



**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA**

CENID-RASPA

Precipitación y Flujo Histórico de la Cuenca Nazas-Aguanaval e Impacto en la Agricultura.

**Dr. José Villanueva Díaz
Ing. Julián Cerano Paredes
Dr. Brian H. Luckman
Dr. Juan Estrada Ávalos
Dr. D. W. Stahle
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Dr. M. D. Therrell
Ing. Roque Morán Martínez**

ISBN:

Folleto Científico 19

Gómez Palacio, Dgo.

Agosto del 2006

PRECIPITACIÓN Y FLUJO HISTÓRICO DE LA CUENCA NAZAS-AGUANAVAL E IMPACTO EN LA AGRICULTURA

Dr. José Villanueva Díaz
Ing. Julián Cerano Paredes
Dr. Brian H. Luckman
Dr. Juan Estrada Ávalos
Dr. D.W. Stahle
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Dr. M.D. Therrell
Ing. Roque Morán Martínez

**CENID-RASPA
2006**

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41

35150 Cd. Lerdo, Dgo.

Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: cenid.raspa@inifap.gob.mx

El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los autores, al CENID-RASPA y al INIFAP.

ISBN:

Prologo

La Comarca Lagunera debe gran parte de su existencia al desarrollo social y económico a los servicios ambientales. De estos, el más importante es el agua que se precipita en la cuenca Nazas-Aguanaval, el cual, un alto porcentaje se encuentra enclavada en la Sierra Madre Occidental. La explotación irracional de los recursos hídricos en la Comarca está produciendo un abatimiento alarmante en el acuífero, lo que acarrea problemas tales como el incremento en los costos y el aumento en la concentración de iones tóxicos, como es el caso del arsénico, poniendo en riesgo la salud en la población que la consume. Toda trabajo de planeación de la explotación de los recursos hídricos, requiere de un estudio detallado del balance hidrológico, variabilidad hidroclimática pasada, factores geológicos y fisiográficos propios de las cuencas, así como del impacto de acciones antropogénicas en la cubierta vegetal y en la relación precipitación-escurrimiento.

La variabilidad hidroclimática natural y el calentamiento global se traducen cada vez con mayor frecuencia en fenómenos climáticos extremos, que traen repercusiones sociales y económicas de alta magnitud en la sociedad. La disponibilidad de datos climáticos instrumentales para análisis de variabilidad climática tiene la limitante de su corta extensión y calidad dudosa. El estudio científico de los anillos de los árboles constituyen el <Proxy> más adecuado para analizar la variabilidad hidroclimática en el período holoceno. En este contexto, el presente folleto científico describe los eventos secos y húmedos que se han presentado en la cuenca Nazas-Aguanaval y cuencas circunvecinas en los últimos 600 años, su duración, frecuencia, así como el impacto de patrones circulatorios, caso específico el Niño Oscilación del Sur.

Los tomadores de decisiones en cuestiones hidrológicas, profesores investigadores en hidrología, climatología, prestadores de servicios forestales, estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado en las áreas de conservación de los recursos naturales y áreas afines encontrarán en este documento información valiosa y de utilidad práctica en las áreas de su conocimiento. La toma de decisiones en la planificación y aprovechamiento adecuados de los recursos hídricos requiere de un conocimiento del clima del pasado que permita entender el presente y definir posibles tendencias futuras.

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director del CENID RASPA

Contenido

| | Pág. |
|---|------|
| Introducción | 1 |
| Área de estudio | 3 |
| Obtención de núcleos de crecimiento y generación de cronologías | 4 |
| Cronologías de anillos de árboles en la Sierra Madre Occidental | 8 |
| Reconstrucciones de precipitación | 12 |
| Comportamiento de eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones de precipitación analizadas | 21 |
| Reconstrucciones de flujo | 25 |
| Variabilidad hidroclimática y su impacto en el área cultivada de la Comarca Lagunera | 32 |
| Conclusiones | 36 |
| Agradecimientos | 38 |
| Referencias | 39 |

Introducción

La dinámica de las actividades agropecuarias de la Comarca Lagunera se explica en gran medida por el suministro de escurrimiento generado en la parte alta de las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval, que según estimaciones alcanza un volumen medio anual de $1,189 \times 10^6 \text{ m}^3$, de los cuales $1,047 \times 10^6 \text{ m}^3$ (88 %) corresponden al río Nazas (media anual de 65 años; 1937-1990, 1993-2003) y solo 142×10^6 (12.0 %) al río Aguanaval (período de 55 años; 1942-1984, 1987, 1989-1990 y 1995-2003) (Descroix *et al.*, 1993, 1997; IMTA, 1997).

Este volumen es dedicado en su totalidad a fines agrícolas, donde en general, la eficiencia de riego es baja en comparación con aquella que se deriva de los volúmenes extraídos del acuífero con ese mismo fin (Comisión Nacional del Agua, 2004). Ambos sistemas endorreicos drenan de manera natural de occidente a oriente y de sur a norte hacia las lagunas de Mayrán y Viesca, respectivamente, sitios que se ubican en la parte más baja (1,100 m) de la Región Hidrológica 36. La construcción de presas con fines de irrigación en puntos estratégicos de estos sistemas hidrológicos originó la disecación paulatina de estos reservorios naturales que ahora lucen desérticos, con una vegetación xerófita y numerosos componentes halófitos.

Actualmente, el agua captada en las presas ubicadas en el río Nazas se libera durante la estación de crecimiento para irrigar una superficie promedio de 67 mil ha año⁻¹ (período 1947–2004) en el Distrito de Riego 017 (Jasso *et al.*, 2001), acción que altera de manera significativa el patrón natural de los escurrimientos durante el año para ajustarse al ciclo de desarrollo de los cultivos que se siembran en la parte baja de la cuenca, esto ha originado serias alteraciones en la composición de las especies riparias, que han sido paulatinamente

sustituidas por algunas con mayor tolerancia a condiciones de sequía, caso específico el incremento en individuos de mezquite, huizache, cactáceas y algunas otras leguminosas, situación que afecta la biodiversidad del ecosistema y su propia estabilidad ecológica.

Para el caso del río Aguanaval, no obstante el escaso volumen de escurrimiento que fluye por su cauce para soportar actividades productivas en la Comarca Lagunera, su importancia estriba en la aportación de agua para riego superficial y recarga del acuífero en la región de Viesca y Matamoros y en el sostenimiento de un ecosistema de galería, en cuyos márgenes se genera la recarga del manto freático, de gran importancia para una agricultura que se fundamentó históricamente en la técnica de anegamiento y actualmente en la extracción de agua mediante un sistema de pozos profundos, complementado con riego por gravedad procedente de manantiales o de presas derivadoras de agua ubicadas en el cauce principal del río (Cháirez y Palerm, 2004).

El entendimiento histórico de la variabilidad hidroclimática en esta región es de gran importancia para el manejo y planificación de los recursos hídricos a corto, mediano y largo plazo; diseño de estructuras hidrológicas, determinación de posibles escenarios climáticos y disponibilidad de agua para diversas actividades económicas y para consumo humano. De esta manera, el objetivo del presente trabajo es plasmar en este documento la información hidroclimática histórica generada hasta el momento para la cuenca Nazas-Aguanaval y cuencas aledañas con el uso de anillos de árboles como «proxy» del clima; definir la presencia de eventos de baja frecuencia en el tiempo (sequías y períodos húmedos), posibles causas y probables escenarios climáticos presentes de alguna manera en las reconstrucciones desarrolladas.

Área de Estudio

La cuenca Nazas-Aguanaval abarca una superficie total de 55 mil 377 km² y forma parte de la Región Hidrológica 36 en los estados de Durango, Zacatecas y Coahuila, donde los ríos Nazas y Aguanaval tienen un área de drenaje de 35 mil 577 y 19 mil 800 km², respectivamente (Figura 1). El régimen de flujo del río Nazas es de carácter perenne y se caracteriza por poseer una descarga máxima de 25 a 74 m³ s⁻¹ en la estación de verano (junio–octubre) y una descarga mínima de 1 a 8 m³ s⁻¹ en las estaciones de invierno y primavera (Estrada, 1995). Por otra parte, el flujo del río Aguanaval es de corta duración, con un máximo de 10 días de flujo continuo, especialmente en la estación de verano y ocasionalmente en el otoño. La descarga máxima medida es del orden de 850 m³ s⁻¹ (Estrada *et al.*, 1993).

La geología de la cuenca Nazas-Aguanaval se encuentra dominada por rocas riolíticas, con suelos someros (20 a 60 cm de profundidad) y clasificados morfológicamente como litosoles y vertisoles, aunque también se encuentran presentes otras órdenes de suelos (Loyer y Moriaud, 1996; Descroix *et al.*, 2002). El clima es subtropical con un régimen de precipitación de verano, donde el 80 por ciento de la precipitación se presenta desde mediados de junio hasta las primeras semanas de octubre. La precipitación total anual varía desde menos de 300 mm año⁻¹ en la parte baja (<1,200 m) a más de 1000 mm en elevaciones superiores (2,800 a 3,300 m) de la cuenca (Estrada *et al.*, 1993; Descroix *et al.*, 2002). La temperatura media varía de 8 a 24 °C en la parte alta, aunque fluctúa de 14 a 20 °C para un gran porcentaje de la cuenca. Una vegetación de bosque mixto de coníferas domina las altas elevaciones (2,400 a 3,200 m), pero en elevaciones inferiores (<1,200 m) los encinares, chaparrales y vegetación semidesértica son las comunidades dominantes (Tarin, 1993).

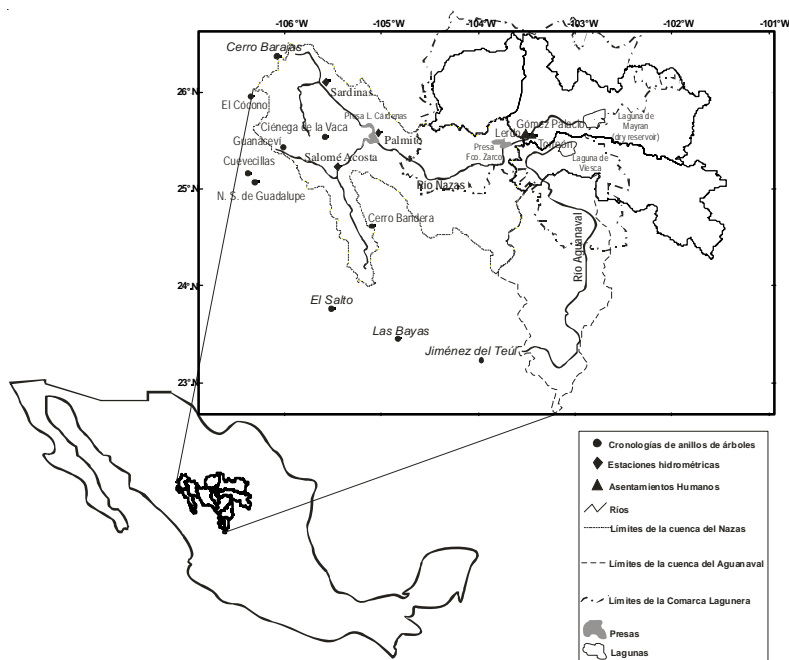


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Nazas-Aguanaval, estaciones climáticas, hidrométricas y cronologías de anillos de árboles.

Obtención de núcleos de crecimiento y generación de cronologías

Núcleos de crecimiento, incrementos o virutas se obtuvieron con un taladro de Pressler de árboles seleccionados de cahuite o ayarín (*Pseudotsuga menziesii*), pino triste (*Pinus lumholtzii*) y de sabino o ahuehuete (*Taxodium mucronatum*) en rodales de bosque mixto y vegetación riparia con poco disturbio. El muestreo de virutas se complementó con la obtención de secciones transversales de material muerto o de tocones de aprovechamientos previos (Figura 2).



Figura 2. Obtención de un núcleo de crecimiento con taladro de Pressler en un espécimen de *Pseudotsuga menziesii*. Los núcleos se obtuvieron en un paraje del sitio de Chifapasco, Guatemala, durante el mes de mayo. Los núcleos se colocaron en bloques de madera acanalados para facilitar su manejo; posteriormente estas se pulieron intensamente con diversos grados de lija (grano grueso a fino, grados progresivos 120, 220, 360 y 400). En el laboratorio de Dendrocronología del INIFAP (<http://www.inifap.gob.mx/contenido/cirs/cenids/dendrocrolologia.htm>) y con la ayuda de un estereomicroscopio trinocular de alta resolución, los anillos se contaron y fecharon al año exacto de su formación mediante el uso de técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968).

La técnica del fechado cruzado o cofechado utilizada para determinar el año exacto 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 anillo de crecimiento se le asignó una fecha exacta al año de su formación (Figura 3). Una vez fechadas las muestras, cada crecimiento individual (anillo total) se midió con un sistema de medición VELMEX con una resolución de 0.01 mm. 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 períodos de 25 años (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Las tendencias biológicas (competencia, liberación) y geométricas (área de fuste se incrementa con la edad y el crecimiento anual tiende a disminuir al distribirse en una mayor superficie) no relacionadas con clima, se removieron con el programa ARSTAN, al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y luego al dividir cada valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva. 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 las especies consideradas, se recopiló de la base climática ERIC (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1997) y de información climática proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, aquellas estaciones climáticas más cercanas a los sitios de colecta. La respuesta climática entre precipitación y el 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). Una vez definido el período de respuesta climática, con la mitad de datos climáticos disponibles se realizó una calibración entre la cronología y los registros estacionales de precipitación y posteriormente con la otra mitad, una verificación (Fritts, 1991).

Finalmente se obtuvo una ecuación de transferencia para el período total de datos de precipitación disponibles, la cual se utilizó para desarrollar la reconstrucción de precipitación en la longitud total de la cronología. A la serie de alta frecuencia (resolución anual) se le ajustó una curva decenal flexible para resaltar la presencia en la reconstrucción de eventos de baja frecuencia como sequías o períodos

húmedos (Cook y Peters, 1981). Los períodos de sequía presentes en la reconstrucción se compararon con períodos similares en otras reconstrucciones de precipitación realizadas para sitios ubicados en las Sierras Madre Occidental.



Figura 3. Núcleos de crecimiento o virutas de *Pseudotsuga menziesii*, fechadas al año de su formación para la generación de series de crecimiento o cronologías de anillos de árboles. Para esta especie en un crecimiento anual se obtienen tres cronologías; una de ancho de anillo total, otra de madera temprana o de primavera (traqueidas grandes, pared celular delgada y de coloración blanca) y una más de madera tardía (traqueidas pequeñas con paredes celulares densas y coloración oscura).

Para efectos de reconstrucción de flujos, las cronologías de madera temprana y de anillo total se compararon con datos de la

sumatoria de gastos de agua de las estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca Nazas-Aguanaval (IMTA, 1997). Debido a que el flujo no es una variable independiente y muestra autocorrelación con eventos hidrológicos previos, los gastos se transformaron (x^2 , \sqrt{x} , $\log(x)$, $1/x$) para normalizarlos y compararlos con los índices dendrocronológicos. El período de flujo acumulado en el cual el crecimiento anual del arbolado responde significativamente, se determinó mediante un análisis de función de respuesta. Para el proceso de calibración, la cronología se comparó con la mitad de los datos de flujo disponibles, mientras que la otra mitad se utilizó para verificar la ecuación. Si ambos períodos resultaron significativos, entonces se procedió a obtener una ecuación de transferencia para el período total de datos instrumentales y a realizar la reconstrucción de flujos. A los datos reconstruidos se les ajustó una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia y posteriormente se compararon con otras reconstrucciones para la región. La presencia en los datos reconstruidos de eventos climáticos extremos se verificó en lo posible con documentos históricos existentes para la región o registros instrumentales.

Cronologías de anillos de árboles en la Sierra Madre Occidental

En los últimos cinco años el INIFAP ha generado una red de cronologías de árboles en la Sierra Madre Occidental y específicamente para la cuenca Nazas-Aguanaval (Figura 4). Estas series de tiempo fluctúan de 300 a más de 600 años y existe un gran potencial para el desarrollo de un mayor número de ellas y aun para extenderlas en el tiempo (Cuadro 1).

Estas series dendrocronológicas son fundamentales para el entendimiento de la variación hidroclimática en la extensión de las cronologías, definición de tasas de crecimiento de especies económicamente importantes, análisis del impacto de plagas y enfermedades, frecuencia de incendios y estudios de dinámica

poblacional para definir sitios con arbolado viejo para propósitos de conservación de la biodiversidad, impacto de actividades antropogénicas en el ciclo hidrológico y pago de servicios ambientales, entre otras aplicaciones. Actualmente se trabaja intensamente en el desarrollo de nuevas cronologías para esta región, las cuales se pueden extender para los últimos 500 años. Estas cronologías permitirán analizar con mayor detalle tanto en espacio como en tiempo la variabilidad hidroclimática que caracteriza a esta región, santuario de producción de agua para la Altiplanicie del Desierto Chihuahuense y la Planicie Costera del pacífico y de producción maderable.



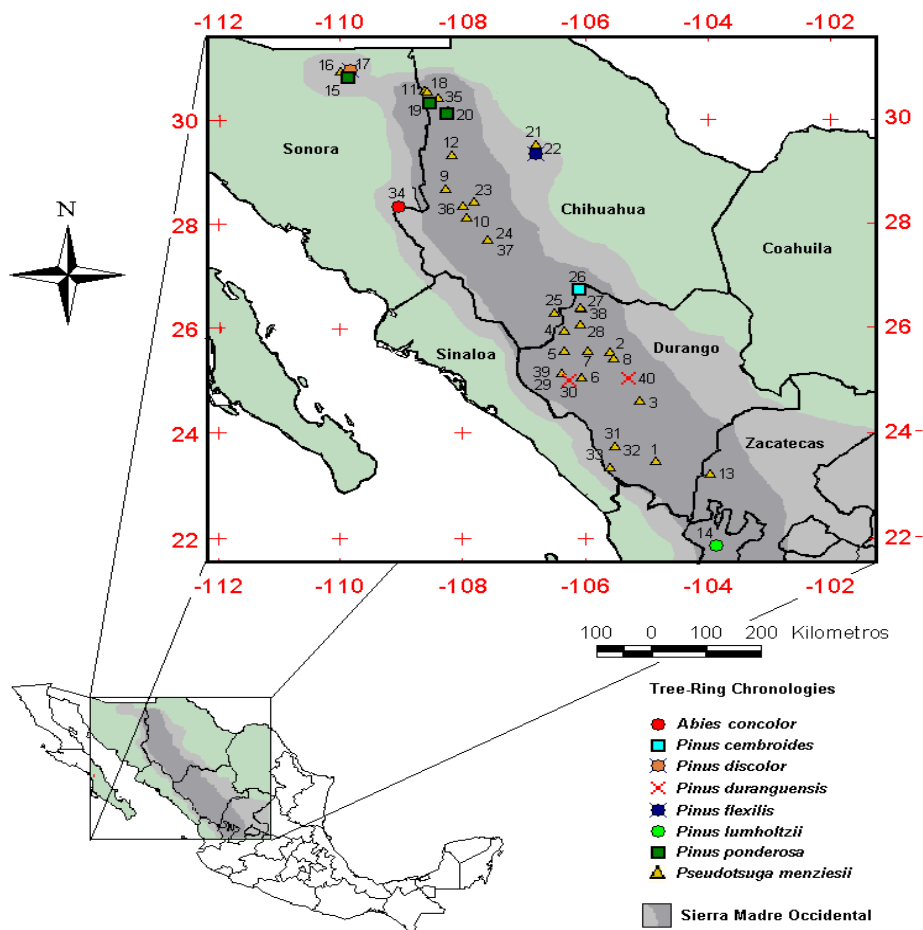


Figura 4. Distribución de cronologías de anillos de árboles en la Sierra Madre Occidental. Un gran número de estas cronologías se ubican en la cuenca Nazas-Aguanaval y cuencas circunvecinas. Estas cronologías constituyen un «proxy» de la disponibilidad de agua tanto para la Planicie Costera del Pacífico como para la Altiplanicie del Desierto Chihuahuense.

Cuadro 1. Ubicación geográfica extensión y tipo de cronologías de anillos de árboles para la Sierra Madre Occidental y específicamente para la cuenca Nazas-Aguanaval. Cronologías generadas por el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP, CENID-RASPA.

| Estado | Nombre del Sitio | Clave | Coordenadas | Longitud de la Cronología | Tipo de Cronología ¹ | Especie ² |
|-----------|----------------------|-------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Durango | Bayas | BAY | 23.453, 104.841; 2980 m | 1681 - 2001 | RW, EW | PM |
| | Crénega de la Vaca | CVC | 25.543, 105.592; 2800 m | 1763 - 2002 | RW, EW, LW | PM |
| | Cerro Bandera | BAN | 24.609, 105.108; 3170 m | 1675 - 2001 | RW, EW, LW | PM |
| | El Cócono | COC | 25.951, 106.356; 1950 m | 1450 - 2002 | RW, EW | PM |
| | Tarahumar | TAR | 25.571, 106.341; 2580 m | 1724 - 2003 | RW, EW, LW | PM |
| | San Diego Tenzáenz | SDT | 25.053, 106.074; 3039 m | 1777 - 2004 | RW, EW, LW | PM |
| | Pitoreal | PIT | 25.559, 105.954; 2730 m | 1693 - 2003 | RW, EW, LW | PM |
| | San Andrés | AND | 25.418, 105.538; 2790 m | 1700 - 2004 | RW, EW, LW | PM |
| | Nazas | NAZ | 25.385, 103.738; 1100 m | 1500 - 2004 | RW | TM |
| | Chiqueros | CHI | 26.186, 106.343; 2900 m | En proceso | RW, EW, LW | PM |
| Chihuahua | Bisaloachi | BIS | 28.657, 108.288; 2744 m | 1472 - 2002 | RW, EW | PM |
| | Cebadillas de Ocampo | CDO | 28.122, 107.950; 2781 m | 1588 - 2002 | RW, EW, LW | PM |
| | Mesa las Guacamayas | MDG | 30.543, 108.619; 2665 m | 1636 - 2002 | RW, EW, LW | PM |
| | Madera | MAD | 29.308, 108.190; 2820 m | 1774 - 2001 | RW, EW, LW | PM |
| | Mohinora | MOH | 25.933, 107.011; 2950 m | En proceso | RW, EW, LW | PM |
| | Jiruico | JIM | 25.148, 103.224; 2840 m | 1644 - 2002 | RW | PC |
| | Barrial de Guadalupe | BDG | 25.990, 103.241; 1295 m | 1834 - 2000 | RW | TM |
| Jalisco | Bolaños | BOL | 21.875, 103.867; 2360 m | 1783 - 2003 | RW | PLU |
| | Sierra los Ajos | SLA | 30.900, 109.950; 2400 m | 1638 - 1992 | RW | PM |
| | Zacatecas | JIM | 23.210, 103.953; 2758 m | 1758 - 2001 | RW, EW, LW | PM |

¹RW: Ancho de anillo total; EW: Madera temprana; LW: Madera tardía.

²TM: *Taxodium mucronatum*; PM: *Pseudotsuga menziesii*; PC: *Pinus cembroides*; PLU: *Pinus lumholtzii*

Reconstrucciones de precipitación

En el norte de México el crecimiento de los árboles y en especial de las coníferas está influenciado por la precipitación que ocurre en el período invierno-primavera, es decir la estación fría del año. La lluvia que se presenta en este período generalmente es de baja intensidad, y gran parte de las veces no llega a sobrepasar la capacidad de infiltración del suelo, por lo que un alto porcentaje de esta lluvia se considera efectiva y queda almacenada en la matriz del suelo para ser aprovechada posteriormente al inicio de la estación de crecimiento. En sitios más elevados de este sistema montañoso se presentan en el invierno nevadas continuas, a veces de alta intensidad, que de igual manera al derretirse contribuyen a incrementar la humedad disponible para el desarrollo de los árboles, especialmente en aquellas exposiciones norte o sitios con poca luminosidad.

Una de las primeras reconstrucciones de precipitación estacional para Durango fue la desarrollada por Cleaveland *et al.*, (2003). Esta reconstrucción de precipitación invernal (noviembre-marzo) se extiende por 608 años (1386–1993) y es todavía la de mayor extensión para el norte de México. La reconstrucción indica la presencia de sequías severas en los períodos 1540–1579, 1857–1872 y 1950–1965. El período más húmedo en la reconstrucción se presentó de 1831 a 1856, período que también se reporta como el más húmedo en los últimos 500 años para el suroeste de los Estados Unidos de América (Fye *et al.*, 2003) (Figura 5). Para la región sur de Durango, una reconstrucción de precipitación invierno-primavera de 321 años de extensión (1681–2001) muestra la presencia de períodos secos en las décadas de 1750 a 1760, 1810 a 1840 y 1950 a 1960 (González *et al.*, 2005).

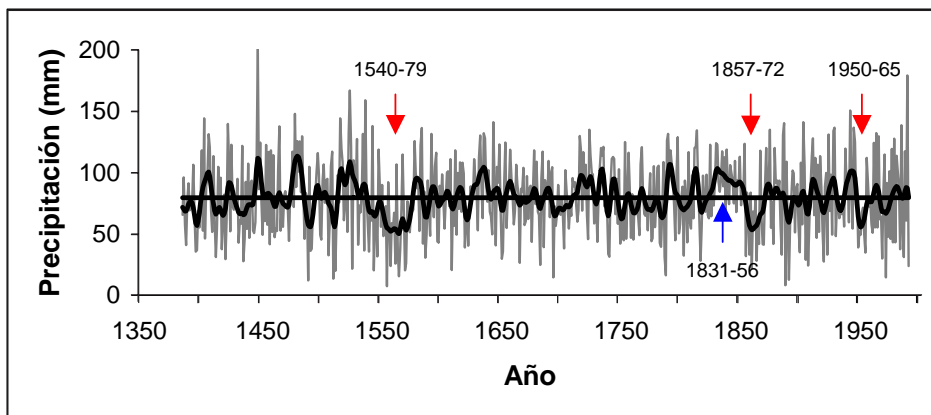


Figura 5. Serie de precipitación invernal reconstruida (noviembre-marzo) para el período 1386–1993 en Durango. La precipitación promedio del período es de 79.4 mm con una desviación estándar de 31.0 mm. Sequías extremas y prolongadas se presentaron en los períodos 1540–1579, 1857–1872 y 1950–1965. Un período húmedo muy extenso se presentó de 1831 a 1856. La línea decenal flexible enfatiza variaciones climáticas de baja frecuencia. Fuente: Cleaveland *et al.*, (2003).

Algunas de estas sequías, específicamente la del período 1540–1579, conocida como «megasequía» (Stahle *et al.*, 2000), se ha relacionado con brotes epidémicos que diezmaron notablemente la población indígena del Valle de México, posterior a la colonización española (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Therrell *et al.*, 2004, 2006). La sequía del período 1950–1965 fue la más intensa del siglo XX, e infligió severos daños socioeconómicos, no sólo a la población de Durango, si no también a diversos asentamientos humanos del norte y centro del país, donde esta sequía se presentó de manera simultánea, según lo hacen constar datos instrumentales, documentos históricos y reconstrucciones paleoclimáticas. Algunos de los períodos secos observados en esta reconstrucción también se detectaron en reconstrucciones de precipitación para Guanaceví, Durango (Figura 6) (Villanueva *et al.*, 2005).

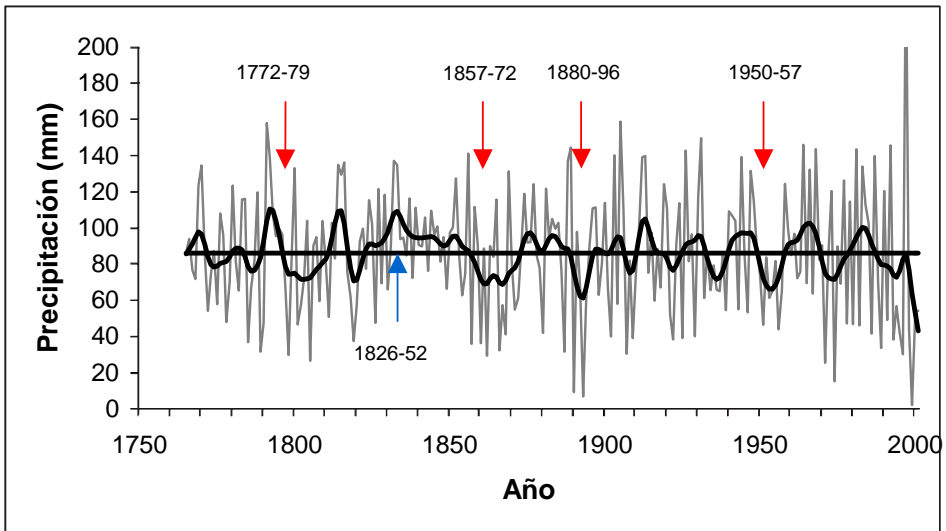


Figura 6. Precipitación reconstruida de las estaciones primavera-verano (noviembre–mayo), período de 1765 a 2001 en Guanaceví, Durango con el uso de nueve cronologías de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii* procedentes de la Sierra Madre Occidental en los estados de Durango y Zacatecas. La curva flexible suavizada representa eventos de precipitación de baja frecuencia ocurridos a lo largo de la reconstrucción. Algunas sequías severas se observaron en los períodos 1772–1779, 1818–1822, 1857–1872, 1880–1896, 1950–1957 y 1988–2001; el período más húmedo se presentó de 1826 a 1852. Fuente: Villanueva *et al.* (2005b).

Una de las reconstrucciones de precipitación invierno-primavera (octubre–mayo) de extensión muy similar a la de Durango, es la realizada para la región que comprende el noroeste de Chihuahua y este de Sonora, con una cronología de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii* procedente del sitio Bisalochi, Chihuahua (Figura 7). Esta reconstrucción de 531 años de extensión (1472–2002) indica la presencia de eventos secos similares a los detectados en Durango, aunque con una intensidad y duración menor, lo cual se atribuye a un período estacional mayor de lluvia reconstruida, ya

que mientras para Durango se reconstruyó el período de precipitación acumulada noviembre–marzo, para la región Chihuahua-Sonora se reconstruyó el período octubre-mayo.

La importancia de esta reconstrucción estriba en que es la primera que se realiza para una región altamente productiva en aspectos agrícolas y pecuarios, cuyo desarrollo económico se sustenta en gran medida en el agua producida en la vertiente oeste de la Sierra Madre Occidental que drena hacia la planicie costera del Océano Pacífico. Los períodos de sequía de mayor frecuencia e intensidad, que en las últimas décadas se han presentado en esta región, han afectado sobremanera la economía de esta zona, lo que ha obligado a la perforación y rehabilitación de pozos profundos para atenuar el déficit de agua, aunque esta acción ha provocado abatimiento del acuífero y suscitado problemas de intrusión de agua salina y en general del deterioro de su calidad.

Para la cuenca baja del Nazas una de las reconstrucciones más representativas de la variabilidad hidrológica que caracteriza a esta región semiárida es una reconstrucción de precipitación estacional de verano, período julio-septiembre, con una cronología de anillo total de *Taxodium mucronatum*, desarrollada con especímenes del bosque de galería distribuidos en el tramo de la presa «Francisco Zarco» y «Sapioriz» (Morán *et al.*, en publicación) (Figura 8). Esta reconstrucción de más de 500 años de extensión (1500–2003) es de suma importancia para el análisis histórico de la precipitación de la parte baja de la cuenca Nazas-Aguanaval, que se caracteriza por poseer una precipitación anual inferior a 300 mm, donde más del 80 por ciento se presenta en los meses de verano. La generación de escurrimiento de la precipitación que se presenta en esta área de la cuenca es insignificante; no obstante lo anterior, esta precipitación contribuye en gran medida a mejorar la productividad de los ecosistemas semiáridos como son los pastizales y matorrales semidesérticos donde se

desarrollan actividades pecuarias y de aprovechamiento de algunas plantas como mezquite, orégano, candelilla, lechuguilla, entre otras.

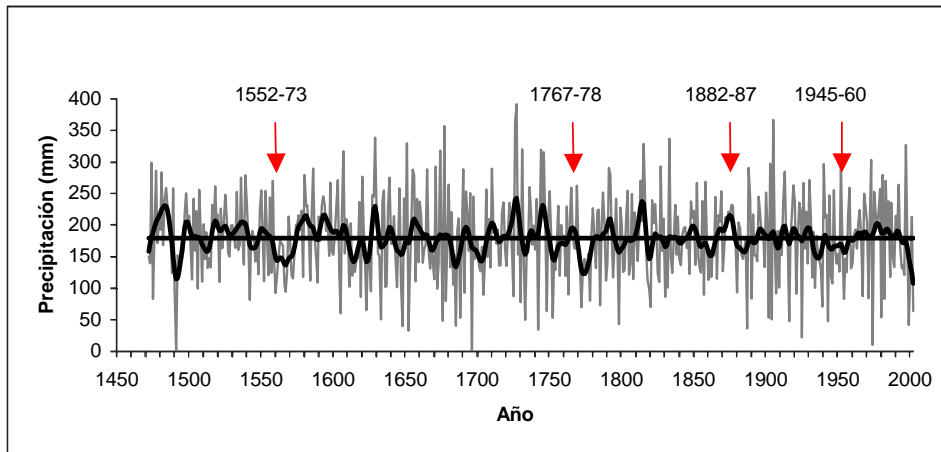
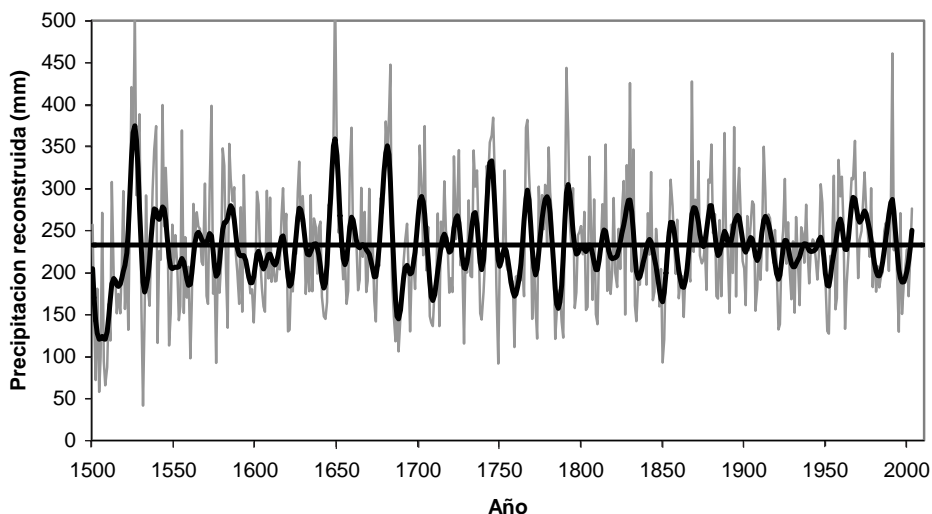


Figura 7. Precipitación estacional reconstruida invierno-primavera (octubre–mayo), período 1472-2002 para el noroeste de Chihuahua y este de Sonora, desarrollada con una cronología EW de *Pseudotsuga menziesii*, procedente del sitio Bisaloachi, Chihuahua, en la Sierra Madre Occidental. El promedio de precipitación para el período reconstruido es de 143.2 mm y una desviación estándar de 52.4 mm. En los 550 años de la reconstrucción se observan sequías recurrentes como las acontecidas en los períodos 1488-1496, 1552-1573, 1611-1626, 1767-1778, 1882-1887, 1945-1960 y 1993-2002; así como períodos húmedos presentes en 1477-1486, 1590-1598, 1649-1661, 1736-1750, 1820-1824, 1873-1878, 1940-1944 y 1972-1979. La línea gruesa es una curva decenal flexible, que enfatiza eventos a nivel década (baja frecuencia). Fuente: Villanueva (datos no publicados).



septiembre), periodo 1500-2003 para la parte baja de la cuenca Nazas-Aguanaval, desarrollada con una cronología de anillo total de *Taxodium mucronatum*, procedente del río Nazas en su tramo presa Francisco Zarco-Sapioriz, Durango. Sequías recurrentes entre períodos cortos y extensos se presentaron a lo largo de la reconstrucción, es decir 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. Episodios húmedos se observan para los períodos 1524-1528, 1647-1651, 1679-1685. 1700-1703, 1740-1750, 1871-1880, 1966-1970 y 1988-1992; además, se presentaron años individuales donde la precipitación superó en más del 100 por ciento a la media reconstruida, caso específico los años de 1526, 1649, 1791, 1830 y 1991 (Morán *et al.*, en publicación).

Para la parte media-baja de la cuenca del río Aguanaval se desarrolló una reconstrucción estacional de precipitación (septiembre-abril) para el período 1641–2002 (362 años) con el ancho total de anillos de pino piñonero (*Pinus cembroides*), colectados en la parte alta de la Sierra de Jimulco (Figura 9). En esta región, los árboles de

piñonero, no obstante ubicarse en elevaciones cercanas a los 3,000 m, constituyen un «proxy» adecuado de la precipitación que ocurre en altitudes inferiores (<1200 m) como las que caracterizan a la parte media y baja del río Aguanaval, al explicar más del 50 por ciento de la variabilidad en precipitación observada en esta región.

Sin embargo, es importante señalar que los árboles de piñonero en las condiciones ecológicas donde se desarrollan registran con mayor fidelidad aquellos años o períodos secos en que la precipitación constituye realmente un factor limitante para su crecimiento. Por otra parte, los árboles modulan con menor fidelidad aquellos eventos de precipitación extremos, donde gran parte de la precipitación se pierde como escorrentía, ya sea porque la precipitación rebasa la tasa de infiltración básica o bien, después de haberse saturado la capacidad de almacenamiento del suelo, así como por presentarse en períodos donde la especie no está fisiológicamente activa (dormancia), cuyos eventos de alta precipitación que producen grandes escurrimientos pasan desapercibidos para el desarrollo de la especie (Fritts, 1976).

La reconstrucción indica períodos de baja frecuencia en los que la precipitación estacional fue inferior a la media (156 mm), caso concreto son los períodos de 1658-1668 (11 años), en el que sólo un año (1667) indicó precipitación superior a la media; 1698-1705 (8 años), 1761-1765 (5 años), 1772-1775 (4 años), 1785-1790 (6 años), 1803-1813 (11 años), 1819-1823 (5 años), 1860-1863 (4 años), 1890-1899 (10 años), 1908-1910 (3 años), 1916-1918 (3 años), 1946-1957 (12 años), donde los años de 1949 y 1952 tuvieron precipitación superior a la media; 1971-1976 (5 años) y 1998-2002 (5 años) (Cuadro 2). Los períodos húmedos fueron menos frecuentes y se presentaron en los años 1655-1657 (3 años), 1743-1747 (5 años), 1756-1760 (5 años), 1786-1791 (6 años), 1833-1837 (5 años), 1844-1848 (5 años), 1958-1961 (4 años), 1964-1971 (7 años) y 1981-1987 (7 años). Muchos de los períodos secos se han detectado simultáneamente en

reconstrucciones de precipitación para el norte de México y específicamente para reconstrucciones con anillos de árboles en las Sierras Madre Oriental y Occidental. De esta manera, los períodos secos de las décadas de 1660, 1690, 1790, 1810, 1860, 1890, 1920, 1950, 1970 y 1990, se encuentran presentes en reconstrucciones para Saltillo, Nuevo León y Tamaulipas en el noreste de México (Pohl *et al.*, 2003; Cerano, 2004; Villanueva *et al.*, 2005a) y episodios muy secos como el de las décadas de 1660, 1760, 1860 y 1950 también se encuentran presentes en reconstrucciones para el norte y noroeste de México (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2005a; Villanueva *et al.*, 2005b).

La intensidad de estas sequías comunes ha variado de región en región acorde a las características fisiográficas de cada localidad, distanciamiento al océano y patrones circulatorios dominantes; sin embargo, es evidente que estas sequías de impacto generalizado han estado influenciadas de manera común por patrones circulatorios de gran magnitud, caso específico El Niño Oscilación del Sur (ENSO, siglas en Inglés), Monzón de Norteamérica o Monzón Mexicano (NAMS, siglas en Inglés), entre otros (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999; Cleaveland *et al.*, 2003).

Es importante, sin embargo, analizar a detalle la extensión de estas sequías y los probables mecanismos circulatorios que les dieron origen; de esta manera, será posible explicar los eventos de baja frecuencia que se han presentado de manera rutinaria cada 50 ó 100 años en el norte-centro de México y contar con los elementos técnicos para modelar posibles escenarios futuros del clima en esta región del norte de México, lo que es de gran valía para la planeación del aprovechamiento adecuado de los limitados recursos hídricos con que cuenta esta región.

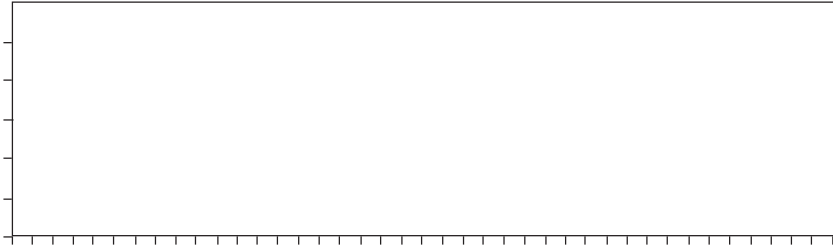


Figura 9. Precipitación estacional reconstruida (septiembre–abril) del período 1641–2002 para la sección media-baja del Río Aguanaval. La reconstrucción indica alta variabilidad climática a lo largo de 362 años de la serie de tiempo reconstruida. Una curva flexible (línea sólida oscura) se ha insertado a la reconstrucción estacional (línea sólida tenue) para resaltar eventos de baja frecuencia. La reconstrucción indica sequías severas en los períodos de 1658-1668, 1698-1705, 1761-1765, 1772-1775, 1785-1790, 1803-1813, 1819-1823, 1860-1863, 1890-1899, 1908-1910, 1916-1918, 1946-1957, 1971-1976 y 1998-2002. Un período húmedo se presentó de 1833 a 1837, aunque continuó prácticamente hasta 1850.

Cuadro 2. Períodos mayores de tres años en los que la precipitación reconstruida para la sección media-baja del río Aguanaval fue inferior a la media (156 mm) de la reconstrucción estacional.

| Período | Promedio (mm) | Desviación Estándar (mm) | Número de años |
|--------------|---------------|--------------------------|----------------|
| Período seco | | | |
| 1658-1668 | 124 | 25 | 11 |
| 1698-1705 | 135 | 27 | 8 |
| 1761-1765 | 132 | 21 | 5 |
| 1772-1775 | 103 | 34 | 4 |
| 1785-1790 | 113 | 51 | 6 |
| 1803-1813 | 118 | 52 | 11 |
| 1819-1823 | 96 | 27 | 5 |
| 1860-1863 | 127 | 20 | 4 |
| 1890-1899 | 131 | 40 | 10 |
| 1908-1910 | 117 | 16 | 3 |
| 1916-1918 | 100 | 45 | 3 |
| 1946-1957 | 127 | 36 | 12 |
| 1972-1976 | 132 | 20 | 5 |
| 1998-2002 | 113 | 19 | 5 |

Comportamiento de eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones de precipitación analizadas

Al comparar para un mismo período las tendencias de baja frecuencia (10 años) para las diversas reconstrucciones desarrolladas, se observa

la presencia de eventos comunes, lo cual es indicativo de que patrones circulatorios de gran magnitud han impactado históricamente y de manera similar una amplia zona del país (Figura 10). De esta manera, se observan sequías comunes para estas reconstrucciones en las décadas de 1780, 1810, 1860, 1950 y al final de 1990. En el siglo XX, la sequía de mayor intensidad se presentó en la década de 1950, lo cual se ha verificado tanto con datos instrumentales como con documentos históricos y reconstrucciones paleoclimáticas. Los diversos períodos secos y húmedos detectados en las reconstrucciones existentes con cronologías de anillos de árboles en la Sierra Madre



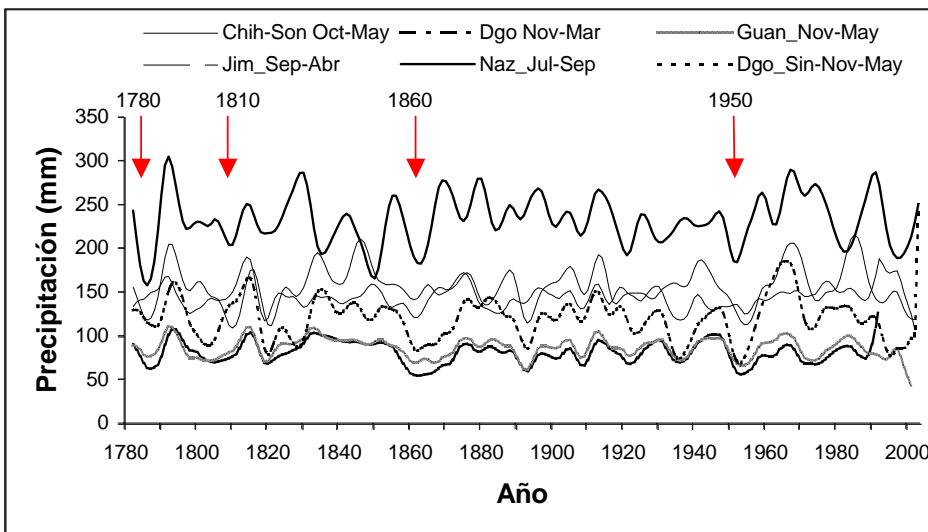


Figura 10. Comportamiento de las líneas flexibles decenales que resaltan eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones estacionales de precipitación en la Sierra Madre Occidental. Se observa que las reconstrucciones más relacionadas fueron las desarrolladas para Durango (Dgo Nov-Mar), Guanaceví (Guan_Nov-May) y región de Durango y Sinaloa (Dgo_Sin-Nov-May) con correlaciones de 0.81, 0.77 y 0.61, respectivamente). La correlación entre las reconstrucciones de Guanacevi (Guan_Nov-May) y de la parte media-baja del río Aguanaval (Jim_Sep-Abr) tuvieron una correlación de 0.65, no obstante que el período reconstruido fue diferente; lo cual indica que la lluvia en esta región esta influenciada por patrones circulatorios comunes. Diversos períodos de sequía fueron similares para las reconstrucciones realizadas, caso concreto las sequías de las décadas de 1780, 1810, 1860, 1890, 1910, 1950 y últimos años del siglo XX.

Cuadro 3. Períodos secos y húmedos detectados en las reconstrucciones estacionales de precipitación para la Sierra Madre Occidental.

| Sito Reconstituido | Período | Estación reconstruida | Períodos secos | Períodos húmedos | Fuente |
|-------------------------------|-----------|-----------------------|---|--|--|
| Durango | 1386-1993 | noviembre-marzo | 1540-79, 1857-72, 1950-65 | 1831-56 | Cleaveland <i>et al.</i> , 2003 |
| Guanaceví, Dgo. | 1765-2001 | noviembre-mayo | 1772-79, 1818-27, 1857-72, 1880-96, 1950-57, 1988-2001 | 1826-52 | Villanueva <i>et al.</i> 2005 |
| NE Chihuahua-Sonora | 1472-2002 | octubre-mayo | 1488-96, 1552-73, 1611-26, 1767-78, 1882-87, 1945-60, 1993-2002 | 1477-86, 1590-98, 1649-61, 1736-50, 1820-24, 1873-78, 1940-44, 1972-79 | Villanueva <i>et al.</i> , en publicación |
| NW México (Dgo., Chih., Sin.) | 1449-2002 | Noviembre-mayo | 1493-1528, 1560-75, 1542-57, 1620-30, 1645-61, 1698-1725, 1727-49, 1750-68, 1798-1807, 1818-30, 1859-73, 1947-57, 1993-2002 | 1542-57, 1645-61, 1727-49, 1833-45, 1958-69 | Villanueva <i>et al.</i> , datos no publicados |
| Nazas, Dgo. | 1500-2003 | julio-septiembre | 1509-20, 1548-59, 1684-91, 1758-63, 1784-89, 1809-11, 1860-65, 1949-56, 1981-85, 1995-2000 | 1524-28, 1647-51, 1679-85, 1740-50, 1871-80, 1966-70, 1988-92 | Morán <i>et al.</i> , en publicación |
| Aguanaval, Dgo | 1641-2002 | septiembre-abril | 1658-68, 1698-1705, 1761-65, 1772-75, 1785-90, 1803-13, 1819-23, 1860-63, 1890-99, 1908-10, 1946-57, 1971-76, 1998-2002 | 1833-37 | Villanueva <i>et al.</i> , en publicación |
| Chihuahua | 1647-1992 | noviembre-abril | 1751-65, 1798-1810, 1952-57 | 1790's, 1830's, 1905-32 | Díaz <i>et al.</i> , 2002 |
| Sur de Dgo. | 1681-2001 | noviembre-mayo | 1696-1709, 1739-43, 1749-55, 1772-79, 1797-1805, 1857-76, 1907-10, 1916-22, 1932-39, 1969-2001 | 1831-47, 1953-68, 1983-85 | González-Elizondo <i>et al.</i> , 2005 |

Reconstrucciones de flujo

La información disponible relacionada con el comportamiento histórico de gastos de agua es muy limitada en México. Muchos de los datos hidrométricos instrumentales son de corta duración, con datos faltantes y algunas veces de calidad dudosa. En la cuenca Nazas-Aguanaval, las series de tiempo hidrométricas, generalmente no se extienden más allá de 50 años; no obstante lo anterior, el diseño de estructuras hidráulicas y la planeación y manejo de los recursos hídricos se fundamenta en estas series cortas de información, lo cual conlleva en la mayoría de los casos a un uso inadecuado de los recursos hídricos.

Para la cuenca Nazas-Aguanaval el INIFAP CENID-RASPA ha generado dos reconstrucciones de flujo que amalgaman la variabilidad hidroclimática que caracteriza a superficies específicas de la cuenca; así por ejemplo, la reconstrucción de flujo para la parte alta del Nazas con una vegetación de bosque mixto describe el comportamiento estacional histórico del flujo en la estación hidrométrica «Sardinas» para el período 1765–2002 (Figura 11), la cual es representativa del gasto producido en casi 4,700 km² de superficie de esta cuenca, área que se caracteriza por poseer la producción de escurrimiento más alta (2.45 l s⁻¹ m²) de la cuenca Nazas-Aguanaval, lo que justifica la importancia de esta reconstrucción. Los períodos secos se definieron cuando el flujo reconstruido fue inferior al promedio (271.05 x 10⁶ m³). Durante el siglo XX estas sequías se presentaron en las décadas de 1900, 1930, 1950

y 1990; sin embargo, en un período de sequía prolongado no todos los

años se presentan con gasto escaso, así, en la sequía de 1918 a 1937, siete años fueron reconstruidos con flujo elevado y se indica que para estos años en la Comarca Lagunera se cultivó una superficie promedio anual de 135 mil ha (Chaírez y Palerm, 2004). La sequía más prolongada en el período reconstruido se presentó de 1850 a 1870, cuando 18 años promediaron $215.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, gasto

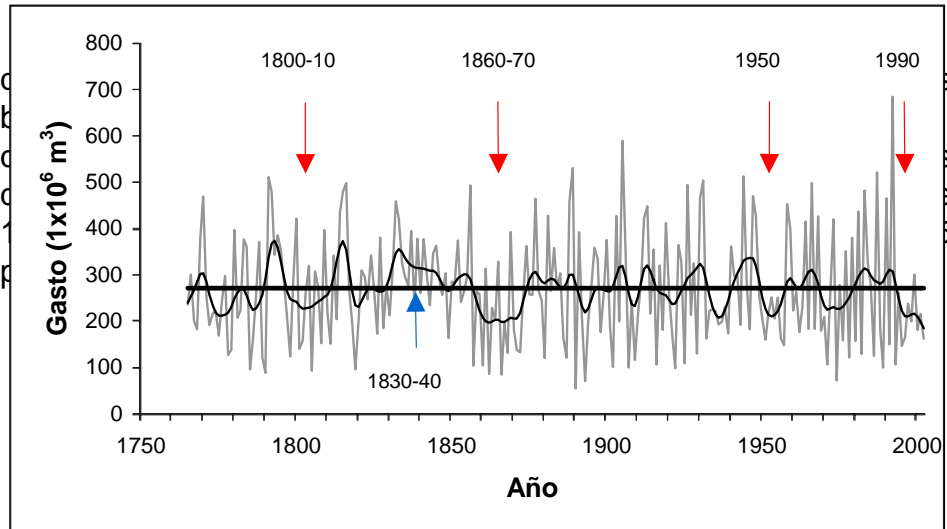


Figura 11. Flujo estacional reconstruido de septiembre del año previo a junio del año actual para el período 1765 a 2002 para la estación hidrométrica «Sardinas». La línea decenal flexible enfatiza eventos de baja frecuencia como las sequías detectadas en los períodos de 1800-1810, 1860-1870, 1950 y 1990; un período húmedo se presentó en las décadas de 1830 y 1840, este último también presente en el norte de México y centro y sur de los Estados Unidos de América.

El «Análisis de Poder Espectral» indica que el flujo reconstruido captura la señal del Niño Oscilación del Sur en frecuencias de 3.2 y 3.7 años; asimismo, se observan diferencias para eventos «El Niño», «La Niña» y años «normales». Periodicidades similares se han reportado para el norte y noroeste de México (Stahle *et al.*, 1998; Brito-Castillo *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2005b).

Para fines de toma de decisiones en el manejo de los gastos de agua en la Comarca Lagunera y en otras áreas agrícolas de la Planicie Costera del Pacífico, ésta debería fundamentarse en los flujos observados en años considerados como «normales» y descartar aquellos con influencia del efecto del Niño, ya que este fenómeno circulatorio distorsiona el flujo promedio al incrementar o disminuir la precipitación para un año o para un período de dos o más años. De esta manera, el flujo observado en el período 1950–1993 fue casi el doble del observado en los años «normales» y triplicó aquel de los años con la influencia de la «Niña» (Cuadro 5)

Cuadro 4. Períodos con flujo inferior y superior al promedio de flujo reconstruido ($271.05 \times 10^6 \text{ m}^3$) para la estación hidrométrica Sardinás.

| Período | Promedio anual ¹ ($\text{m}^3 \times 10^6$) | Número de años | Período | Promedio anual ¹ ($\text{m}^3 \times 10^6$) | Número de años |
|--------------------|---|----------------|---------------------|---|----------------|
| Abajo del promedio | | | Arriba del promedio | | |
| 1857–1874 | 208.4 | 18 | 1831–1846 | 328.5 | 16 |
| 1797–1811 | 233.8 | 15 | 1981–1987 | 328.0 | 7 |
| 1970–1978 | 220.0 | 9 | 1791–1796 | 392.7 | 6 |
| 1994–2002 | 207.4 | 9 | 1812–1816 | 391.2 | 5 |
| 1772–1779 | 200.1 | 8 | 1944–1948 | 373.6 | 5 |
| 1950–1957 | 199.9 | 8 | 1903–1906 | 393.2 | 4 |
| 1933–1939 | 208.9 | 7 | 1912–1915 | 359.9 | 4 |
| 1785–1789 | 200.8 | 5 | 1928–1931 | 355.8 | 4 |
| 1892–1895 | 187.4 | 4 | | | |
| 1907–1910 | 168.0 | 4 | | | |

¹Promedio de años individuales.

Cuadro 5. Estadísticas descriptivas del efecto del Niño en la precipitación y flujo estacional para el período de registros climáticos instrumentales y reconstruidos de 1950 a 1993. Existe una similitud significativa entre los registros instrumentales y los datos reconstruidos.

| Evento climático 1950-1993 | Estadísticas Descriptivas | | | |
|--|---------------------------|-------|---------|------------------|
| | Años | Media | Mediana | Máximo Mínimo |
| Precipitación medida (instrumental) | | | | |
| Años con Fase Cálida "El Niño" | 7 | 139 | 118 | 307 72 |
| Años con Fase Fría "La Niña" | 7 | 50 | 34 | 108 13 |
| Años "Normales" | 30 | 77 | 73 | 166 26 |
| Precipitación reconstruida | | | | |
| Años con Fase Cálida "El Niño" | 7 | 126 | 124 | 146 82 |
| Años con Fase Fría "La Niña" | 7 | 51 | 44 | 82 15 |
| Años "Normales" | 30 | 78 | 76 | 146 34 |
| Flujo reconstruido | | | | |
| Años con Fase Cálida "El Niño" | 7 | 462 | 482 | 684 178 |
| Años con Fase Fría "La Niña" | 7 | 159 | 158 | 250 71 |
| Años "Normales" | 30 | 244 | 208 | 465 99 |

En la cuenca Nazas-Aguanaval una de las reconstrucciones importantes de flujo es la desarrollada para la sección media-baja del río Aguanaval. Esta reconstrucción realmente representa el flujo base de la subcuenca La Flor y no el flujo total registrado en la estación hidrométrica del mismo nombre (sin considerar el volumen derivado al Canal Sombreretillo), que supera en promedio los $120 \times 10^6 \text{ m}^3$ anuales y que está constituido en gran parte por el escurrimiento superficial (aguas broncas) de eventos de alta intensidad que se presentan en los meses de verano (junio–octubre) y a los cuales las especies arbóreas utilizadas en esta reconstrucción no fueron climáticamente sensitivas.

La reconstrucción de flujo indica variabilidad de alta y baja frecuencia en el tiempo, es decir, la presencia frecuente de años húmedos y secos y períodos continuos de sequía que se extienden hasta por más de 10 años (Figura 12). En esta región de la parte baja del río Aguanaval, eventos secos de tres o más años consecutivos de extensión, con flujo inferior al histórico promedio reconstruido ($23.4 \times 10^6 \text{ m}^3$) se presentaron en los períodos 1840-1843 (3 años), 1853-1855 (3 años), 1873-1884 (12 años), 1904-1911 (8 años), 1921-1923 (3 años), 1953-1958 (6 años), aunque en este período los años de 1955, 1956 y 1958, mostraron flujo ligeramente superior al promedio y el último período seco se presentó de 1993 al 2000 (8 años).

En la cuenca del río Aguanaval existe poca información histórica documentada de las sequías o de grandes avenidas que afectaron esta región. Los registros instrumentales indican que períodos de sequía se presentaron de 1948 a 1954 y de 1960 a 1964, con fuertes crecientes en los años de 1953, 1970, 1973, 1976, 1996 y 1998 (Comisión Nacional del Agua, 1999). Los períodos secos reportados coinciden en gran parte con los datos reconstruidos, no así los años con fuertes crecientes, lo cual es indicativo de que dicho flujo pudo haber estado compuesto en alto porcentaje por escurrimiento superficial.

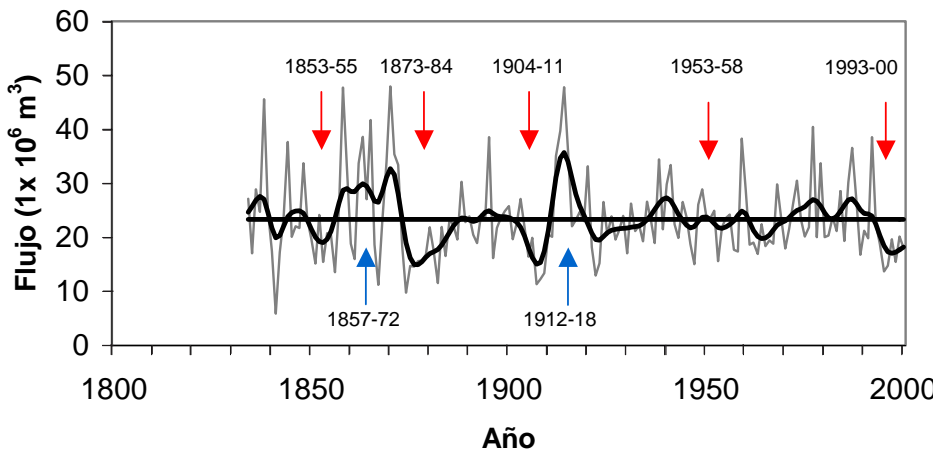


Figura 12. Flujo anual reconstruido (julio–junio) del período 1834–2000 para la sección media-baja del río Aguanaval. La reconstrucción indica alta variabilidad climática en 167 años de la serie de tiempo reconstruida. Una curva flexible (línea sólida oscura) se ha insertado a la reconstrucción (línea sólida tenue) para resaltar eventos de baja frecuencia. En esta región, eventos secos de tres o más años consecutivos se presentaron en los períodos 1840-1843, 1853-1855, 1873-1884, 1904-1911, 1921-1923, 1953-1958 y 1993-2000. Períodos húmedos se detectaron de 1857 a 1872 y de 1912 a 1918. El flujo reconstruido es básicamente el flujo base de la subcuenca La Flor, ya que los árboles no captan eventos extremos de alto escurrimiento producidos en los meses de verano.

La variabilidad histórica de flujos de agua reconstruidos en el norte de México es difícil de comparar, ya que actualmente esta información es prácticamente inexistente y sólo se tiene conocimiento de dos reconstrucciones de este tipo, una para la cuenca continental del Golfo de California (Brito-Castillo *et al.*, 2003) y otra más para la parte forestada de la cuenca del Nazas (Villanueva *et al.*, 2005b).

No obstante lo anterior, es interesante observar en estas reconstrucciones la presencia común de flujos inferiores al promedio para períodos específicos de tiempo, caso concreto las décadas de 1860, 1900, 1920 y 1950. La década de 1990 sólo se encuentra presente en la actual reconstrucción, pero los datos hidrométricos instrumentales utilizados para realizar las otras reconstrucciones corroboran la presencia de gastos inferiores al promedio (Figura 13). La información anterior es una prueba fehaciente de la sensibilidad y potencial que tienen algunas series dendrocronológicas para captar la variabilidad climática mediante un elemento integrador que es el flujo de agua, elemento que realmente constituye la variable más importante para la planeación y manejo de este recurso con fines agropecuarios en una cuenca hidrológica específica como es la que alimenta al río Aguanaval.



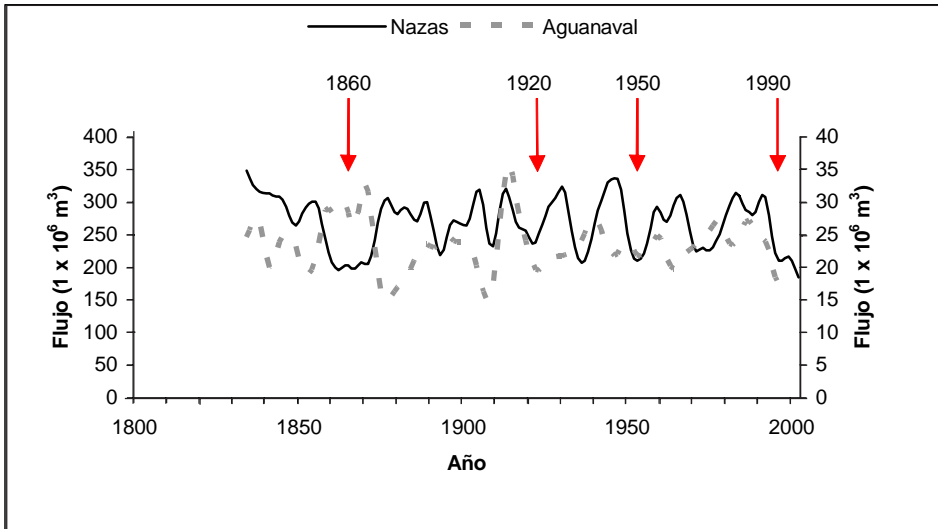


Figura 13. Comparación del flujo estacional reconstruido para los ríos Nazas y Aguanaval. La correlación observada entre ambas reconstrucciones no es significativa ($r = 0.17$, $p=0.03$) debido a que uno constituye el flujo estacional reconstruido para la estación hidrométrica «Sardinas» en la cuenca alta del río Nazas y el otro representa el flujo base para la sección media-baja del río Aguanaval. No obstante lo anterior, ambas reconstrucciones muestran caídas en el gasto para períodos en que se han detectado sequías regionales como en las décadas de 1860, 1900, 1920 y 1950.

Variabilidad hidroclimática y su impacto en el área cultivada de la Comarca Lagunera

La superficie agrícola de la Comarca Lagunera que se irriga con agua de escurrimiento de los ríos Nazas y Aguanaval, históricamente ha dependido de los volúmenes de agua que fluyen por dichos cauces y que dependen de la relación lluvia-escurrimiento en el área de captación de la cuenca Nazas-Aguanaval. La

construcción de grandes reservorios de agua en los cauces principales de estos sistemas hidrológicos modificó de manera abrupta el régimen natural de flujo y actualmente la superficie irrigada en un año determinado depende del agua almacenada un año previo al ciclo de cultivo (Comisión Nacional del Agua, 1999). Datos históricos de la superficie sembrada de algodón, período 1852-1968 indican una correlación significativa entre los volúmenes anuales del agua en el río Nazas y la superficie cosechada de algodón en el período 1852-1946 ($r= 0.71$, $p<0.0001$) (Figura 14).

Después de 1947 y hasta 1968, la correlación entre superficie cosechada y volumen de agua decae bruscamente e inclusive se torna negativa ($r = -0.3$), debido a que el flujo ya no es el natural, sino que corresponde al almacenado en las presas y que es posteriormente liberado durante el ciclo de cultivo. Por otra parte, la diversificación de cultivos e incremento en los costos de producción de la fibra originó una caída paulatina en la superficie sembrada de este cultivo, aunque actualmente existe un resurgimiento en el cultivo del algodón debido a su buena rentabilidad, y en el 2005 se reporta una superficie cultivada superior a 20 mil ha.



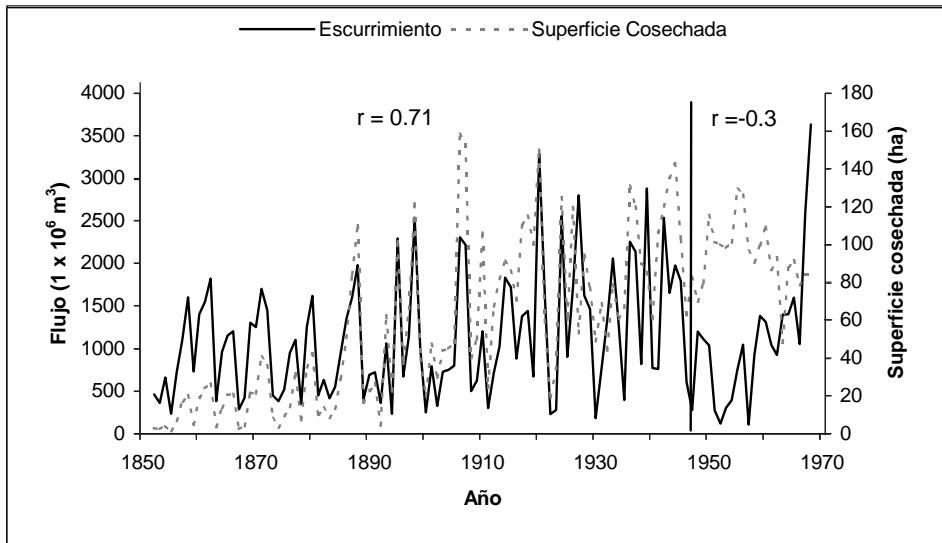


Figura 14. Relación entre la superficie cosechada de algodón en la Comarca Lagunera y el flujo histórico de agua en el río Nazas. Del período 1852 a 1946 el volumen es natural, pero a partir de 1947 corresponde al volumen almacenado en las presas. Se observa una asociación significativa ($r = 0.71$, $p < 0.0001$) entre el flujo y superficie cosechada de algodón antes de 1947, pero luego decae y se torna negativa ($r = -0.3$, $p > 0.05$) de 1947 a 1968. Fuente: Datos históricos de flujo y superficie de algodón, proporcionados por el Sr. Mario Enrique Vázquez Ávila del grupo Acción privada «MEVA».

En el período de 1947 al 2004 en la Comarca Lagunera, la superficie cultivada con agua de las presas ha fluctuado considerablemente como función del agua almacenada en dichos reservorios y a su vez dicho volumen está gobernado por la variabilidad hidroclimática existente y por acciones antropogénicas que producen cambios marcados en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

De esta manera, las sequías de la décadas de 1950, 60 y 70 ocasionaron un decremento severo en la superficie cultivada. En la décadas de 1980 y 1990 fue superior al promedio y nuevamente de 1995 en adelante se observa una disminución en dicha superficie (Figura 15).

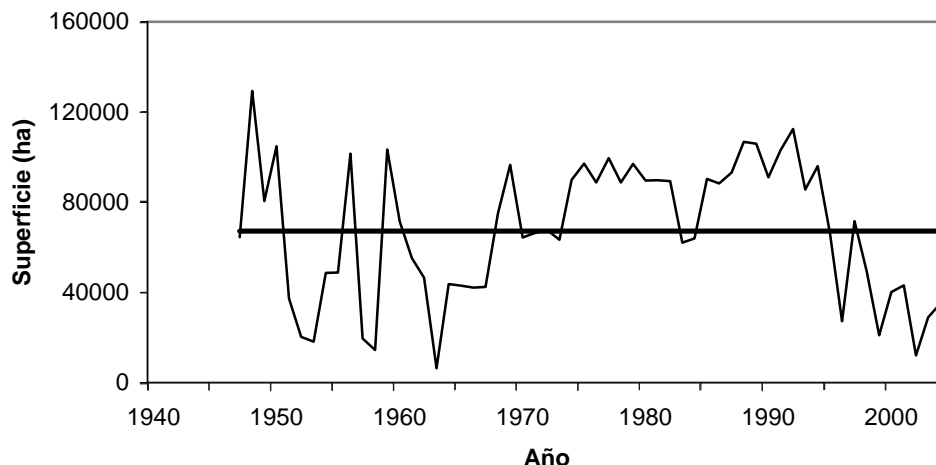


Figura 15. Comportamiento de la superficie sembrada con agua de las presas en la Comarca Lagunera para el período 1947-2004. El comportamiento del área cultivada indica alta variabilidad en el tiempo como efecto de la variabilidad hidroclimática que caracteriza a la región. Así, esta superficie decayó drásticamente en los períodos secos de 1950, 1960, 1970 y en la última década del siglo XX.

Conclusiones

El entendimiento de la variabilidad hidroclimática es fundamental para el manejo del agua, especialmente en una región sujeta a extrema presión social por los recursos hídricos disponibles. Las cronologías de anillos de árboles son los «proxys» de resolución anual más confiables para extender en el tiempo la información climatológica, ya que los registros instrumentales (precipitación y datos hidrométricos), como es en el caso de la Comarca Lagunera, no se extienden más allá de los últimos 60 años. La integración de una red de cronologías de árboles en la cuenca Nazas-Aguanaval y cuencas circunvecinas es un proceso dinámico, y es básico para generar una perspectiva histórica del clima, entender el presente y tener herramientas técnicas para analizar escenarios climáticos venideros y su impacto potencial en la disponibilidad de los recursos hídricos para diversos fines.

Actualmente el INIFAP ha desarrollado 18 cronologías de anillos de árboles en esta región y dos más que se encuentran en proceso de completar; no obstante lo anterior, esta tarea apenas inicia, ya que para un entendimiento detallado del impacto histórico del clima y de los patrones circulatorios que lo afectan es imperante el ampliar esta red de cronologías y analizar el potencial de nuevas especies que detecten la influencia de la precipitación tanto de invierno como de verano, y con ello cuantificar el impacto de patrones circulatorios como el Niño Oscilación del Sur, Sistema del Monzón de Norteamérica, tormentas tropicales, lluvias convectivas, etc.

La reconstrucción dendroclimática de la cuenca Nazas-Aguanaval constituye una primera aproximación para el entendimiento histórico de la variabilidad hidroclimática que ha caracterizado a esta región en los últimos 600 años. Las sequías son un fenómeno recurrente que afectan de manera frecuente no sólo la cuenca Nazas-Aguanaval, si no también de manera simultánea

otras cuencas del norte de México; lo cual se corrobora con la presencia de sequías comunes de alta intensidad y duración que afectaron igualmente desde el centro hasta el norte de México e inclusive centro y sur de los Estados Unidos de América. Así, en los últimos seis siglos estas sequías se han presentado hasta por períodos consecutivos de más de 40 años.

El volumen de flujo que drena hacia los tributarios que alimentan los ríos Nazas y Aguanaval está relacionado significativamente con la precipitación; las reconstrucciones sin embargo indican que en los últimos años esta relación ha disminuido, lo cual puede atribuirse a cambios en el uso del suelo, situación que probablemente ha incrementado el flujo superficial en detrimento del flujo base; este último de mayor importancia en el sostenimiento de una vegetación riparia del cauce de estos ríos, donde se produce la recarga del manto freático. La construcción de más obras hidráulicas en áreas rivereñas pueden ser detrimental en términos de alterar la recarga del manto freático, impactar la biodiversidad y afectar sistemas productivos aguas abajo que dependen del agua producida en partes superiores de la cuenca.

El análisis histórico hidroclimático en este contexto es puramente técnico, no obstante que los aspectos sociales y económicos deben ser analizados en conjunto con el análisis histórico, para lograr una mejor visión o un mejor entendimiento del pasado. El análisis de la variabilidad hidroclimática a nivel de resolución anual y multianual es importante para planear un manejo sustentable a corto y mediano plazo de los recursos hídricos con que cuenta la Comarca Lagunera y otras áreas consumidoras del agua, que dependen de los recursos hídricos producidos en regiones hidrológicas enclavadas en la Sierra Madre Occidental.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento otorgado a través de los proyectos «Bosques centenarios del centro-norte de México y su potencial para estudios dendroclimáticos y ecológicos» (CONAFOR-2002-C01-5037) y «Variabilidad presente, pasada y futura en las Américas con árboles en bosques de altura» (IAI CRN03).

Referencias

- Acuña-Soto, R., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell. 2002. Megadrought and megadeath in 16th century Mexico. *Emerging Infectious Diseases* 8(4): 360–362.
- Brito-Castillo, L., S. Diaz-Castro, C. A. Salinas-Zavala, A. V. Douglas. 2003. Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed. *Journal of hydrology* 278: 39-50.
- 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, Coahuila. 152 pp.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Diaz, J., B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico, *Climatic change* 59: 369-388.
- Cháirez A. C., C.J. Palerm Veira. 2004. El entarquinamiento: el caso de la Comarca Lagunera. *Boletín del archivo histórico del agua* 9: 85- 97.
- _____. 2005. Importancia del río Aguanaval en la recarga del acuífero principal de la región lagunera de Coahuila y Durango. *Boletín del archivo histórico del agua* 10 (29): 5-20.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 1999. Acciones para la consolidación del consejo de cuenca Nazas-Aguanaval: Síntesis de la problemática, escenarios y lineamientos para el desarrollo hidráulico de la región hidrológica 36 «Nzas-Aguanaval», Comisión Nacional del Agua. Torreón, Coahuila. 121 pp.

- _____. 2004. Programa hidráulico regional 2002-2006, Región VII: Cuencas Centrales del Norte, Comisión Nacional del Agua. México, D.F. 30 pp.
- Cook, E.R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-ring bulletin* 47: 37-59.
- Cook, E. R., 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., C. Bouvier. 1993. Hidrometría. En: Loyer J.Y., Estrada A. J., J., Jasso I.,R. y Moreno D., L. (editores). Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID – RASPA; ORSTOM, DEC. Gómez Palacio, Durango, México. Pp. 63-117.
- _____. J. F. Nouvelot, J. Estrada A. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: regionalización de las precipitaciones en la región hidrológica 36. Folleto Científico No. 8. INIFAP CENID – RASPA; ORSTOM. Gómez Palacio, Durango, México. 52 pp.
- _____. J. F. Nouvelot, 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., M., D. W. Therrell, D. W. Stahle, , M. K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647 – 1992. *Climate research* 22 (3): 237-244.
- Estrada A., J., C. Bouvier, L. Descroix. 1993. Régimen pluviométrico. En: Loyer J. Y, Estrada-Avalos J, Jasso-Ibarra

- R, Moreno-Díaz L, editores. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID – RASPA; ORSTOM, DEC. Gómez Palacio, Durango, México. Pp. 25-61.
- _____ 1995. Modelisation conceptuelle appliquee aux bassins versants du nord Mexique (RH 36). DEA National D'Hydrologie. Universite de Montpellier II. Montpellier, France.
- Fritts, H. C. 1976. *Tree-rings and climate*, Academic Press, New York. 567 pp.
- _____ 1991. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data*, University of Arizona Press, Tucson, AZ. 286 pp.
- Fye F. K., D. W. Stahle, 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., E. Jurado, J. Navar, M. S. González-Elizondo, J. Villanueva, O. Aguirre, 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.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 1997. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Período 1921–1994. Software. Jiutepec, Morelos, México.
- Jasso I., R., J. Villanueva D., J. L. González B., I. Sánchez C. 2001. Comportamiento de la relación escurrimiento-precipitación en la cuenca alta del río Nazas, Memoria de la XIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. Gómez Palacio, Dgo. Pp.125-129.
- Loyer, J. Y., S. Moriaud . 1996. Tipología de las unidades de paisaje en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID–RASPA; ORSTOM, DEC. Folleto Científico No. 6. Gómez Palacio, Durango. 117 pp.
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa, J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. En Magaña, V. (editor), *Los impactos de El Niño en México*. SEP - CONACYT. Mexico. Pp. 23-68.
- Pohl, K., M. D. Therrell, J. S. Blay, N. Ayotte, J. G. Cabrera-Hernandez, S. Diaz-Castro S., E. Cornejo-Oviedo, J. A. Elvir, M. Gonzalez-Elizondo, D. Opland, J. Park, G. Pederson, S. Bernal-Salazar, L. Vasquez-Selem, J. Villanueva-Diaz, D.W. Stahle. 2003. «A cool season precipitation reconstruction for Saltillo, Mexico», *Tree-ring research* 59 (1): 11-19.
- 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, B.T., J. Villanueva-Diaz, L. G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the american meteorological society* 70 (10): 2137-2152.
- Stahle, D. W., E. R. Cook, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell, D. M. Meko, H. D. Grissino-Mayer, E. Watson, B. H. Luckman. 2000.

- Tree-ring data document 16th century megadrought over North América. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 81(12): 121 – 125.
- Stokes, M. A., T. L. Smiley. 1968. *An introduction to tree-ring dating*, The University of Chicago. 73 pp.
- Tarín T., G. 1993. La vegetación natural. En: Loyer J. Y, Estrada-Avalos J., Jasso-Ibarra, R, Moreno-Díaz, L, editores. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID – RASPA; ORSTOM, DEC. Gómez Palacio, Durango, México. Pp. 223-44.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, R. Acuña-Soto. 2004. Aztec drought and the curse of one rabbit. *Bulletin of the American Meteorological Society* 85 (9): 126–1272.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, J. Villanueva D., E. Cornejo O., M. K. Cleaveland. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474-2001. *Climatic Change* 74: 493-504.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, B. H. Luckman. 2005a. Estudios paleoclimáticos en México utilizando anillos de crecimiento de especies arbóreas, en: Benavides S. J., Becerra L. F., Hernández T. T., González S. C., Flores G. G. (editores). Contribución al estudio de los servicios ambientales, Libro Técnico No. 1., INIFAP CIRPAC, Guadalajara, Jalisco. Pp. 7-32.
- Villanueva, D. J., B. H. Luckman, D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, J. Cerano-Paredes, G. Gutierrez-Garcia, J. Estrada-Avalos, R. Jasso-Ibarra. 2005b. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management

implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera.
Dendrocronología 22 (3): 215-223.

Comité Editorial del CENID-RASPA

Presidente: Dr. José Antonio Cueto Wong

Secretario: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Vocales: Dr. Ignacio Orona Castillo

Dr. Guillermo González Cervantes

Edición Técnica

Dr. Guillermo González Cervantes

Esta publicación se terminó de imprimir en el mes de agosto del 2006 en los talleres del Grupo Colorama de Torreón, Coahuila.

Su tiraje consta de 500 ejemplares



CENID-RASPA

Km 6.5 margen derecha canal Sacramento

Gómez Palacio. Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41, Cd. Lerdo, Dgo.

Tels. y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: villanueva.jose@inifap.gob.mx