

SEQUIAS HIDROLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO BRAVO (SECCIÓN MEXICANA)

HYDROLOGICAL DROUGHT IN THE RIO GRANDE BASIN (MEXICAN SECTION)

David Ortega-Gaucin^{1*}, Luis Rendón Pimentel², Isaac Morales Bravo², Rodolfo Olivares Alva²

David Ortega-Gaucin^{1*}, Luis Rendón Pimentel², Isaac Morales Bravo², Rodolfo Olivares Alva²

¹Instituto del Agua del Estado de Nuevo León. Ave. Alianza Norte Núm. 306, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, Apodaca, Nuevo León, C. P. 66600, MÉXICO.

²Comisión Nacional del Agua. Insurgentes Sur 2416. Piso 7. Col. Copilco el Bajo. Delegación Coyoacán. C. P. 04340. Distrito Federal. MÉXICO.
Correo-e: ortega.gaucin@ianl.org.mx (*Autor para correspondencia)

RESUMEN

En este trabajo se realizó la caracterización de los períodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la sección mexicana de la cuenca del río Bravo, a partir del análisis de las aportaciones de agua a las presas de almacenamiento que se ubican en los principales afluentes mexicanos de este río. Los resultados indican que en más del 60 % de los años analizados se presentó algún grado de sequía, con aportaciones inferiores a la media histórica de hasta -97 %, y períodos secos que van de uno a 13 años consecutivos. Se concluye que en la mayor parte de la cuenca ocurrió un período de sequía extraordinaria que se extendió prácticamente a lo largo de 14 años (1992-2005), y fue el más severo y prolongado del cual se tiene registro.

Palabras clave adicionales: Déficit hídrico, río, presa de almacenamiento, distrito de riego.

ABSTRACT

In this paper was made a characterization of the hydrological drought periods that have been historically recorded for the mexican section of the Rio Grande basin, from the analysis of the water contributions to the storage dams located on the main mexican tributaries of this river. The results indicate that in more than 60 % of the analyzed years there was a drought in a certain degree, with contributions lower than the historical average decreasing up to -97 %, and drought periods ranging from one to thirteen consecutive years. It is concluded that in most part of the basin occurred an extraordinary drought period, which lasted for 14 years (1992 – 2005), and it is the most severe and prolonged of which there is record.

Additional key words: Water deficit, river, storage damp, irrigation district.

INTRODUCCIÓN

La sequía es considerada como un fenómeno climático cíclico caracterizado por una reducción en la precipitación pluvial, que no presenta trayectorias definidas y que tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y el espacio. La severidad de una sequía depende no solamente del grado de reducción de la lluvia, su duración o su extensión geográfica, sino también de las demandas del recurso hídrico para la permanencia de los sistemas naturales y para el desarrollo de las actividades humanas (Wilhite y Glantz, 1987).

Uno de los sistemas hidrológicos más importantes de México donde la sequía es recurrente, es la cuenca del río Bravo, la cual ha sido objeto de múltiples estudios en los últimos años debido a que su problemática ha adquirido una connotación socioeconómica, ambiental y binacional. La mayor parte de este espacio geográfico se ubica en una zona que, por sus características climáticas, se considera árida o al menos semiárida, presentándose un alto grado de variación en la disponibilidad de agua, por lo que los diferentes sectores son altamente vulnerables a los impactos producidos por las sequías y el uso inapropiado del líquido.

La demanda del recurso hídrico en la zona se ha acentuado conforme se ha incrementado la acelerada urbanización e industrialización de la franja fronteriza; y la competencia por el agua entre los usuarios –principalmente agrícolas–, tanto en las partes alta y baja de la cuenca como en ambos lados de la frontera entre México y Estados Unidos, ha generado diversas controversias locales, regionales e incluso internacionales (Linares, 2004). En efecto, por sus características de río internacional, el uso de las aguas del río Bravo y las de la mayoría de sus afluentes, está sujeto a las regulaciones establecidas en el “Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América”, celebrado en el año de 1944, así como a las vedas que sobre su uso se establecieron en 1953 y 1955. Con relación al tratado, es importante señalar que una parte de las aguas del río Bravo y de sus afluentes mexicanos se asigna a los EUA, es decir, una tercera parte del volumen de agua que llegue a la corriente principal del río Bravo procedente de los ríos Conchos, San Diego, San Rodrigo, Escondido, Salado y Arroyo de las Vacas. El tratado estipula que México debe entregar a EUA un volumen mínimo promedio anual de 431.72 hm³ en ciclos que se contabilizan cada cinco años; es decir, al final de cada ciclo el volumen mínimo de entrega es de 2,158.6 hm³, y en caso de no cumplir con esta cuota por causa de sequía extraordinaria, el adeudo se acumula para el siguiente ciclo, y se paga con agua procedente en su mayor parte de la cuenca del río Conchos.

En este sentido, debido a las presiones que se tienen para aumentar los aprovechamientos de las aguas del río Bravo y dadas las características de sus aguas internacionales y los compromisos con los EUA, es muy importante que se hagan respetar las vedas establecidas desde 1953; pues diversos estudios han comprobado que el flujo del recurso hídrico hacia el río Bravo proveniente de sus tributarios, como el río Conchos, localizado en la parte alta de la cuenca, su principal afluente mexicano, se han reducido significativamente durante los últimos años.

En este contexto, aunque en la práctica puede ser sumamente difícil predecir la ocurrencia de un período de sequía, el conocimiento y análisis continuos de las diversas fuentes de abastecimiento y el entendimiento del impacto de las sequías históricas registradas, pueden ayudar a los planeadores y operadores de los sistemas hidráulicos e hidrológicos a anticiparse a los efectos de la sequía (Wilhite, 1991). Por ello, el presente trabajo tiene como finalidad principal realizar la caracterización de los períodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la cuenca del río Bravo (sección mexicana).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La cuenca del río Bravo se ubica en la frontera entre México y Estados Unidos y pertenece a la Región Hidrológica Núm. 24 (Figura 1), la cual comprende tres subregiones: Poniente, Oriente y Oriente Bajo Río Bravo. El área de estudio comprende el tramo del río Bravo que va desde Fort Quitman hasta la presa internacional Falcón, y abarca las dos primeras subregiones hidrológicas mencionadas anteriormente. La cuenca del río Bravo hasta la

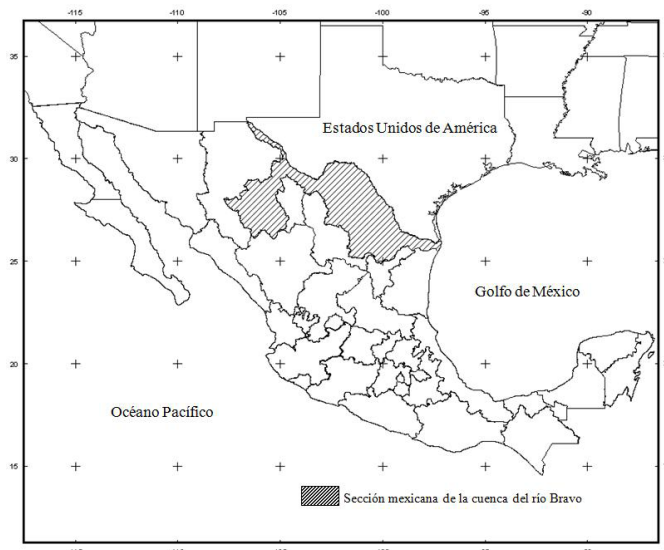


FIGURA 1. Ubicación de la cuenca del río Bravo (sección mexicana)

cortina de la presa internacional Falcón tiene un área de 415,757 km², de los que aproximadamente 188,459 km² pertenecen a México y 227,298 km² a Estados Unidos.

El principal uso que tienen las aguas mexicanas del río Bravo y sus afluentes es agrícola. Además de las unidades de riego distribuidas en la cuenca, se tienen 10 distritos de riego que dominan un área aproximada de 450,661 ha, y para la regulación del agua tienen nueve presas de almacenamiento, más las dos presas internacionales, La Amistad y Falcón (Figura 2).

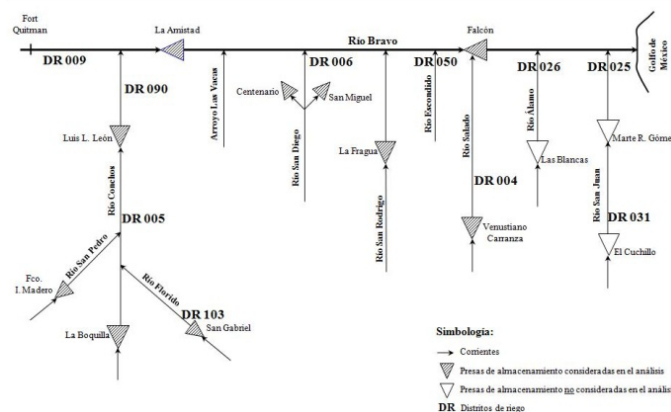


FIGURA 2. Diagrama del sistema hidrológico de la cuenca del río Bravo (sección mexicana)

En el presente trabajo se analizan las corrientes que están consideradas dentro del Tratado Internacional de 1944. En el Cuadro 1 se presenta la relación de los ríos y presas de almacenamiento consideradas en el análisis, así como algunos datos básicos de dichas presas, como son la capacidad de conservación y el período de registro de aportaciones que cada una de ellas tiene. Asimismo, en el Cuadro 2 se presenta un resumen de las estadísticas básicas de los registros de aportaciones históricas de las presas de almacenamiento analizadas.

CUADRO 1. Ríos y presas de almacenamiento analizados.

Río	Presa de almacenamiento	Capacidad de conservación ^z (hm ³)	Registro de aportaciones ^z	
			Periodo	Núm. de años efectivos
Florido	San Gabriel	255.4	1943-2006	64
Conchos	La Boquilla	2,903.3	1935-2006	72
San Pedro	Francisco I. Madero	348.0	1949-2006	58
Conchos	Luis L. León	356.0	1949-2006	58
Bravo	La Amistad	1,702.5	1969-2006	38
San Diego	Centenario	24.7	1985-2006	22
San Diego	San Miguel	20.2	1985-2006	22
San Rodrigo	La Fragua	45.0	1932-2006	75
Salado	Venustiano Carranza	1,312.9	1930-2006	77
Bravo	Falcón	1,355.2	1969-2006	38

^zEn el caso de las presas La Amistad y Falcón, los datos corresponden solamente a la parte mexicana, y fueron proporcionados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). Fuente: elaboración propia con información de CONAGUA.

CUADRO 2. Estadísticas básicas de las aportaciones a las presas de almacenamiento.

Presa de almacenamiento	Media (hm ³ ·año ⁻¹)	Mediana (hm ³ ·año ⁻¹)	Máximo (hm ³ ·año ⁻¹)	Mínimo (hm ³ ·año ⁻¹)	Desv. estándar (hm ³)	C.V. (%)
San Gabriel	144.8	102.5	603.0	10.9	130.4	90
La Boquilla	1,151.0	936.8	3,492.1	137.4	720.2	63
Fco. I. Madero	358.5	294.0	1,043.9	27.8	242.5	68
Luis L. León	521.9	505.9	1,259.8	43.4	320.8	61
La Amistad	918.0	778.3	2,340.9	353.6	517.5	56
Centenario	19.4	16.7	53.2	8.6	10.7	55
San Miguel	16.2	16.9	28.5	0.7	5.9	36
La Fragua	94.7	53.6	511.0	2.9	111.3	118
Venustiano C.	428.1	252.2	2,523.9	35.0	465.0	109
Falcón	639.0	475.8	3,274.4	148.5	604.5	95

Fuente: elaboración propia con información de CONAGUA y CILA.

Análisis de la sequía hidrológica

En la literatura se reconoce que existen diferentes tipos de sequía, los cuales están determinados por los tipos de impactos que trae como consecuencia el fenómeno (Wilhite y Glantz, 1987). Así, se habla de sequía desde el punto de vista meteorológico (Barakat y Handoufe, 1998; Bergaoui y Alouini, 2001), hidrológico (Barakat y Handoufe, 1998), agrícola (Bootsma *et al.*, 1996; Barakat y Handoufe, 1998) y socio-económico (Barakat y Handoufe, 1998; Bergaoui y Alouini, 2001). Sin embargo, los diferentes tipos de sequía se deben a una disminución de la lluvia en uno o varios años con respecto a la considerada como normal (generalmente la media de los datos observados) en una zona o región determinada. De esta manera, en la gran mayoría de las definiciones de sequía propuestas por los diferentes autores, la relación entre el suministro de agua en un momento dado y el considerado como normal, desempeña un papel importante.

En el caso específico de la sequía hidrológica, para analizar el fenómeno varios autores utilizan como datos hidrométricos, por ejemplo, las aportaciones a las presas, el caudal de entrada o el balance integral del ciclo hidrológico a escala de una cuenca aforada, en este caso una presa de almacenamiento (Mckee *et al.*,

1995; Fournier, 2001; Bergaoui y Alouini, 2001; Bordi y Sutera, 2007). El hecho de obtener los parámetros estadísticos de una muestra de valores de aportaciones anuales, permite conocer la media, variación y sesgo, y sobre el valor medio se establecen anomalías: positivas en los excesos y negativas en los déficits. Esto en sí mismo es una manera de caracterizar el fenómeno: las diferencias o desviaciones de cada período respecto a su media. Estos valores sirven para identificar y analizar las consecuencias directas de la variación de precipitaciones sobre la producción de escurrimiento que en periodos largos de escasez de lluvia se traducen como una sequía hidrológica. A partir de series de datos hidrométricos históricos se establece una media del componente hidrológico seleccionado, y a partir de esa media se determina el déficit o incremento del componente seleccionado. Es más común encontrar análisis de sequía hidrológica con datos de entradas anuales de una presa con área de captación bien definida (a escala de cuenca o subcuenca), donde existen algunas estructuras hidráulicas bien instrumentadas con mediciones periódicas (diarias, semanales o mensuales).

En este contexto, para los propósitos del presente trabajo en el cual se analiza la sequía desde el punto de vista hidrológico, se considera como *año seco* cualquier año en que las aportaciones

o escurrimientos que ingresan a una presa de almacenamiento son menores al valor de la media aritmética de los registros históricos, por lo que la *sequía hidrológica* es un período de años secos consecutivos. Así, se puede decir que un período de sequía hidrológica inicia y termina con el primer y el último año seco consecutivo, respectivamente.

Desde el punto de vista de la operación de presas de almacenamiento, para suministrar los volúmenes de agua a los usos público-urbano, industrial y agrícola, hay dos parámetros que son importantes para la caracterización de las sequías hidrológicas: la duración y la severidad (Barakat y Handoufe, 1998; Bergaoui y Alouini, 2001).

Duración (D): número de años consecutivos con aportaciones inferiores a la media.

$$D = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

Severidad (S): volumen deficitario acumulado en todo el periodo de sequía, hm³.

$$S = \sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} \quad (2)$$

En el presente trabajo se considera que la severidad permite definir la *sequía hidrológica extraordinaria*, para un registro de periodos de sequía ocurridos en una cuenca o presa de almacenamiento, como la que tiene la severidad máxima (S_{max}), es decir, el mayor volumen deficitario acumulado en todo el periodo de sequía. A su vez, se propone el concepto de severidad relativa (S_r), que sirve para clasificar la ocurrencia de las sequías en ligeras, intensas y extraordinarias, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$S_r = \frac{S_j}{S_{max}} \quad (3)$$

En el Cuadro 3 se presentan los rangos de los valores de la severidad relativa que se proponen y se utilizan en este artículo para clasificar las sequías hidrológicas.

CUADRO 3. Clasificación de las sequías hidrológicas con base en la severidad relativa.

Tipo de sequía	S_r
Ligera	0.01 a 0.25
Intensa	0.26 a 0.99
Extraordinaria	1.00

Fuente: elaboración propia.

De esta manera, con base en las definiciones y parámetros descritos anteriormente, se realizó el análisis y caracterización de los periodos de sequía hidrológica ocurridos históricamente en los afluentes mexicanos del río Bravo, mediante el análisis de las desviaciones de las aportaciones de agua con respecto a la media histórica en cada presa de almacenamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 4 se presentan las estadísticas de las aportaciones anuales mínimas de las presas de almacenamiento. Como se puede observar, en todas las presas analizadas, el número de años secos es igual o superior al 50 %, y se han registrado periodos secos de máxima duración desde cuatro hasta 13 años consecutivos, con déficit máximo de aportaciones respecto a la media desde -55.6 % hasta -97.0 %. Se observa también que los años más secos, en la mayoría de los casos, se ubican en las décadas de los 50 y de los 90, así como a principios del presente siglo.

En los Cuadros 5 al 14 se presentan: la duración, severidad, severidad relativa y el tipo de sequía correspondiente a cada uno de los periodos de sequía hidrológica ocurridos históricamente en las presas de almacenamiento analizadas. A continuación se analiza cada una de ellas por separado.

CUADRO 4. Estadísticas de las aportaciones anuales mínimas.

Presa de almacenamiento	Núm. de años con registro	Años secos		Periodo de sequía más larga		Déficit máximo de aportaciones respecto a la media	
		Núm. años	%	Periodo	Duración (años)	%	Año de registro
San Gabriel	64	41	64.0	1997-2005	9	-92.4	1994
La Boquilla	72	46	63.8	1997-2005	9	-88.1	1951
Fco. I. Madero	58	36	62.0	1997-2005	9	-92.2	1994
Luis L. León	58	31	53.4	1994-2006	13	-92.0	1996
La Amistad	38	25	65.7	1994-2006	13	-61.2	2001
Centenario	22	16	72.7	1999-2006	8	-55.6	1992
San Miguel	22	11	50.0	1992-1995	4	-95.4	1988
La Fragua	75	52	69.3	1950-1957	8	-97.0	1956
Venustiano C.	77	48	62.3	1947-1957	11	-91.8	1956
Falcón	38	26	68.4	1993-2002	10	-76.8	2000

Fuente: elaboración propia con información de CONAGUA y CILA.

CUADRO 5. Periodos de sequía hidrológica en la presa San Gabriel.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm³)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1945	1946	2	-56.4	0.07	Ligera
1948	1948	1	-86.8	0.11	Ligera
1950	1954	5	-352.1	0.45	Intensa
1956	1957	2	-161.0	0.20	Ligera
1959	1959	1	-44.2	0.06	Ligera
1961	1965	5	-352.6	0.45	Intensa
1969	1972	4	-200.0	0.25	Ligera
1975	1975	1	-40.5	0.05	Ligera
1977	1977	1	-70.4	0.09	Ligera
1979	1980	2	-208.2	0.26	Intensa
1982	1983	2	-209.6	0.27	Intensa
1985	1985	1	-92.9	0.12	Ligera
1989	1989	1	-93.8	0.12	Ligera
1992	1995	4	-379.2	0.48	Intensa
1997	2005	9	-790.1	1.00	Extraordinaria

Fuente: elaboración propia.

CUADRO 6. Periodos de sequía hidrológica en la presa La Boquilla.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm³)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1935	1935	1	-239.9	0.06	Ligera
1937	1937	1	-283.3	0.07	Ligera
1939	1940	2	-619.3	0.14	Ligera
1945	1946	2	-566.4	0.13	Ligera
1948	1948	1	-695.0	0.16	Ligera
1950	1954	5	-3,154.0	0.73	Intensa
1956	1957	2	-1,503.1	0.35	Intensa
1959	1959	1	-384.3	0.09	Ligera
1961	1965	5	-2,179.2	0.50	Intensa
1967	1967	1	-30.0	0.01	Ligera
1969	1972	4	-909.2	0.21	Ligera
1975	1977	3	-561.6	0.13	Ligera
1979	1979	1	-380.5	0.09	Ligera
1982	1983	2	-785.4	0.18	Ligera
1985	1985	1	-264.2	0.06	Ligera
1987	1987	1	-240.2	0.06	Ligera
1992	1995	4	-2,121.5	0.49	Intensa
1997	2005	9	-4,343.2	1.00	Extraordinaria

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la presa San Gabriel (Cuadro 5), que se alimenta de las aguas que escurren en el río Florido, se detectaron al menos cinco periodos de sequía prolongada (con duración mayor o igual de cuatro años); el de sequía extraordinaria fue de nueve años (1997-2005), con un déficit acumulado en las aportaciones de -790.1 hm³. A este periodo le antecede otro de sequía intensa de cuatro años (1992-1995), con un solo año húmedo que los separa (1996), por lo que se afirma que prácticamente el último

periodo de sequía ocurrido en esta presa abarcó desde 1992 hasta el año 2005.

Por otro lado, La Boquilla (Cuadro 6), que almacena y regula las aguas del río Conchos, presenta un comportamiento muy similar a la presa San Gabriel. En ésta también ocurrieron cinco periodos de sequía prolongada (con duración mayor o igual de cuatro años); el periodo de sequía extraordinaria fue de nueve

años (1997-2005), con un déficit acumulado en las aportaciones con relación a la media de $-4,343.2 \text{ hm}^3$. Entre este periodo y el que le antecede con duración de cuatro años (1992-1995), existe solamente un año húmedo (1996), por lo cual se considera que prácticamente el periodo de sequía extraordinaria se extendió desde 1992 hasta 2005.

Algo similar a los dos casos anteriores ocurre en la presa Francisco I. Madero (Cuadro 7), alimentada por los escurrimientos del río San Pedro, donde se observa que han ocurrido al menos cuatro periodos de sequía prolongada (con duración mayor o igual de cuatro años); el de sequía extraordinaria fue de nueve años (1997-2005), con un déficit acumulado en las aportaciones de $-1,266.6 \text{ hm}^3$. Entre este periodo de sequía y el que le antecede (1992-1995) existe solamente un año húmedo (1996), por lo que, al igual que en las dos presas anteriores, se considera de manera práctica que el último periodo de sequía se extendió desde 1992 hasta el año 2005.

CUADRO 7. Periodos de sequía hidrológica en la presa Francisco I. Madero.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm^3)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1950	1953	4	-584.4	0.46	Intensa
1956	1957	2	-459.4	0.36	Intensa
1961	1965	5	-592.8	0.47	Intensa
1967	1967	1	-43.5	0.03	Ligera
1969	1970	2	-165.6	0.13	Ligera
1973	1973	1	-64.4	0.05	Ligera
1977	1977	1	-191.5	0.15	Ligera
1979	1979	1	-25.5	0.02	Ligera
1982	1983	2	-461.3	0.36	Intensa
1985	1985	1	-189.3	0.15	Ligera
1987	1989	3	-370.7	0.29	Intensa
1992	1995	4	-855.8	0.68	Intensa
1997	2005	9	-1,266.6	1.00	Extraordinaria

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, analizando las aportaciones de agua provenientes del río Conchos que se almacenan en la presa Luis L. León (Cuadro 8), se observa que se han presentado tres periodos de sequía con duración mayor o igual de cuatro años. En este caso el periodo de sequía extraordinaria fue de 13 años (1994-2006), con un déficit acumulado en las aportaciones de $-5,027.4 \text{ hm}^3$.

La gran similitud existente en el comportamiento de las aportaciones y los periodos secos ocurridos en las presas San Gabriel, La Boquilla, Francisco I. Madero y Luis L. León, se explica fácilmente por el hecho de que todas ellas se ubican dentro de la subcuenca hidrológica del río Conchos y son alimentadas por el mismo (en el caso de La Boquilla y Luis L. León) y por sus afluentes (en el caso de San Gabriel y Francisco I. Madero). Lo anterior pone de manifiesto la gravedad del problema de la sequía en la subcuenca del Conchos, que se prolongó prácticamente durante 14 años (1992-2005). Este problema de la escasez

CUADRO 8. Periodos de sequía hidrológica en la presa Luis L. León.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm^3)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1949	1957	9	-2,230.4	0.44	Intensa
1959	1959	1	-57.4	0.01	Ligera
1962	1965	4	-339.7	0.07	Ligera
1967	1967	1	-56.8	0.01	Ligera
1969	1969	1	-12.1	0.00	Ligera
1982	1983	2	-90.6	0.02	Ligera
1994	2006	13	-5,027.4	1.00	Extraordinaria

Fuente: elaboración propia.

de agua ha afectado de manera significativa a todos los usuarios del vital líquido en la cuenca, pero principalmente se han visto perjudicados los usuarios de los distritos de riego 005 Delicias, 090 Bajo Río Conchos y 103 Río Florido, ubicados en el estado de Chihuahua. En estos distritos, en algunos años se han llegado a reducir hasta en un 80 % las superficies que se riegan con aguas superficiales, pero el problema se ha mitigado aumentando las extracciones del acuífero, con el consecuente aumento en los costos de operación y encarecimiento de los bienes y servicios en la región. No obstante, la productividad del agua se ha ido incrementando debido a que, cuando es escasa, los agricultores tienden a sembrar solamente los cultivos más rentables (Ortega-Gaucin *et al.*, 2009).

Por otra parte, continuando con el análisis y caracterización de la sequía, en el Cuadro 9 se presentan los periodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la presa internacional La Amistad. Ésta almacena los escurrimientos del río Bravo, y se observa que el periodo de sequía extraordinaria fue de 13 años (1994-2006), con un déficit acumulado en las aportaciones con relación a la media de $-5,776.1 \text{ hm}^3$.

CUADRO 9. Periodos de sequía hidrológica en la presa La Amistad.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm^3)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1969	1973	5	-1,100.4	0.19	Ligera
1975	1978	3	-714.2	0.12	Ligera
1982	1983	2	-410.7	0.07	Ligera
1985	1985	1	-76.4	0.01	Ligera
1989	1989	1	-191.3	0.03	Ligera
1994	2006	13	-5,776.1	1.00	Extraordinaria

Fuente: elaboración propia.

De igual manera, los periodos de sequía hidrológica ocurridos en la presa Centenario se observan en el Cuadro 10. En esta presa, que almacena los escurrimientos del río San Diego, han ocurrido dos periodos de sequía prolongada con duración mayor o igual de cuatro años consecutivos; fue el último de ocho años (1999-2006) el de sequía extraordinaria, cuyo déficit acumulado es de -33.5 hm^3 . Sin embargo, entre dicho periodo y el que le antecede (1994-1997), solamente existe un año húmedo que los separa (1996), por lo cual se considera que prácticamente el último periodo de sequía se extendió desde 1994 hasta el año 2006.

CUADRO 10. Periodos de sequía hidrológica en la presa Centenario.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm ³)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1985	1985	1	-2.7	0.07	Ligera
1987	1987	1	-10.3	0.28	Intensa
1991	1992	2	-13.0	0.35	Intensa
1994	1997	4	-17.9	0.48	Intensa
1999	2006	8	-37.4	1.00	Extraordinaria

Fuente: elaboración propia.

En la presa San Miguel, cuyos periodos de sequía hidrológica se presentan en el Cuadro 11, solamente ha ocurrido uno de sequía prolongada con duración de cuatro años consecutivos (1992-1995); no obstante, el de sequía extraordinaria fue de sólo dos años (1988-1989), y presentó un déficit acumulado en las aportaciones de -19.4 hm³.

CUADRO 11. Periodos de sequía hidrológica en la presa San Miguel.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm ³)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1988	1989	2	-19.4	1.00	Extraordinaria
1992	1995	4	-8.9	0.46	Intensa
1997	1998	2	-3.2	0.16	Ligera
2001	2001	1	-8.5	0.44	Intensa
2004	2004	1	-2.6	0.13	Ligera
2006	2006	1	-3.1	0.16	Ligera

Fuente: elaboración propia.

En la presa La Fragua (Cuadro 12), que almacena las aguas que escurren por el río San Rodrigo, han ocurrido al menos seis periodos de sequía hidrológica prolongada (con duración mayor o igual a cuatro años). El periodo de sequía extraordinaria fue de ocho años (1950-1957), con un déficit acumulado en las aportaciones de -479.3 hm³.

CUADRO 12. Periodos de sequía hidrológica en la presa La Fragua.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm ³)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1933	1934	2	-71.8	0.15	Ligera
1936	1940	5	-320.2	0.67	Intensa
1942	1943	2	-93.8	0.20	Ligera
1945	1945	1	-21.5	0.04	Ligera
1947	1948	2	-92.3	0.19	Ligera
1950	1957	8	-479.3	1.00	Extraordinaria
1960	1960	1	-53.5	0.11	Ligera
1962	1963	2	-154.0	0.32	Intensa
1965	1970	6	-341.1	0.71	Intensa
1972	1974	3	-46.5	0.10	Ligera
1977	1977	1	-44.1	0.09	Ligera
1979	1979	1	-38.1	0.08	Ligera
1981	1985	5	-285.3	0.60	Intensa

1989	1989	1	-49.6	0.10	Ligera
1991	1991	1	-14.7	0.03	Ligera
1993	1998	6	-379.7	0.79	Intensa
2000	2003	4	-276.9	0.58	Intensa
2006	2006	1	-83.7	0.17	Ligera

Fuente: elaboración propia.

En este orden de ideas, en el Cuadro 13 se presenta el análisis de los periodos de sequía hidrológica ocurridos históricamente en la presa Venustiano Carranza, que almacena los escurrimientos del río Salado. Se observa que han ocurrido al menos cinco periodos de sequía prolongada (con duración mayor o igual de cuatro años consecutivos); el de sequía extraordinaria fue de 11 años (1947-1957), con un déficit acumulado en las aportaciones con relación a la media de -2,598.4 hm³.

CUADRO 13. Periodos de sequía hidrológica en la presa Venustiano Carranza.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm ³)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1934	1934	1	-231.7	0.09	Ligera
1936	1940	5	-1,269.5	0.49	Intensa
1942	1943	2	-568.0	0.22	Ligera
1945	1945	1	-208.6	0.08	Ligera
1947	1957	11	-2,598.4	1.00	Extraordinaria
1960	1960	1	-107.2	0.04	Ligera
1962	1969	8	-1,942.7	0.75	Intensa
1971	1971	1	-156.5	0.06	Ligera
1977	1977	1	-174.4	0.07	Ligera
1982	1986	4	-1,184.0	0.46	Intensa
1989	1990	2	-384.7	0.15	Ligera
1993	1998	6	-1,887.4	0.73	Intensa
2000	2002	3	-1,088.0	0.42	Intensa
2005	2006	2	-572.4	0.22	Ligera

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en el Cuadro 14 se presentan los periodos de sequía hidrológica ocurridos en la presa Falcón, que se abastece de los volúmenes escurridos en la parte baja del río Bravo. Se observan dos periodos de sequía prolongada con duración mayor de cuatro años consecutivos; fue el último periodo de 10 años (1993-2002) el que corresponde a la sequía extraordinaria, cuyo déficit acumulado en las aportaciones es de -3,765.1 hm³.

Como se ha observado, el análisis de las aportaciones de agua a las presas de almacenamiento ubicadas en los principales afluentes mexicanos del río Bravo, permitió **analizar y caracterizar** de manera conveniente los periodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la cuenca. La irregularidad de las aportaciones a las presas de almacenamiento es bastante pronunciada. En más del 60 % del periodo analizado en cada presa, ocurren aportaciones inferiores a la media, registrándose años secos con déficit que va desde -3 % hasta -97 %, y periodos de sequía cuya duración varía desde uno hasta 13 años consecutivos.

Dado que el valor de la media aritmética de las extracciones, ha sido el parámetro utilizado por la CONAGUA para la determinación de los volúmenes a concesionar de las presas de almacenamiento, es importante analizar y reconsiderar este criterio, ya que, como muestran los resultados obtenidos, en la práctica es poco probable que ocurran las aportaciones medias.

CUADRO 14. Periodos de sequía hidrológica en la presa falcón.

Año inicial	Año final	Duración (años)	Severidad (hm ³)	Severidad relativa	Tipo de sequía
1969	1970	2	-647.4	0.17	Ligera
1972	1974	3	-250.5	0.07	Ligera
1977	1977	1	-21.0	0.01	Ligera
1980	1980	1	-24.8	0.01	Ligera
1982	1986	5	-1,180.0	0.31	Intensa
1989	1991	3	-765.8	0.20	Ligera
1993	2002	10	-3,765.1	1.00	Extraordinaria
2005	2006	2	-579.1	0.15	Ligera

Fuente: elaboración propia.

El elevado porcentaje de déficit hídrico en cada período de sequía, y la frecuencia con que se presentan, son factores limitantes que requieren atención tanto de los administradores y operadores del agua como de los usuarios. Es importante que las directrices sobre el manejo del recurso se basen en las probabilidades reales de menor disponibilidad, y no en las condiciones de aparente abundancia. Sólo de esa manera se estará en condiciones de reducir los impactos de las sequías y disminuir la vulnerabilidad de los usuarios ante este fenómeno.

CONCLUSIONES

El análisis de las aportaciones de agua que ingresan a las presas de almacenamiento ubicadas en los principales afluentes mexicanos del río Bravo, permitió analizar y caracterizar de manera conveniente los períodos de sequía hidrológica registrados históricamente en la cuenca. Dichas aportaciones son bastante irregulares: en todas las presas analizadas el número de años secos -con aportaciones inferiores a la media histórica- es igual o superior al 60 % del periodo analizado, registrándose años secos con déficit que va desde -3 % hasta -97 %, y períodos de sequía cuya duración varía desde uno hasta 13 años consecutivos. Se considera que, en la mayor parte de la cuenca, el periodo de sequía extraordinaria se extendió prácticamente a lo largo de 14 años (1992-2005), y fue el más severo y prolongado del cual se tiene registro.

NOMENCLATURA

t_i Año i con aportaciones de agua inferiores a la media (adimensional)

i Índice del número de años (adimensional)

x_i Aportación de agua en el año i (hm³)

\bar{x} Aportación media de agua (hm³)

S_j Severidad de la sequía j (hm³)

j Índice de sequías (adimensional)

S_{max} Severidad máxima (hm³)

LITERATURA CITADA

- Barakat F.; Handoufe A. 1998. Approche agroclimatique de la sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse* 9(3): 201-208.
- Bergaoui M.; Alouini A. 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: cas du bassin Versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse* 12(4): 205-213.
- Bootsma A. J.; Boisvert R. J.; Baier W. 1996. La sécheresse et l'agriculture canadienne: une revue des moyens d'action. *Sécheresse* 7(4): 277-285.
- Bordi I.; Sutera A. 2007. Drought monitoring and forecasting at large scale. *In: Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Rossi G.; Vega T.; Brunella B. (eds.). Springer, Dordrecht, The Netherlands. pp: 3-27.
- Fournier J. M. 2001. L'eau dans les villes d'Amérique Latine – Inégalités sociales et concurrences des usages. *Géographie Sociale, Paris-Montréal-Budapest-Turin*. 150 p.
- Linares M. 2004. La sequía en la cuenca del río Bravo: principios de política. *Gaceta Ecológica* 70: 57-66.
- McKee T. N. *et al.*, 1993. Drought monitoring with multiple time scales. *American Meteorological Society, 9th Conference on Applied Climatology*. pp. 233-236.
- Ortega-Gaucin D.; Mejía S. E.; Palacios V. E.; Rendón P. L. 2009. Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. *Terra Latinoamericana* 27(3): 219-226.
- Wilhite D. A.; Glantz M. H. 1987. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International* 10: 111-120.
- Wilhite D. A. 1991. Drought planning: a process for State Government. *Water Resources Bulletin* 27(1): 29-38.