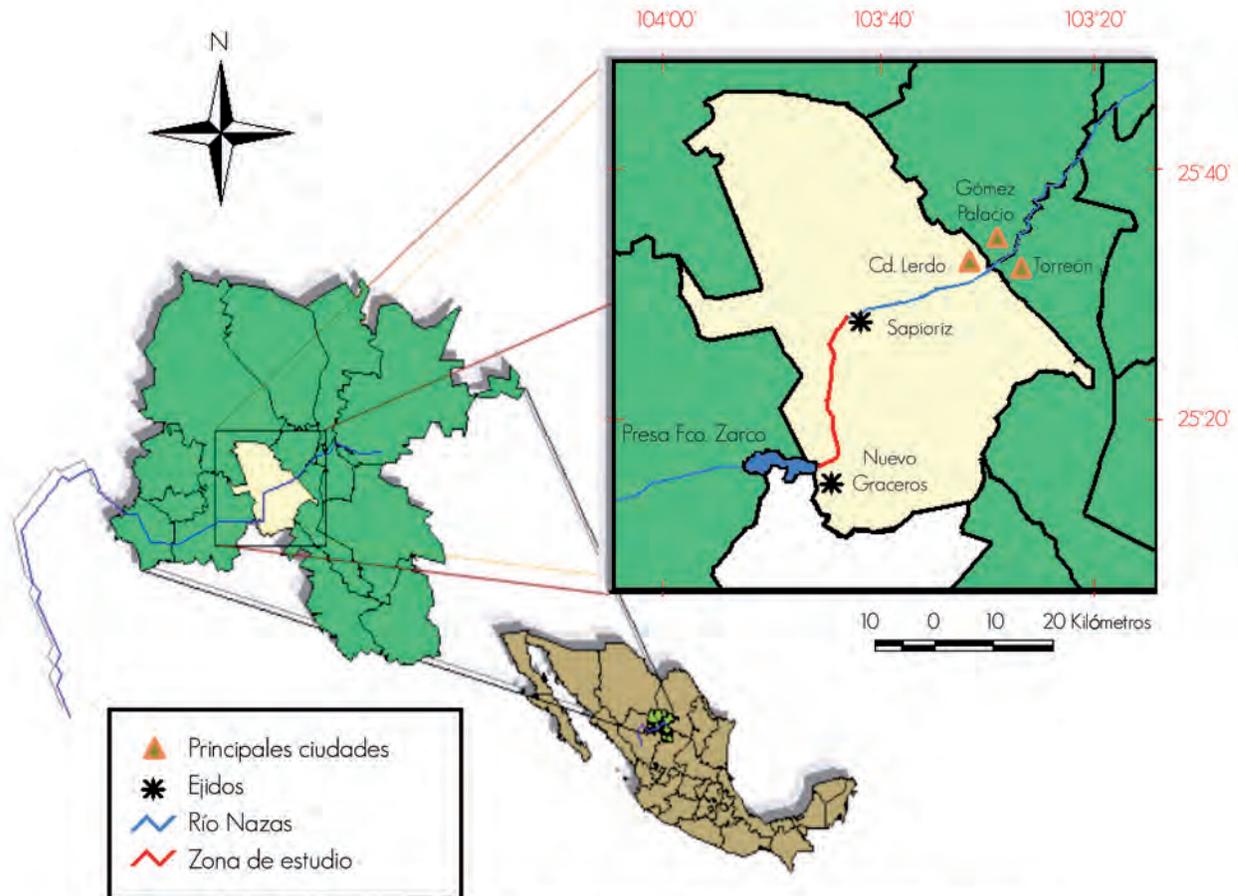


Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio en el río Nazas, Durango.

Muestreo de núcleos de crecimiento y procesado

Se obtuvieron núcleos de crecimiento, gusanos o virutas con un taladro de Pressler de especímenes seleccionados de sabino en parajes específicos del río Nazas (Figura 2). Dicha actividad se realizó a la altura del pecho, pero en ocasiones debido a problemas de pudriciones, daños por incendio o malformación del fuste principal, las muestras se sacaron de alguna otra parte del tronco y de preferencia de aquellas secciones uniformes. El número de núcleos perforados por árbol fue de dos, aunque de algunos individuos visiblemente longevos, fueron hasta cuatro, los cuales se distribuyeron en diversas orientaciones del fuste.

Los núcleos de crecimiento se identificaron, montaron y pegaron en secciones acanaladas de madera para facilitar su manejo; posteriormente, se les pulió con lija de diferente calibre, desde grado grueso a fino (granos 120, 220, 360 y 400). En el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP y con el apoyo de un estereomicroscopio triocular de alta resolución y mediante técnicas dendrocronológicas estándar, los anillos de crecimiento se contaron y fecharon (Stokes y Smiley, 1968). La técnica del fechado cruzado o cofechado utilizada para determinar el año de formación de cada

Una vez fechadas las muestras, cada crecimiento (anillo anual) se midió individualmente con un sistema de medición VELMEX (Robinson y Evans, 1980). El fechado cruzado, 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 cuantificar la influencia del clima en el crecimiento estacional de la cronología de sabino, se le comparó con datos de precipitación de estaciones climáticas distribuidas en la cuenca baja del río Nazas; el mismo procedimiento se realizó con estaciones hidrométricas ubicadas en toda la cuenca del río Nazas (Cuadro 1 y Figura 3).

La respuesta climática entre precipitación y crecimiento anual de sabino 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). Después, con la subrutina VERYFY5 del paquete DPL, se analizó el proceso de calibración-verificación (Fritts, 1991). Derivado de lo anterior, se obtuvo una ecuación de transferencia para el período total de datos de precipitación disponibles, modelo que fue utilizado para la reconstrucción de precipitación en la longitud total de la

cronología. A las series de alta frecuencia (resolución anual), se les ajustó una curva flexible (baja frecuencia) para resaltar eventos secos o húmedos a nivel década presentes en las reconstrucciones (Cook y Peters, 1981). Los periodos de sequía detectados se validaron con documentos históricos en la medida de lo posible; así mismo, se comparó con reconstrucciones dendroclimáticas previas para el estado de Durango y otras partes del norte de México y suroeste de los Estados Unidos de América.

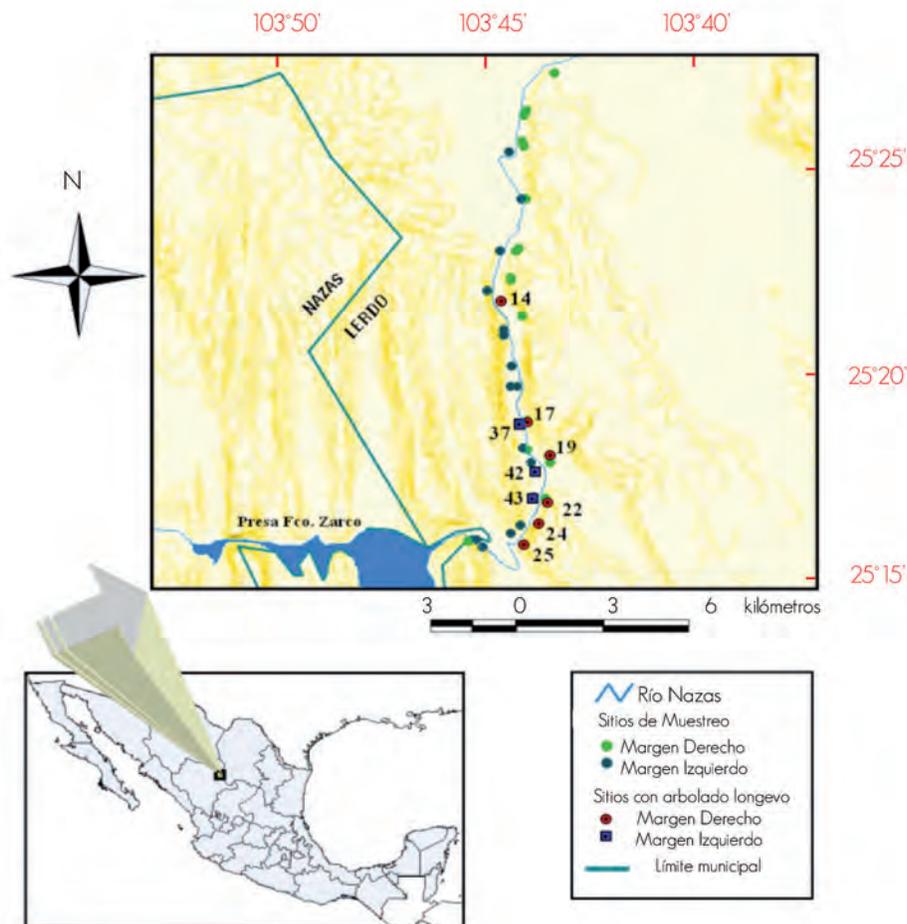


Figura 2. Ubicación de sitios de muestreo en transectos de las márgenes derecha e izquierda con relación a la ubicación de la presa Francisco Zarco.

Cuadro 1. Relación de estaciones climáticas e hidrométricas usadas para analizar la respuesta de la cronología con la precipitación y el gasto mensual acumulado.

Estación climática	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (m)	Período de registro considerado
Cañón de Fernández	25.283	103.75	1,360	1967 - 2004
Cinco de Mayo	25.750	104.667	2,145	1967 - 2004
Cuencamé	24.783	103.667	1,500	1967 - 2004
El Palmito	25.517	104.783	1,630	1967 - 2004
El Cuarto	24.917	104.467	1,700	1967 - 2004
Nazas	25.233	104.117	1,264	1967 - 2004
Santa Clara	24.483	103.333	2,316	1967 - 2004
Estación hidrométrica				
Agustín Melgar	25.259	104.068		1971 - 2004
Cañón de Fernández	25.272	103.759	1,200	1971 - 2004
J.S. Acosta	25.219	105.443	1,670	1971 - 2004
Palmito II	25.609	105.002	1,630	1971 - 2004
Sardinas	26.084	105.560	1,650	1971 - 2004

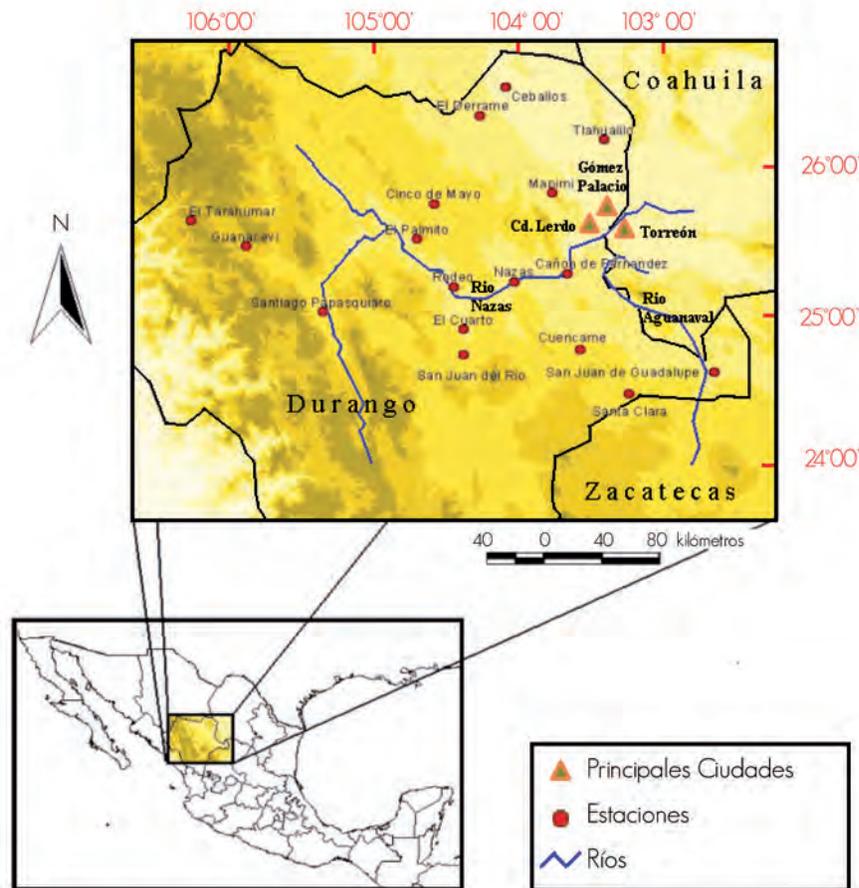


Figura 3. Distribución geográfica de estaciones climáticas con las que se comparó el índice anual de la cronología de sabino del río Nazas, Durango.

La serie de tiempo dendrocronológica se contrastó también con datos de flujo (normalizados) de las estaciones hidrométricas localizadas a lo largo de la cuenca del río Nazas (Figura 4). La identificación de la respuesta climática y de los procesos de calibración y verificación fueron similares a los descritos en el de reconstrucción de precipitación.

La variabilidad hidroclimática de alta y baja frecuencia detectada en la reconstrucción de precipitación y de flujo, se confrontó con eventos climáticos documentados y con reconstrucciones históricas de estas variables para el norte de México, así como con índices reconstruidos del fenómeno de El Niño para el norte de México (Stahle *et al.*, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la serie de tiempo con la precipitación

La serie de tiempo dendrocronológica de anillo total de sabino se extendió para el periodo 1420 - 2004 (585 años de longitud) y los resultados del programa COFECHA mostraron un coeficiente de correlación de 0.563 entre series, con una sensibilidad promedio de 0.391; ambos valores son aceptables para propósitos de reconstrucción climática (Fritts, 1976).

La serie de tiempo generada se correlacionó con los datos promedio de precipitación instrumental procedente de 17 estaciones

climáticas distribuidas dentro de la cuenca del río Nazas, mismas que presentaron el mayor periodo de datos. Los análisis de correlación, sin embargo, indicaron que sólo siete de ellas tuvieron una correlación significativa ($p < 0.01$) con la precipitación de verano (julio - septiembre) del año previo al inicio de la estación de crecimiento, para 38 años de registro (1966 - 2003); no obstante, la correlación más alta se obtuvo para los meses de julio, agosto, septiembre y diciembre del año previo y enero del año actual de crecimiento.

La lluvia en la Comarca Lagunera ocurre, básicamente, durante la estación de verano (junio a septiembre), en la que se acumula 84.6% de la precipitación total anual (324 mm); mientras que la estacional julio - septiembre constituye 76.3% del total anual, lo cual destaca la importancia de este factor en ese lapso de tiempo para fines de análisis de variabilidad hidroclimática histórica y de disponibilidad de agua para la región.

Reconstrucción de la precipitación de verano

Los resultados obtenidos muestran que la cronología de anillo total de sabino al correlacionarse con la precipitación de verano (julio - septiembre) del año previo al inicio de la estación de crecimiento, explica 69% ($R^2 = 0.69$, $p < 0.0001$) de la variabilidad en precipitación para la parte baja de la cuenca del río Nazas (Figura 5).

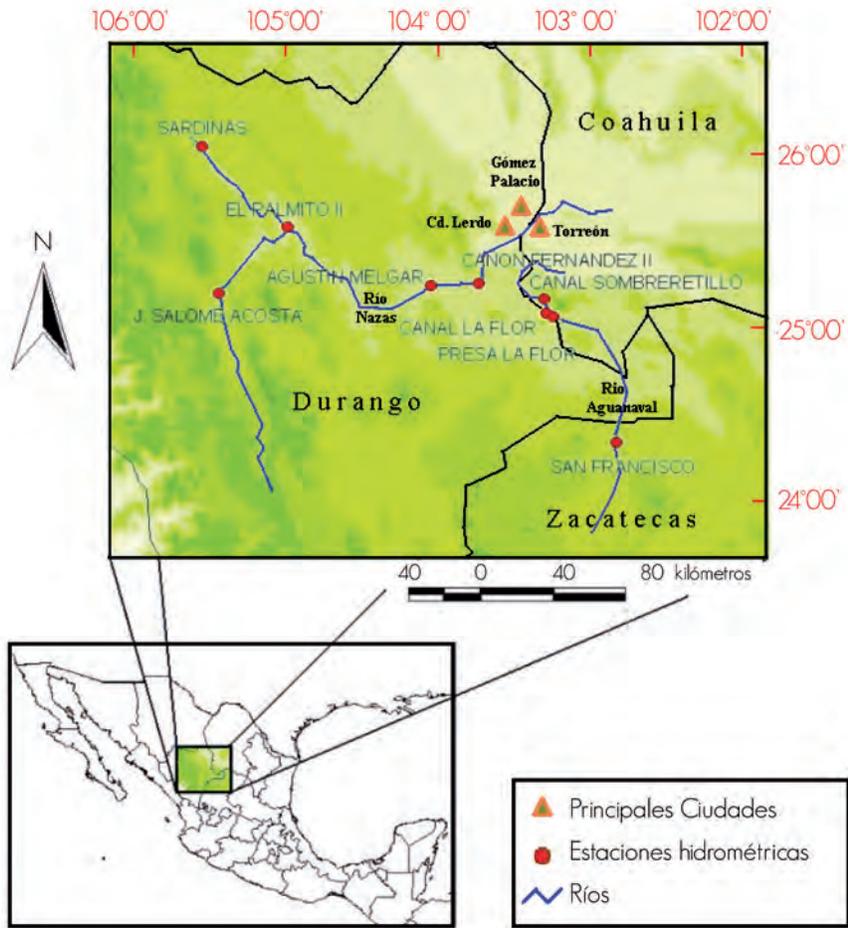


Figura 4. Distribución geográfica de estaciones hidrométricas, con las que se comparó los índices de la cronología de sabino del río Nazas, Durango.

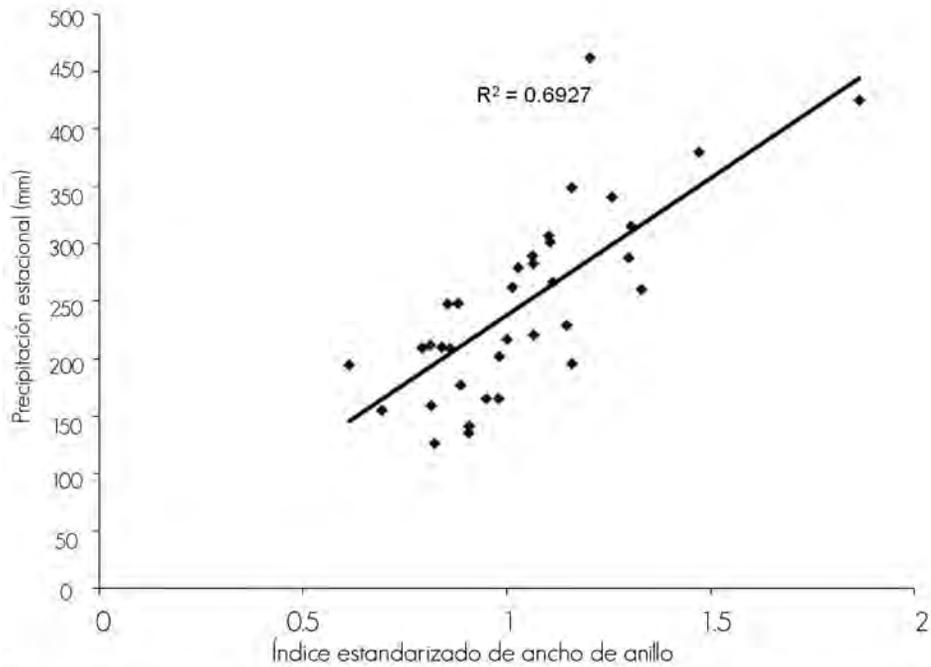


Figura 5. Regresión lineal simple entre el índice estandarizado y la precipitación estacional julio-septiembre, un año previo a la estación de crecimiento.

Los índices de ancho de anillo de la cronología estándar y datos de precipitación estacional (julio - septiembre) del año anterior al crecimiento, se calibraron en la mitad de los datos climáticos disponibles y se verificaron en la mitad restante, para finalmente calibrar en el periodo total (Fritts, 1976) (Cuadro 2).

1789, 1809-1811, 1846-1849, 1860-1865, 1922-1923, 1949-1956, 1962-1963, 1981-1985 y 1995-2000. Sequías con más de 10 años de extensión y una precipitación inferior al 25% del promedio estacional, ocurrió de 1686 a 1695, con 23% por debajo del valor medio reconstruido (231.3 mm).

Cuadro 2. Estadísticos de las pruebas de calibración-verificación entre la cronología de índice estandarizado y precipitación estacional julio-septiembre.

Estadísticos	Periodo		
	1967 - 1983	1984 - 2003	1967 - 2003
	Calibración ¹		
R ² Ajustada	0.41	0.67	0.57
Pendiente	273.30***	251.60***	261.70***
Intercepto	-33.5ns	-18.4ns	-0.63ns
	Verificación		
Correlación	0.78*	0.68*	
Ira. diferencia de la correlación	5*	4*	
Prueba de signos (±)	18ns	4*	
Prueba de t	0.73	4.4*	

¹ El modelo de calibración (1967 - 1983) se verificó en el subperiodo 1984 - 2003 y el de verificación (1984 - 2003) en el subperiodo 1967 - 1983; ns = No significativo (p>0.05); * = P<0.05; ** = P<0.01; *** = P<0.001.

La validación de la reconstrucción también se hizo con archivos históricos y con reconstrucciones paleoclimáticas desarrolladas previamente con anillos de árboles para el norte y centro de México. Para el lapso total de registro (1966 a 2003), al eliminar los años atípicos de 1973, 1975 y 1995, se produjo una correlación significativa ($r = 0.83$, $p < 0.0001$) entre los datos observados y reconstruidos (Figura 6). La ecuación de regresión lineal bivariada utilizada fue la siguiente:

$$Y_t = -32.8697707 + 265.124299X_{t+1}$$

Donde:

Y_t = Valor de precipitación reconstruida del período julio-septiembre para el año previo al crecimiento (mm).

X_{t+1} = Índice de ancho de anillo del año siguiente (t+1) al período estacional donde se presentó la lluvia.

La cronología desarrollada se extiende por 585 años aunque la reconstrucción de precipitación se limitó de 1500 a 2003 (504 años), debido a que antes de 1500, el tamaño de muestra (número de núcleos de crecimiento involucrados) para generar la cronología fue inferior a tres radios, lo que no es estadísticamente deseable para fines de reconstrucción de variables climáticas (Cook, 1985). La reconstrucción indica una gran variabilidad interanual de alta y baja frecuencia de los patrones de precipitación estacional para esta región. En la Figura 7, la línea tenue representa los valores de precipitación estacional del periodo julio-septiembre; la línea horizontal es la precipitación estacional media del periodo reconstruido y la línea gruesa oscura constituye una curva decenal flexible, que se ajustó a la reconstrucción para resaltar eventos de baja frecuencia a nivel década.

En la reconstrucción se reconocen sequías recurrentes, entre los que destacan por su severidad y extensión los periodos: 1509-1520, 1548-1559, 1621-1622, 1684-1691, 1758-1763, 1784-

Eventos húmedos de gran importancia fueron evidentes en la reconstrucción, especialmente en los periodos: 1524-1528, 1647-1651, 1679-1685, 1700-1703, 1740-1750, 1871-1880, 1966-1970 y 1988-1992; cada uno con intensidades diferentes, pero superiores al 10% de la media en periodos extensos; además, se presentaron años individuales, en los que la precipitación superó a la media reconstruida en más del 100%, tal es el caso de: 1526, 1649, 1791, 1830 y 1991. Una etapa húmeda muy amplia para la parte central de los Estados Unidos de América, se ha consignado de 1825 a 1840 (Fye et al., 2003).

Muchos de los lapsos de tiempo secos observados, se han detectado de forma simultánea en reconstrucciones de precipitación para el norte de México y específicamente para las efectuadas con anillos de árboles en las Sierras Madre Oriental y Occidental. De esta manera, las décadas con sequía de: 1690, 1790, 1810, 1860, 1890, 1920, 1950, 1970 y 1990, están presentes en reconstrucciones para el noreste de México (Pohl et al., 2003; Cerano, 2004; Villanueva et al., 2005, 2009b) y episodios muy secos como el de las décadas: 1660, 1760, 1860 y 1950 también se verifican en reconstrucciones para el norte y noroeste de México (Diaz et al., 2002; Cleaveland et al., 2003; González-Elizondo et al., 2005; Villanueva et al., 2006) y regiones central y suroeste de los Estados Unidos de América (Stahle et al., 2000; Fye et al., 2003).

La intensidad de las sequías comunes ha variado entre sitios de acuerdo a las características fisiográficas de cada localidad, su distanciamiento al océano, los patrones circulatorios dominantes, etc.; sin embargo, es evidente que tales eventos de impacto generalizado deben haber estado influenciados de manera común por patrones circulatorios de gran magnitud, como son el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO, siglas en inglés), el Monzón de Norteamérica o Monzón Mexicano (NAMS, siglas en inglés), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, siglas en inglés), frentes fríos y tormentas tropicales, entre otros (Douglas et al., 1993; Stahle et al., 1998; Magaña et al., 1999; Cleaveland et al., 2003; Brito et al., 2002).

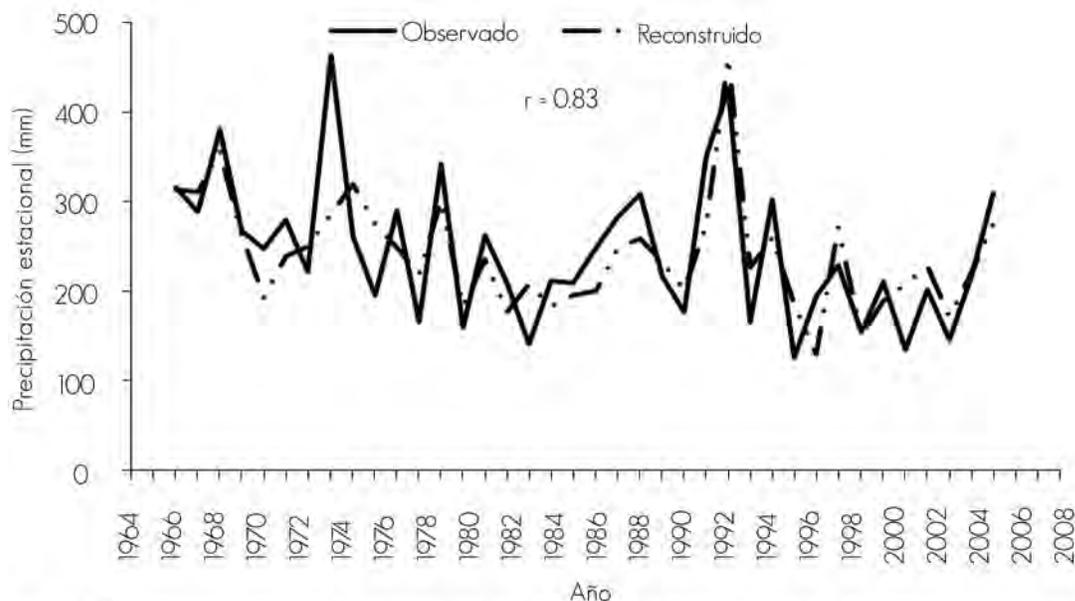


Figura 6. Precipitación observada y reconstruida del periodo julio-septiembre, con datos promedio de siete estaciones climáticas de la cuenca del río Nazas.

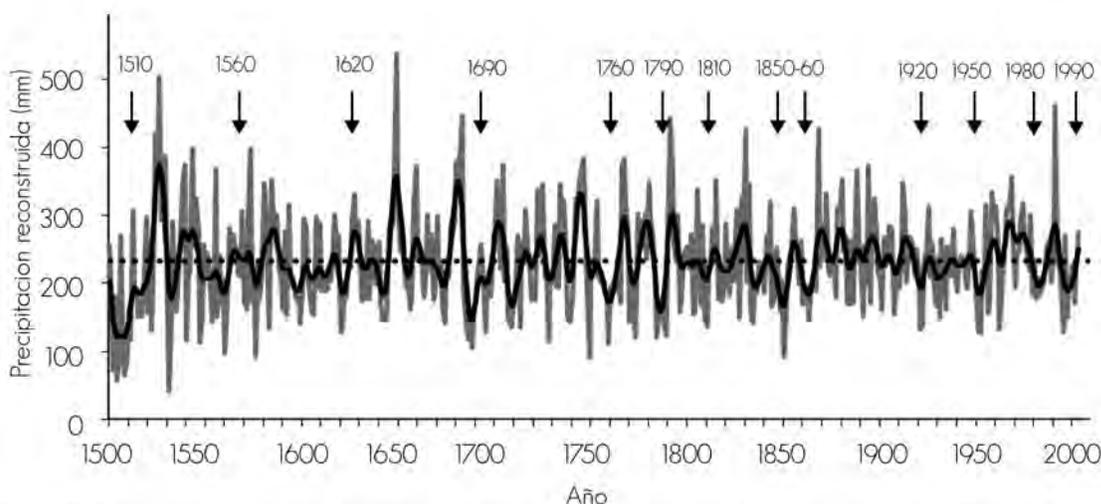


Figura 7. Precipitación reconstruida estacional de verano (julio - septiembre) para la parte media-baja de la cuenca del río Nazas. Periodo 1500 - 2003.

Es importante analizar con detalle la extensión de estos incidentes y los probables mecanismos circulatorios que les dieron origen, pues sólo así será posible explicar los sucesos de baja frecuencia que tienen lugar de manera rutinaria cada 50 ó 100 años en el norte-centro de México y así mismo, contar con los elementos técnicos para modelar posibles escenarios futuros del clima en esta región de México, lo que es muy valioso para la planeación del adecuado aprovechamiento de sus limitados recursos hídricos (Endfield y Fernández, 2006).

Debido a la mayor disponibilidad de información en términos de registros climáticos de fechas documentadas, se pudieron corroborar las sequías durante el siglo XX, así como sus repercusiones sociales y económicas. La primera ocurrió de 1907 a 1909 e impactó a diferentes estados del norte y centro de México, en particular los estados de: Nuevo León, San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro,

Chihuahua y Coahuila. Para la Comarca Lagunera, el año seco de 1908 originó una caída drástica hasta del 80% en la producción de alimentos; la población de Matamoros, Coahuila disminuyó 50% debido principalmente a la emigración de sus habitantes a zonas urbanas (Florescano, 1980). Este periodo seco, aunado a otros problemas sociales y económicos concurrentes, fueron algunos de los factores detonantes de la Revolución Mexicana (Escobar, 1997).

Las sequías registradas para los años de 1921 a 1922 y 1950 a 1951 se incluyen en esta reconstrucción. La que se presentó en la década de 1950 se considera como la de mayor intensidad y extensión en el siglo XX (Villanueva *et al.*, 2005; Stahle *et al.*, 2009). 1950, 1951 y 1956 son identificados como años de sequía extrema en el norte de México (Florescano, 1980), con efectos devastadores en la agricultura y en la estabilidad social y económica de la población, al reducir drásticamente el área

agrícola hasta en un 85% del potencial irrigado (Comisión Nacional del Agua, 2004). Los años de 1962 y 1970 se catalogan como muy secos a nivel nacional (Florescano, 1980); en esta reconstrucción, sólo tuvieron 57.4 y 83.7% de la precipitación promedio reconstruida, respectivamente. El periodo de 1964 a 1976 tuvo un 20% de precipitación superior a la media, lapso en el cual la Comarca Lagunera experimentó un incremento en el área irrigada, superficie que superó las 100,000 ha; sin embargo, años más tarde, específicamente en la década de 1990, una nueva sequía ocurrió en la región y redujo la superficie agrícola a menos de 26,000 ha (Villanueva et al., 2005). Período que también se caracterizó por: el abandono de tierras de labranza, la venta de derechos de agua, la compactación de la superficie irrigada; así como por la emigración de la población rural a la ciudad.

Análisis de la serie dendrocronológica con registros de flujo hidrológico

La cronología de anillo total de sabino se correlacionó con datos hidrométricos de flujo (gastos) para cinco estaciones de aforo distribuidas en la cuenca del río Nazas. El análisis de correlación para un lapso de 34 años (1971 - 2004) produjo una respuesta significativa ($r = 0.78$, $p < 0.0001$) entre el flujo total promedio de todas las estaciones para el período estacional otoño-invierno (agosto del año previo a febrero del año actual de crecimiento). El período estacional con mayor correlación se obtuvo de agosto del año anterior a febrero del año actual de crecimiento, que acumulado, constituye 40.1% del escurrimiento promedio total anual ($848.611 \times 10^6 \text{ m}^3$), correspondiente a 34 años de registro. De manera individual, el mes de septiembre del año previo mostró la correlación más alta ($r = 0.8$).

El comportamiento del flujo promedio mensual de tres estaciones de aforo involucradas en este estudio (Cañón de Fernández, Agustín Melgar y Lázaro Cárdenas), señala que el mes de marzo posee un escurrimiento elevado ($166.52 \times 10^6 \text{ m}^3$), (Figura 8), lo cual

constituye un flujo artificial, debido a que en esa fecha se inicia el ciclo agrícola en la Comarca Lagunera y por ende se libera agua almacenada en las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco; esta pudiera ser la causa de la baja correlación entre el flujo para dicho mes y el índice de ancho de anillo.

La misma situación se presentó para los meses de mayo, junio, julio y agosto del año actual de crecimiento, cuando el flujo natural es casi nulo en las estaciones de aforo indicadas. Por el contrario, las estaciones hidrométricas Salomé Acosta y Sardinas ubicadas en la parte alta de la cuenca del Nazas, donde el flujo no ha sido alterado, constatan que los meses de mayor escurrimiento (julio, agosto y septiembre) corresponden a los meses de mayor precipitación.

Reconstrucción del flujo hidrológico otoño invierno para la cuenca del río Nazas

El corto periodo de registro disponible (34 años) no permitió correr las pruebas convencionales de calibración y verificación. Por lo anterior, para generar el modelo de reconstrucción sólo se realizó el análisis de calibración, al utilizar el promedio total de datos hidrométricos disponibles de 1971 a 2004. Para analizar la normalidad de los registros de aforo, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk que arrojó un valor de 0.651 y un valor de p menor de 0.05) y la de Anderson-Darling arrojó un valor de 4.251 y un valor de p menor de 0.05) sugeridas por Brito et al. (2003). Ambas revelaron que los registros de escurrimiento carecen de normalidad ($p > 0.05$). Con base en el resultado anterior, se procedió a probar diferentes modelos no lineales, que consideran la no normalidad de los datos para determinar la mejor ecuación con fines de reconstrucción de flujo hídrico, como se indica en el gráfico de dispersión (Figura 9). El mejor modelo definido tiene alta capacidad para simular los eventos de gran magnitud o alto escurrimiento ($r = 0.947$, $p < 0.0001$).

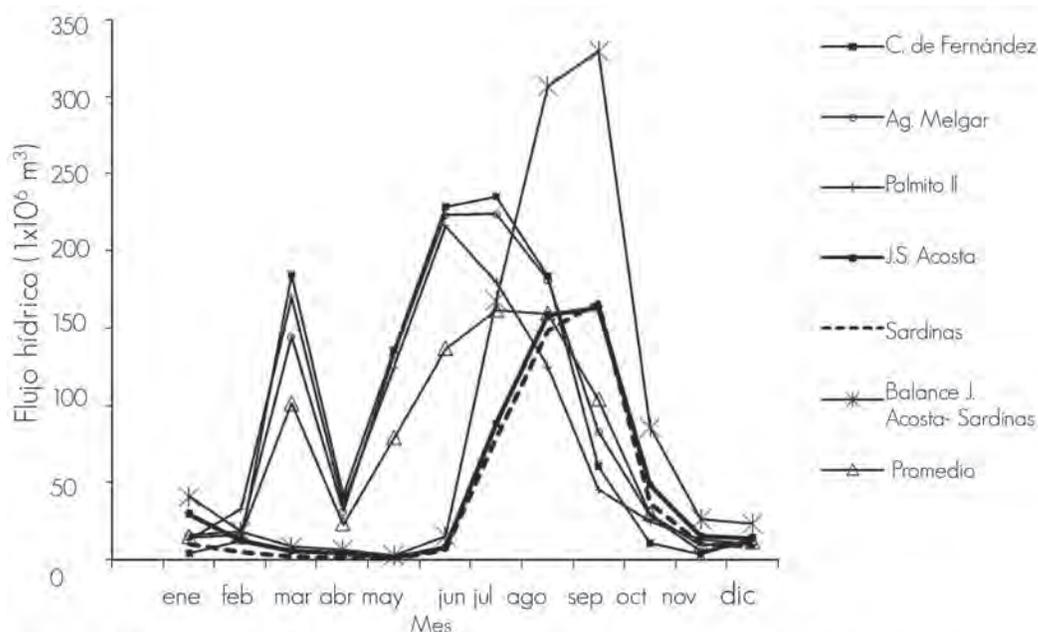


Figura 8. Distribución mensual del escurrimiento para cinco estaciones de aforo ubicadas en la cuenca del río Nazas.

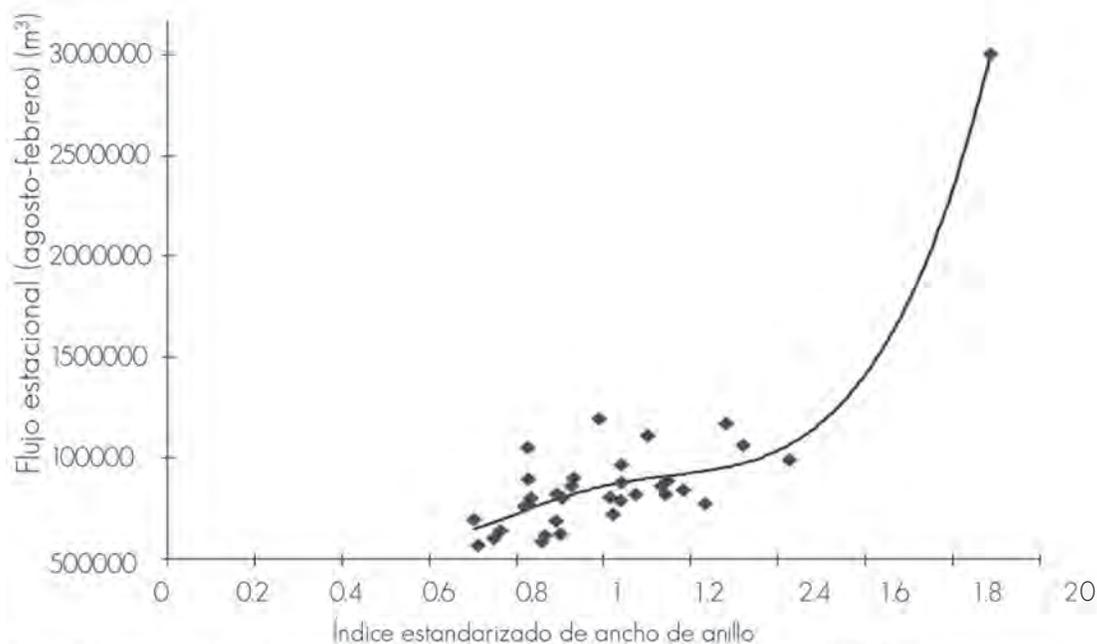


Figura 9. Variabilidad del flujo acumulado estacional (agosto-febrero), del período 1971-2004 para cinco estaciones de aforo de la cuenca del río Nazas.

La ecuación de ajuste generada para la reconstrucción del escurrimiento en el río Nazas del período estacional otoño-invierno, se presenta a continuación:

$$Y = l^{a + (x)(b) / (x + 1)^d} + l^{d + (x)(e) / (x + 1)^f}$$

Donde:

Y = Valor de flujo reconstruido agosto-febrero para un año específico (mm)

l = Base del logaritmo Neperiano (2,71828182845904)

a, b, c, d, e, f = Constantes determinadas por el modelo

x = Índice estandarizado de ancho de anillo

Los resultados generados del análisis no lineal indican que la cronología de ancho de anillo explica aproximadamente 90% ($R^2 = 0.897$, $p < 0.0001$) de la variabilidad de flujo hidrológico para el período estacional otoño-invierno, que comprende los

meses de agosto del año previo al crecimiento a febrero del año actual (Cuadro 3 y Figura 10).

El flujo reconstruido se extiende de 1510 a 2004 (495 años), con una media de $382.96 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Figura 11), en donde se observa la presencia de eventos de gran escurrimiento en el río Nazas, superior a $3000 \times 10^6 \text{ m}^3$ en el periodo reconstruido. Si bien el flujo promedio reconstruido no es superior al 50% del total anual, si es un indicativo de la variabilidad del comportamiento del escurrimiento de los últimos cinco siglos en esta región.

Análisis del flujo hidrológico reconstruido

En la reconstrucción de flujo se detectó la presencia de eventos muy húmedos, que ocurrieron en los años: 1514, 1526, 1528, 1529, 1543, 1573, 1649, 1682, 1683, 1746, 1791, 1830, 1868 y 1991. Estudios previos sugieren que la recurrencia de sucesos extremos en periodos de retorno de 5, 10, 20 y 100 años, produjeron volúmenes esperados de: 2,004.04, 2,985.45, 2,866.71 y $3,823.08 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente (Descroix *et al.*, 1993).

Cuadro 3. Coeficientes de ajuste y parámetros del modelo utilizado en la reconstrucción de flujo.

Coeficientes de ajuste	Valor	Desviación típica
r (coeficiente de correlación)	0.947	
R^2 (coeficiente de determinación)	0.897	
SCR (suma de cuadrados del error)	561262862121.781	
Parámetros del modelo		
a	7.412	280.941
b	3.340	262.257
c	-0.965	731.543
d	1.632	118.842
e	-26.435	297.364
f	-53.846	583.259

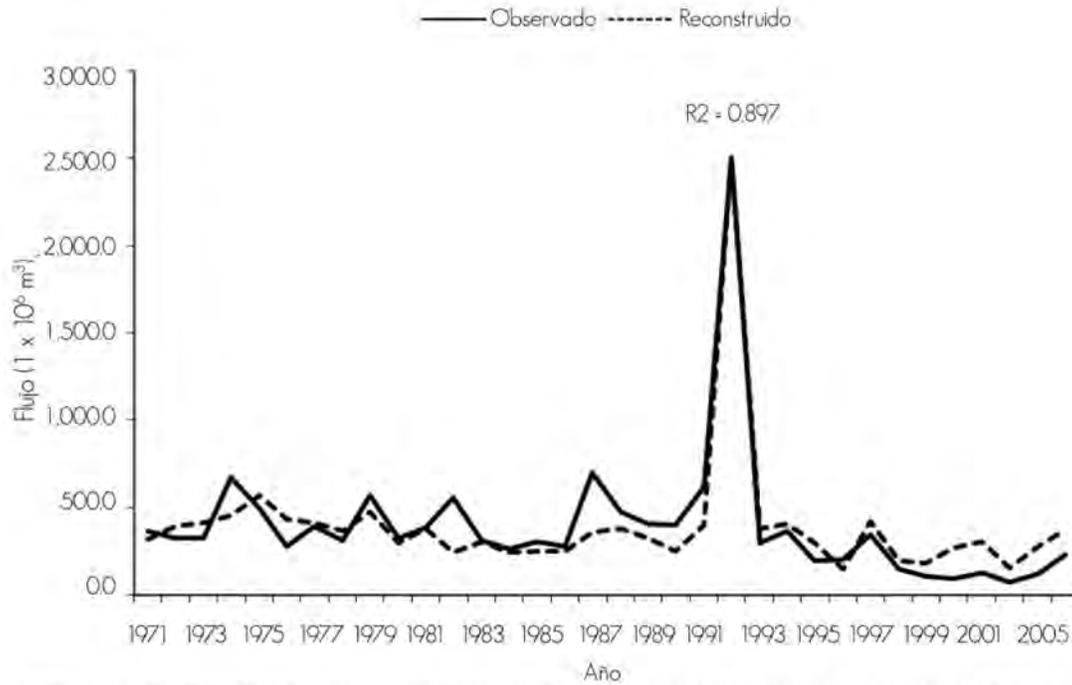


Figura 10. Flujo estacional otoño-invierno (agosto-febrero) observado y reconstruido, por medio del aforo promedio de cinco estaciones hidrométricas.

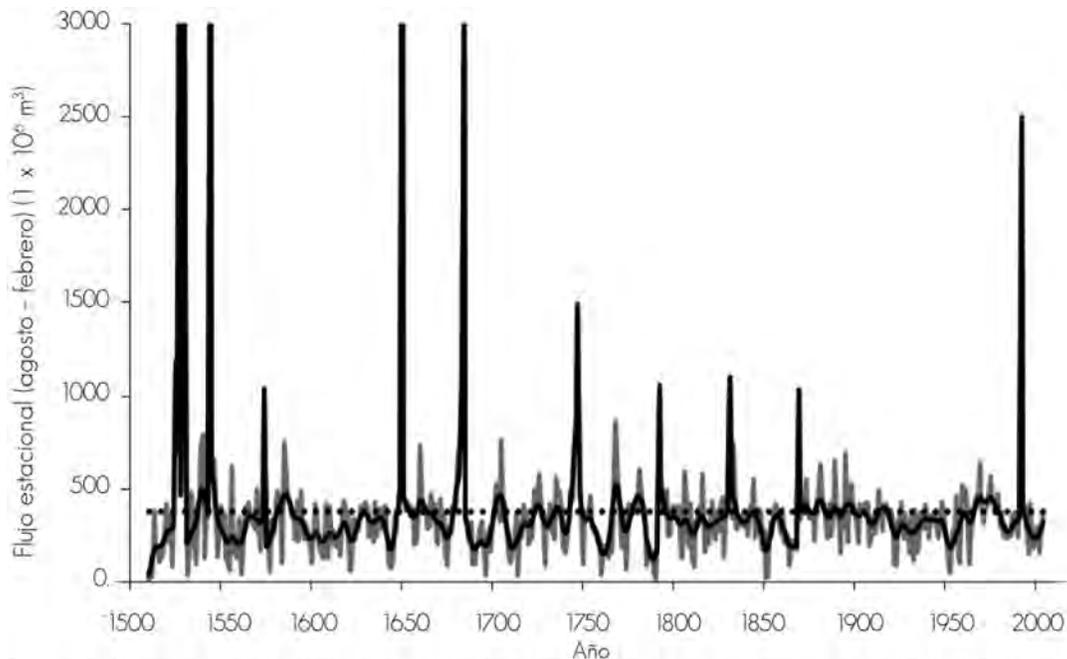


Figura 11. Reconstrucción histórica del flujo hidrológico estacional agosto-febrero, periodo 1510-2004 (495 años) para la cuenca del río Nazas.

En esta reconstrucción, los volúmenes de escurrimiento máximos superaron hasta en más de 300% el promedio de flujo reconstruido ($382.96 \times 10^6 \text{ m}^3$); por ejemplo, tan sólo en el lapso 543-1544 (agosto-febrero) se reconstruyó un escurrimiento de $4,573.665 \times 10^6 \text{ m}^3$. Estos episodios en la parte más temprana de la reconstrucción sugieren una ocurrencia en ciclos de 12 años. A partir de 1573 y hasta 1868, tuvieron lugar cada 45 años y, de esa fecha en adelante, cada 124 años. La variabilidad de flujo en las últimas décadas ha sido afectada, también, por cambios en el uso del suelo en la parte alta y media de la cuenca, particularmente el aprovechamiento

forestal desmedido, el sobrepastoreo, la construcción de presas y de pequeños embalses y bordos de abrevadero; son acciones que han incidido en el comportamiento hidrológico de la cuenca en su totalidad (Descroix et al., 2002).

No obstante lo anterior, los árboles de ahuehuate en el río Nazas constituyen una fuente inigualable para analizar la variabilidad histórica del aforo que ha circulado en este río y que ha sido el principal motor de desarrollo social y económico de dicha región de México.

El fenómeno de El Niño es uno de los patrones de circulación atmosférica que afecta el norte de México y origina un incremento en la precipitación invernal, principalmente en su fase cálida (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999). Al respecto, reconstrucciones en estudios previos (Stahle *et al.*, 1998; Villanueva *et al.*, 2005), evidencian una influencia significativa de este fenómeno. Así en el periodo de 1710 a 2003, el flujo estuvo influenciado por la fase cálida de El Niño; caso específico fueron los años de: 1717, 1725, 1752, 1805, 1855, 1870, 1880, 1888, 1894, 1904, 1925, 1947, 1958 1968, 1974 y 1992 con eventos de mayor precipitación a la media que produjeron flujo hídrico por arriba de la normal. De esta manera, en la segunda mitad del siglo XX, el área irrigada para la Laguna se vio beneficiada al incrementarse la superficie agrícola (>99 000 ha). En la fase fría de El Niño, como sucedió en los periodos 1951-1952, 1962, 1970 y 1995, la producción agrícola en la Comarca Lagunera se vio mermada por la sequía y una disminución considerable de la superficie irrigada (Villanueva *et al.*, 2006).

El periodo de 1510 a 1710, no fue posible compararlo con este fenómeno; ya que se tuvo información sólo a partir de 1710 (Stahle *et al.*, 1998). Sin embargo, los años de: 1514, 1526, 1528, 1529, 1543, 1573, 1649, 1682, 1683 reconstruidos como con altas tasas de escurrimiento, pudieron haber sido efecto de El Niño. Cabe señalar, que otros patrones de circulación atmosférica como la presencia de huracanes en las estaciones verano, otoño y de la incursión de masas de aire frío en la estación invernal, tienen impacto en definir las condiciones hidroclimáticas en el norte de México (Magaña *et al.*, 1999; Brito *et al.*, 2002).

CONCLUSIONES

La serie de tiempo de anillo total de crecimiento anual de *Taxodium mucronatum* mostró correlación significativa con registros de precipitación estacional de verano (julio - septiembre); así como, con el flujo del periodo estacional agosto - febrero.

Los datos paleoclimáticos de precipitación reconstruidos por más de 500 años (1500 - 2003), se caracterizan por su alta variabilidad interanual y multianual.

Sequías recurrentes de intensidad media y severa con efectos sociales y económicos negativos se presentaron en los periodos: 1509-1520, 1548-1559, 1621-1622, 1684-1691, 1758-1763, 1784-1789, 1809-1811, 1846-1849, 1860-1865, 1922-1923, 1949-1956, 1962-1963, 1981-1985 y 1995-2000. Por otra parte, eventos húmedos se detectaron para 1524-1528, 1647-1651, 1679-1685, 1700-1703, 1740-1750, 1871-1880, 1966-1970 y 1988-1992. Algunos particularmente húmedos con precipitación superior al 100% de la media reconstruida ocurrieron en los años: 1526, 1649, 1791, 1830 y 1991.

La reconstrucción de flujos registró la existencia de volúmenes excesivos de agua en años particulares, como fueron: 1514, 1526, 1528, 1529, 1543, 1573, 1649, 1682, 1683, 1746, 1791, 1830, 1868 y 1991. Los volúmenes de escurrimiento más altos observados superaron hasta en 300% el flujo medio reconstruido. Gastos extraordinarios parecen estar ligados a la presencia del fenómeno de El Niño en su fase cálida como en: 1717, 1725, 1752, 1805,

1855, 1870, 1880, 1888, 1894, 1904, 1925, 1947, 1958 1968, 1974 y 1991. Así mismo, se confirmó una correlación significativa ($r = 0.67$, $p < 0.001$) entre precipitación y escurrimiento reconstruido, lo que implica que ambas variables aun están fuertemente correlacionadas con el crecimiento anual de la especie estudiada.

Los tomadores de decisiones en el manejo del agua deben utilizar esta información para fortalecer el desarrollo de los planes de manejo de agua a corto mediano y largo plazo en la Comarca Lagunera, al considerar diferentes escenarios climáticos venideros, que de alguna manera aparecen en esta reconstrucción.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado con recursos de los proyectos "Documentación, entendimiento y proyección de los cambios en el ciclo hidrológico en la cordillera Americana" proyecto No. CRNII-047 con fondos del Instituto Interamericano para el Cambio Climático (IAI, siglas en inglés) y proyecto "Bosques centenarios del centro-norte de México y su potencial para estudios dendroclimáticos y ecológicos", proyecto No.2002/5037 de los fondos sectoriales CONACYT-CONAFOR.

REFERENCIAS

- Brito, L., A. Leyva C., A. V. Douglas and D. Lluch B. 2002. Pacific Decadal Oscillation and the filled capacity of dams on the rivers of the Gulf of California continental watershed. *Atmósfera* 15(2): 121-136.
- Brito, L., S. Diaz C., C. A. Salinas, Z. and V. Douglas A. 2003. Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed. *Journal of Hydrology* 278: 39-50.
- Brouste, L., C. Marlin and L. Dever. 1997. Geochemistry and residence time estimation of groundwater from the upper aquifer of the Chihuahuan Desert (comarca lagunera northern Mexico). *Applied Geochemistry* 12 (N6): 775-786.
- Cerano P., J. 2004. Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. Tesis Profesional. Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Buenavista, Saltillo, Coah. México. 152 p.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Diaz and B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59: 369-388.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2004. Programa hidráulico regional 2002-2006, Región VII: Cuenas Centrales del Norte. México, D. F. México. 30 p.
- Cook, E. R. 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. PhD. Dissertation. School of Renewable Natural Resources, University of Arizona. Tucson, AZ USA. 171 p.
- 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.
- Descroix, L., J. Estrada A. y C. Bouvier. 1993. Hidrometría. Estudios de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. In: J. L. Loyer, J. Estrada A., J. R. Jasso I. y L. Moreno D. (Eds.). Manejo y uso del agua en las cuencas hidrográficas del norte de México. INIFAP, CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. 367 p.
- Descroix, L., J. F. Nouvelot and M. Vauclin. 2002. Evaluation of an antecedent precipitation index to model runoff yield in the western Sierra Madre (North-

- West Mexico). *Journal of Hydrology* 263: 114-130.
- Diaz S., C., R. Touchan and T. W. Swetnam. 2002. A tree-ring reconstruction of past precipitation for Baja California Sur, México. *International Journal of Climatology* 21:1007-1019.
- Douglas, M. W., R. A. Maddox, K. Howard and S. Reyes. 1993. The Mexican monsoon. *Journal of Climate* (6): 1665-1677.
- Endfield, G. H. and I. Fernandez T. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climatic Change* 75: 391-419.
- Escobar O., A. 1997. Las sequías y sus impactos en las sociedades de México decimonónico, 1856 - 1900. In: García, A. V. (Coord.): *Historia y desastres en América Latina, volumen II. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*. México, D. F. México. pp. 2-32.
- Florescano E., M. 1980. Análisis histórico de las sequías en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México, D. F. México. 158 p.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, New York, NY. USA. 567 p.
- Fritts, H. C. 1991. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*. University of Arizona Press. Tucson, AZ. USA. 286 p.
- Fye, F. M., D. W. Stahle and E. R. Cook. 2003. Paleoclimatic analogs to twentieth-century moisture regimes across the United States. *American Meteorological Society* 84 (7): 901-909.
- González-Elizondo, M., E. Jurado, J. Nívar, 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.
- Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57 (2): 205-221.
- Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Jasso I., R., J. Villanueva D., J. L. González B. e I. Sánchez C. 2001. Comportamiento de la relación escurrimiento-precipitación en la cuenca alta del río Nazas. In: *Memoria de la XIII Semana Internacional de Agronomía Facultad de Agricultura y Zootecnia*. Universidad Juárez del Estado de Durango. Gómez Palacio, Dgo. México. pp. 125-129.
- Magaña R., V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa y J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. In: *Magaña R., V. (Ed.). Los impactos del niño en México*. Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México, D. F. México. pp. 23-68.
- Meko, D., C. W. Stockton and W. R. Boggess. 1996. The tree-ring record of severe sustained drought. *Water Resources Bulletin* 950 (43):789-801.
- Pohl, K., M. D. Therrell, J. S. Blay, N. Ayotte, J. G. Cabrera-Hernandez, S. Diaz-Castro, E. Cornejo-Oviedo, J. A. Elvir, M. Gonzalez-Elizondo, D. Opland, J. Park, G. Pederson, S. Bernal-Salazar, L. Vasquez-Selem, J. Villanueva-Diaz and D. W. Stahle. 2003. A cool season precipitation reconstruction for Saltillo, Mexico. *Tree-Ring Research* 59 (1): 11-19.
- Robinson, W. J. and R. Evans. 1980. A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-Ring Bulletin*. 40: 59-64.
- Stahle, D. W. and M. K. Cleaveland. 1993. Southern Oscillation extremes reconstructed from tree rings of the Sierra Madre Occidental and Southern Great Plains. *Journal of Climate* (6):129-140.
- Stahle, D. W., R. D. D'Arrigo, P. J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. D. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Gay, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva D. and L. G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79 (10): 2137-2152.
- 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. 2000. Tree-ring data document 16th century megadrought over North America. *Eos Union* 81(21): 121-125.
- Stahle, D. W., E. R. Cook, J. Villanueva-Diaz, F. K. Fye, D. J. Burnett, R. D. Griffin, R. Acuña-Soto, R. Seager and R. R. Heim Jr. 2009. Early 21st-century drought in Mexico. *Eos* 90(17): 89-90.
- Stokes, M. A. and T. L. Smiley. 1968. *An introduction to tree-ring dating*. University of Arizona Press. Tucson, AZ. USA. 73 p.
- Villanueva D., J., B. H. Luckman, D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, J. Cerano P., G. Gutiérrez G., J. Estrada A. and R. Jasso I. 2005. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, México. *Dendrochronologia* (22): 215-223.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., B. H. Luckman, J. Estrada A., D. W. Stahle, I. Sánchez C., M. D. Therrell y R. Morán M. 2006. Precipitación y flujo histórico de la cuenca Nazas-Aguanaval. Folleto Científico No. 19. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo., México. 44 p.
- Villanueva D., J., P. Z. Fulé, J. Cerano P., J. Estrada A. e I. Sánchez C. 2009a. Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Rev. Cien. For. en Méx.* 34(105): 37-69.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., V. Constante G., P. Z. Fulé y E. Conejo O. 2009b. Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de los recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques* 15(3): 45-64.