

CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA A DIVERSAS ESCALAS DE TIEMPO EN CHIHUAHUA, MÉXICO

CHARACTERIZATION OF DROUGHT AT DIFFERENT TIME SCALES IN CHIHUAHUA, MÉXICO

Daniel Núñez-López¹, Carlos A. Muñoz-Robles¹, Víctor M. Reyes-Gómez¹, Israel Velasco-Velasco² y Héctor Gadsden-Esparza¹

¹Centro de Investigación sobre Sequía del Instituto de Ecología A.C. km 33.3, Carretera Chihuahua-Ojinaga. 32900. Ciudad Aldama, Chihuahua. (danielnulo@gmail.com). ²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8352. Progreso. 62550. Juitepec, Morelos.

RESUMEN

En este documento se analizaron las principales características de los eventos de sequía ocurridos en las regiones climáticas más representativas del Estado de Chihuahua. La evaluación de la sequía se basó en el cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado (Standardized Precipitation Index SPI) en escalas de tiempo de tres, seis y doce meses: SPI-3, SPI-6 y SPI-12. Para cada región climática y escala de tiempo se obtuvo la frecuencia, duración e intensidad de los eventos de sequía de 1970 a 2004. Predominaron condiciones de sequía entre 23 y 31% del tiempo analizado en las tres escalas de tiempo, en diferentes periodos en cada región climática. Los eventos de sequía identificados en series históricas del SPI-3 tuvieron gran frecuencia y corta duración, en tanto que en series de seis y doce meses fueron menos recurrentes pero más prolongados. Los eventos de sequía más destacados por su intensidad y duración ocurrieron a mediados y finales de la década de 1990, con efectos negativos en la actividad agrícola, en la incidencia de incendios forestales y en el almacenamiento de los embalses más importantes del Estado.

Palabras clave: eventos de sequía, SPI, déficit de precipitación, escasez de agua.

INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los fenómenos naturales más complejos, menos entendidos, que a más personas afecta, tiende a extenderse de manera irregular a través del tiempo y el espacio, sus efectos son acumulativos y pueden permanecer aún después de la culminación del evento; tales características la distinguen de otros fenómenos naturales (Wilhite, 2000). Se han propuesto numerosas definiciones de sequía y cada una involucra diversos factores ambientales, sociales y económicos. La carencia de una definición de sequía clara y universalmente aceptada contribuye a controversias sobre este fenómeno (Glantz y Katz, 1977). Una amplia revisión de definiciones sobre sequía fue publicada por la Organización Meteorológica

ABSTRACT

In this paper analyzes the principal characteristics of droughts that occur in the most representative climatic regions of the state of Chihuahua are analyzed. Assessment of drought was based on the calculation of the Standardized Precipitation Index (SPI) at time scales of three, six and twelve months: SPI-3, SPI-6 and SPI-12. Frequency, duration and intensity of drought events between 1970 and 2004 were obtained for each climatic region and time scale. Drought conditions predominated during 23 to 31% of the time analyzed at the three time scales in different periods in each climatic region. The drought events identified in historical series of SPI-3 were of high frequency and short duration, while in the series of six and twelve months they were less recurrent, but longer. The most outstanding drought events for their intensity and duration occurred from mid- to late 1990, when agriculture, incidence of forest fires, and the State's most important water reservoirs were negatively affected.

Key words: Drought, SPI, precipitation deficit, water scarcity.

INTRODUCTION

Drought is one of the most complex, least understood natural hazards, which affects the greatest number of people. It tends to extend irregularly over time and space; its effects are accumulative and may remain even after the event has culminated; these characteristics make droughts different from other natural hazards (Wilhite, 2000). Numerous definitions of drought have been proposed, and each involves diverse environmental, social and economic factors. The lack of a clear, universally accepted definition of drought contributes to controversies over the phenomenon (Glantz and Katz, 1977). A broad review of definitions of drought was published by the World Meteorological Organization (WMO, 1975). According to Dracup *et al.* (1980), Wilhite and Glantz (1985), and Chang *et al.* (1991), drought is classified as meteorological, hydrological and agricultural.

Meteorological drought is an atmospheric condition characterized by a deficit in the amount of precipitation

Recibido: Abril, 2006. Aprobado: Febrero, 2007.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 41: 253-262. 2007.

Mundial (WMO, 1975). Según Dracup *et al.* (1980), Wilhite y Glantz (1985), y Chang y Kleopla (1991) la sequía se clasifica en meteorológica, hidrológica y agrícola.

La sequía meteorológica es una condición atmosférica caracterizada por un déficit en la cantidad de precipitación que normalmente se presenta en una región y en un periodo de tiempo específico (Guttman, 1999; Komuscu, 1999; Wilhite, 2000). Cuando este déficit de precipitación se asocia con altas temperaturas, baja humedad relativa y alta radiación solar, aumentan los niveles de evaporación y transpiración y, por tanto, aumenta el déficit de humedad en el suelo y se impide o limita el crecimiento de cultivos; esta etapa es la sequía agrícola y puede durar uno o varios meses (Quiring y Papkryiakou, 2003; Wu *et al.*, 2004; Narasimhan y Srinivasan, 2005). La sequía hidrológica ocurre cuando la prolongación de estas condiciones atmosféricas afectan la recarga de cuerpos de agua superficiales y subterráneos debido a la disminución del volumen de escurrimiento e infiltración.

La severidad de la sequía depende del grado de reducción de la lluvia, duración y extensión geográfica, así como de la demanda de agua para la permanencia de los sistemas naturales y el desarrollo de las actividades humanas. Así, para expresar el grado de severidad de la sequía deben considerarse los impactos sociales, económicos y ambientales asociados al fenómeno (Byun y Wilhite, 1999; Wilhite, 2000; Wilhite, 2002).

La mayoría de los métodos para evaluar la sequía meteorológica tienen la finalidad de determinar la ocurrencia de eventos anormales de la precipitación en una región y en un periodo de tiempo (Chang y Kleopla, 1991; Komuscu, 1999; Guttman, 1998). Un indicador usado para este propósito es el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Palmer Drought Severity Index PDSI) que considera déficit de precipitación, y el suministro y demanda de agua dentro de una ecuación de balance hídrico; sin embargo, su uso en México tiene algunas limitaciones por requerir variables no siempre disponibles (Velasco, 1999). Otro índice para caracterizar la sequía es Índice de Precipitación Estandarizado (Standardized Precipitation Index, SPI), que considera la lluvia como variable única para determinar si en una región y en un periodo hay déficit o exceso de precipitación respecto a las condiciones normales (Hayes *et al.*, 1999; Komuscu, 1999; Tadesse *et al.*, 2004). El cálculo del SPI involucra ajustar registros históricos mensuales de precipitación a la función de distribución probabilística gamma incompleta; los valores resultantes del ajuste se transforman a valores de la variable z de la función de distribución normal estándar (Guttman, 1998; Steinemann, 2003; Wu *et al.*, 2005). Los valores del SPI representan el número de desviaciones

that normally falls in a region over a specific period of time (Guttman, 1999; Komuscu, 1999; Wilhite, 2000). When this deficit of precipitation is associated with high temperatures, low relative humidity and high solar radiation, evaporation and transpiration increase and, therefore, the deficit of moisture in the soil increases and crop growth is impeded or limited. This stage is agricultural drought and may last one or several months (Quiring and Papkryiakou, 2003; Wu *et al.*, 2004; Narasimhan *et al.*, 2005). Hydrological drought occurs when these atmospheric conditions are prolonged, affecting recharge of surface and underground bodies of water because of a decrease in the volume of runoff and infiltration.

Severity of drought depends on the degree to which rainfall is reduced, its duration, and its geographic extension, as well as the demand for water for the upkeep of natural systems and continuity of human activity. Thus, to express the degree of severity of a drought, social, economic and environmental impacts associated with the phenomenon should be considered (Byun *et al.*, 1999; Wilhite, 2000; Wilhite, 2002).

Most of the methods for assessing meteorological drought are aimed at determining the occurrence of abnormal events of precipitation in a region and within a period of time (Chang *et al.*, 1991; Komuscu, 1999; Guttman, 1998). An indicator used for this purpose is the Palmer Drought Severity Index (PDSI) that considers precipitation deficit and the supply and demand of water within an equation of water balance. However, its use in México has some limitations, requiring variables that are not always available (Velasco, 1999). Another index for the characterization of drought is the Standardized Precipitation Index (SPI), which considers rainfall to be the only variable to determine whether there is a deficit or excess of precipitation, with respect to normal conditions in a region and during a given period (Hayes *et al.*, 1999; Komuscu, 1999; Tadesse *et al.*, 2004). The calculation of SPI involves adjusting historical monthly records of precipitation to the function of incomplete gamma probabilistic distribution. The resulting values of the fit are transformed to values of the z variable of the normal standard distribution function (Guttman, 1998; Steinemann, 2003; Wu *et al.*, 2005). The values of SPI represent the number of standard deviations that each monthly observation moves away from its historical average, which is represented by zero. Negative values represent a deficit in precipitation with respect to the historical average, while positive values are surplus. This index permits the analysis of diverse time scales; that is, the fits and transformations can be done with records of accumulated rainfall in one or n months, allowing the determination of short-, medium- and long-term frequency, intensity

estándar que cada observación mensual se aleja de su promedio histórico, que se representa por el cero; los valores negativos representan el déficit de la precipitación respecto al promedio histórico y los positivos el excedente. Este índice permite analizar diversas escalas de tiempo; es decir, los ajustes y transformaciones se pueden hacer con registros de precipitación acumulada en uno o en n meses, permitiendo identificar la frecuencia, intensidad y duración de la sequía a corto, mediano y largo plazo (Guttman, 1999; Hayes *et al.*, 1999; Komuscu, 1999).

La escasez de agua en el norte de México

La cantidad de lluvia en el norte árido de México representa menos de 40% de la precipitación total del país y esta región es altamente vulnerable a impactos causados por sequías (CNA 2003b). El 74% de la superficie del Estado de Chihuahua se encuentra en esta región, y la precipitación media anual es 448 mm; cerca de 83% de la lluvia total se pierde por evaporación y transpiración, y sólo 17% es aprovechada por los sectores productivos y para uso doméstico (CNA, 1996). En Chihuahua, la precipitación pluvial es muy variable, se presentan años con cantidades normales o abundantes seguidos por otros escasos (CNA, 1996). De 1993 a 2004 la precipitación fue menor al promedio histórico, por lo que la sequía estatal adquiere una atención prioritaria.

Un aspecto que confiere mayor trascendencia al problema de escasez de agua en el norte de México es el adeudo de agua a los EE.UU. enmarcado en el Tratado Internacional de Aguas de 1944. Este Tratado establece que México debe entregar a EE.UU., cada año, 432 millones m^3 de agua hacia el Río Bravo/Grande; de no cumplir con esta cuota por una sequía extraordinaria (concepto no plenamente definido en el Tratado ni en la Ley de Aguas Nacionales) el adeudo se acumulará para el siguiente ciclo de cinco años, con aguas procedentes del río Conchos ubicada casi totalmente en Chihuahua, y principal afluente mexicano del río Bravo/Grande (Velasco *et al.*, 2004). La prolongada sequía durante la década de 1990 causó que México no cumpliera durante varios años, y se generó una fuerte disputa entre ambas naciones.

El Centro de Investigación sobre Sequía (CEIS) del Instituto de Ecología, A.C. implementó un sistema permanente de monitoreo de la sequía que tiene la finalidad de detectar y evaluar la fluctuación, intensidad, duración y extensión territorial de la sequía en Chihuahua, así como sus efectos en las actividades agrícolas, forestales y ganaderas.

En este documento se describen las características principales de los eventos de sequía meteorológica que

and duration of the drought (Guttman, 1999; Hayes *et al.*, 1999; Komuscu, 1999).

Scarcity of water in northern México

The amount of water in arid northern México accounts for less than 40% of the total precipitation of the country, and this region is highly vulnerable to impacts caused by droughts (CNA, 2003b). Seventy-five per cent of the area of the State of Chihuahua is found in this region, with a mean annual precipitation of 448 mm. Nearly 83% of the total rainfall is lost to evaporation and transpiration, and only 17% is used by the productive sectors and domestic use (CNA, 1995). In Chihuahua, rainfall is highly variable; there are years with normal or abundant amounts followed by other years of scant rainfall (CNA, 1996). From 1993 to 2004 precipitation was lower than the historical average, and so the state drought acquired priority status.

One aspect that confers greater transcendence to the problem of water scarcity in northern México is the water debt owed to the US, provided for in the International Water Treaty of 1944. This treaty establishes that México must deliver 432 million m^3 of water every year to the Río Grande/Bravo. If this quota is not met because of extraordinary drought (concept that is not precisely defined in the treaty or in the Law on National Water) the debt will accumulate for the following five-year cycle and should be paid with water from the Río Conchos watershed, located almost entirely in Chihuahua. This river is the main tributary of the Río Grande on the Mexican side (Velasco *et al.*, 2004). The prolonged drought during the 1990s prevented México from complying for several years, generating a strong dispute between the two nations.

The Center for Research on Drought (Centro de Investigación sobre Sequía-CEIS) of the Institute of Ecology, A.C., implemented a permanent system for monitoring droughts with the purpose of detecting and assessing fluctuation, intensity, duration and territorial extension of droughts in Chihuahua, and their effects on agriculture, forestry, and livestock.

In this paper, the principal characteristics of meteorological drought events that affected the state of Chihuahua from January 1970 to December 2004 are described. The analysis comprises the calculation of SPI at scales of three, six and twelve months, as well as the determination, for each climatic region, of frequency, duration and intensity of droughts within the State.

MATERIALS AND METHODS

The state of Chihuahua is located in northern México between 25° 5' and 31° 47' N and 103° 11' and 109° 07' W (CNA, 1996). It

afectaron al Estado de Chihuahua desde enero de 1970 a diciembre de 2004. El análisis comprende el cálculo del SPI en escalas de tres, seis y doce meses, así como la determinación para cada región climática, de la frecuencia, duración e intensidad de los eventos de sequía dentro del Estado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Estado de Chihuahua se localiza en el norte de México entre 25° 5' y 31° 47' N, y 103° 11' y 109° 07' O (CNA, 1996) y tiene una superficie de 247 087 km² (12.6% de la superficie del país). Las condiciones climáticas predominantes son de tipo seco (Figura 1): clima seco árido en 28% de la superficie estatal, con una precipitación promedio anual menor a 300 mm y temperatura máxima de 40 °C; 46% del territorio estatal es semiárido con una precipitación promedio anual de 300 a 500 mm. En la región oeste del Estado hay una fracción de la Sierra Madre Occidental (23% de la superficie estatal) donde predomina el clima templado, con régimen de lluvias durante el verano y precipitación promedio anual de 850 mm. El clima es cálido en la zona de las barrancas, con 600 mm de precipitación y una temperatura promedio que supera 18 °C durante el mes más frío (García, 1973).

has an area of 247 087 km² (12.6% of the country's total area). The predominant climatic conditions are of the dry type (Figure 1): 28% of the state area is arid, with mean annual precipitation below 300 mm and maximum temperatures of 40 °C; 46% of the state territory is semi-arid with mean annual precipitation between 300 and 500 mm. In the western region of the State lies a fraction of the Sierra Madre Occidental (23% of the state area) where temperate climate predominates with summer rains and mean annual precipitation of 850 mm. The climate is hot in the zone of ravines; there 600 mm of precipitation is recorded with an average temperature that is above 18 °C during the coldest month (García, 1973).

Monthly historical series of rainfall from 31 weather stations located in Chihuahua were compiled. The series with missing data were completed using the statistical procedures described by Young (1992) and Wanielista *et al.* (1997). A computer program was developed in a modular programming language with which the methodological procedure to calculate SPI was codified (Edwards *et al.*, 1997; Guttman, 1999; Wu *et al.*, 2005). For each weather station, monthly historical SPI series at scales of three, six and twelve months (SPI-3, SPI-6 and SPI-12) were obtained. The analysis was performed by grouping weather stations by their location in each climate region (the arid region with 8 stations, the semi-arid region with 12, and the temperate region by 11). For each climate region and time scale, a historical series was

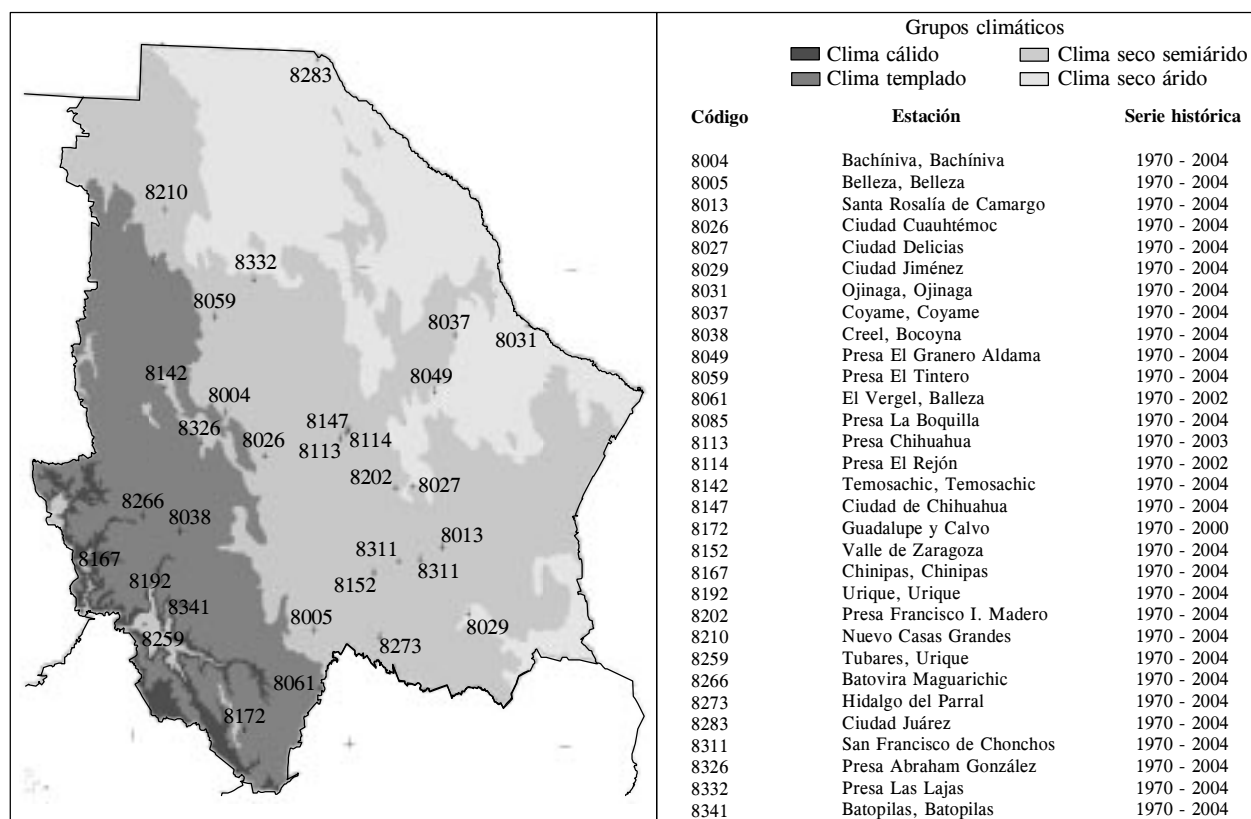


Figura 1. Distribución de las regiones climáticas en el Estado de Chihuahua (García, 1973) y localización de estaciones meteorológicas.
Figure 1. Distribution of the climate regions in the state of Chihuahua (García, 1973) and weather station sites.

Se recopilaron series históricas mensuales de precipitación pluvial provenientes de 31 estaciones climáticas en Chihuahua; las series con datos faltantes se completaron usando los procedimientos estadísticos descritos por Young (1992) y Wanielista *et al.* (1997). Se desarrolló un programa de cómputo codificando en un lenguaje de programación modular el procedimiento metodológico para calcular SPI (Edwards y McKee, 1997; Guttman, 1999; Wu *et al.*, 2005). Para cada estación meteorológica se obtuvieron series históricas mensuales del SPI en escalas de tres, seis y doce meses (SPI-3, SPI-6 y SPI-12). El análisis se efectuó agrupando las estaciones meteorológicas por su ubicación en cada región climática (la región árida con 8 estaciones, la región semiárida con 12 y la región templada con 11). Para cada región climática y escala de tiempo se obtuvo una serie histórica que registra mensualmente el SPI promedio de las estaciones incluidas en cada región. Por ejemplo: el valor SPI de enero de 1970 de la región de clima árido representa el promedio de valores SPI (calculados para el mismo mes y año) de las estaciones meteorológicas en la región. Finalmente, para cada serie histórica del SPI se determinó la frecuencia, duración e intensidad de los eventos de sequía ocurridos de enero 1970 a diciembre 2004. La intensidad de la sequía se determinó en función del esquema de clasificación del SPI (Cuadro 1) propuesto por U.S. Drought Monitor (1999). Un evento de sequía requiere dos a tres meses para su establecimiento (Wilhite, 2000); en este estudio se consideró el inicio del evento cuando los valores del SPI fueron menores a -0.5 consecutivamente al menos por dos meses. La prolongación de esta condición y el grado de reducción de la lluvia permitieron determinar la duración en meses e intensidad del evento.

RESULTADOS

Caracterización de la sequía por regiones climáticas

En la Figura 2 se muestran gráficas que ilustran el comportamiento histórico de valores promedio del SPI obtenidos para cada región climática y escala de tiempo considerada en el análisis. En cada serie histórica los valores del SPI inferiores a -0.5 se distinguen en tonos grises oscuros.

En la escala de tres meses, los valores del SPI presentan alta sensibilidad a los cambios de la precipitación acumulada durante el periodo trimestral, por lo cual cambian de positivo a negativo en cortos periodos de tiempo. En series de tiempo de seis y doce meses cada nuevo registro de precipitación tiene menor incidencia en el total acumulado del periodo correspondiente, por lo cual los valores del SPI se estabilizan y definen con mayor claridad el déficit de la lluvia. Otra característica (Cuadro 2) es la alta ocurrencia de eventos de sequía de corta duración en las escalas de corto plazo; en escalas de tiempo mayores el número de eventos de sequía se reduce, pero su duración aumenta.

obtained which monthly records the average SPI of the stations included in each region. For example, the SPI value in January of 1970 of the arid region represents the average of the SPI values (calculated for the same month and year) of the weather stations in the region. Finally, for each SPI historical series, frequency, duration and intensity of the drought events occurring from January 1970 to December 2004 were determined. Drought intensity was determined in function of the SPI classification scheme (Table 1) proposed by the US Drought Monitor (1999). For a drought to be declared, a period of two to three months (Wilhite, 2000) is normally required; in this study, we consider that the event initiates when the SPI values fall below -0.5 and continues consecutively for at least two months. The prolongation of this condition and the degree to which rain decreased permitted the determination of duration in months and intensity of the event.

RESULTS

Characterization of drought by climate regions

The graphs that illustrate the historical behavior of the average SPI values obtained for each climate region and time scale considered in the analysis are shown in Figure 2. In each historical series, the SPI values below -0.5 are distinguished by dark gray tones.

At the three-month scale, the SPI values are highly sensitive to changes in accumulated precipitation during the three-month period and thus they change from positive to negative within short periods of time. At the six- and twelve-month series each new recording of precipitation has lower incidence in the accumulated total of the corresponding period, so that the SPI values stabilize and define rain deficit more clearly. Another characteristic (Table 2) is the frequent occurrence of short-lasting droughts in the short-term scales; in longer time scales the number of events decreases, but their duration increases.

Arid climate region

Between 24 and 27% of the time analyzed at all time scales, the SPI values were below -0.5 . An

Cuadro 1. Intensidades de sequía de acuerdo al esquema de clasificación del SPI propuesto por U.S. Drought Monitor (1999).

Table 1. Drought intensities, according to the SPI classification scheme proposed by the US Drought Monitor (1999).

Categoría de sequía	SPI
Condición normal seca	0 a -0.5
Sequía incipiente	-0.51 a -0.7
Sequía moderada	-0.71 a -1.2
Sequía severa	-1.21 a -1.5
Sequía extrema	-1.51 a -1.9
Sequía excepcional	< -1.91

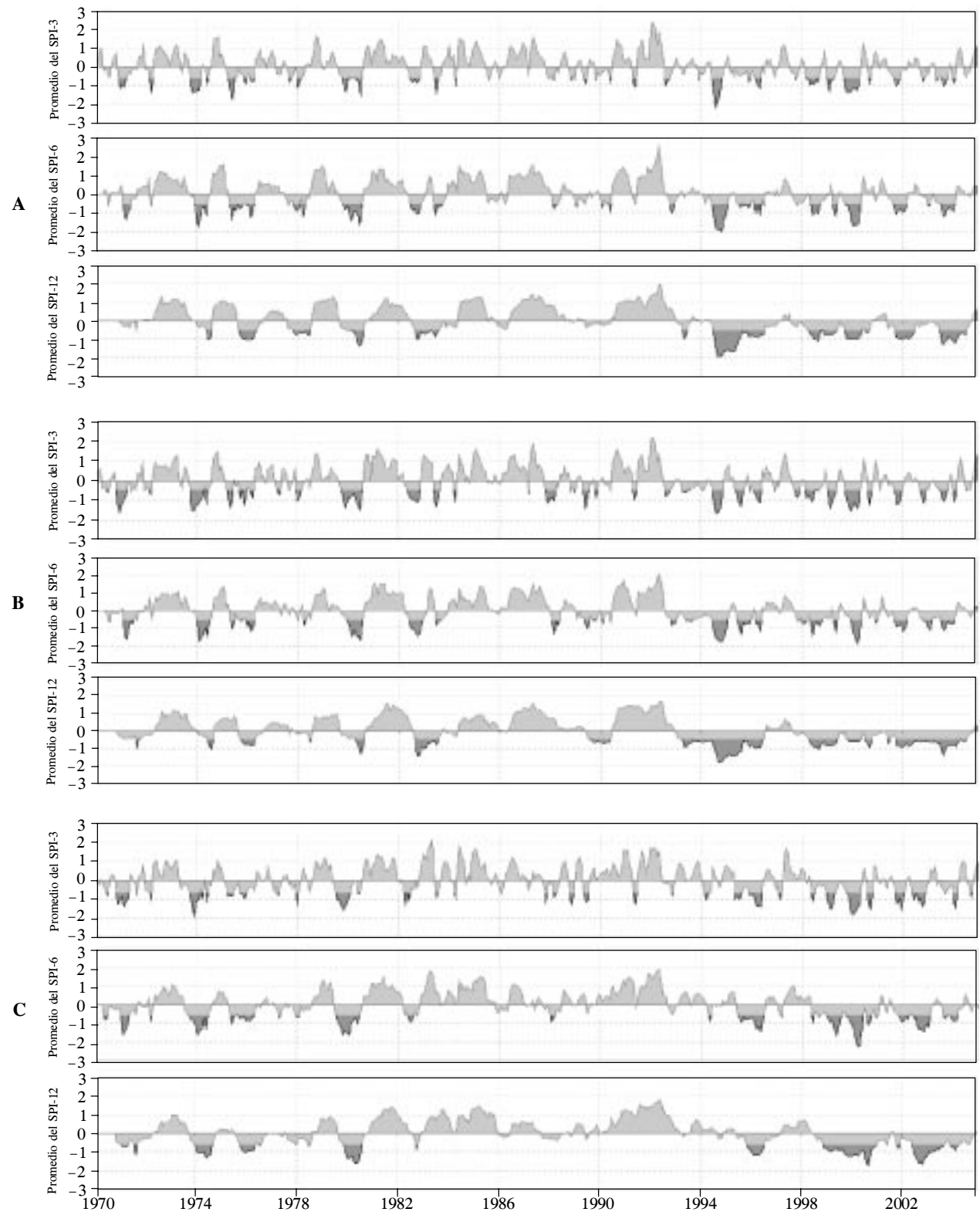


Figura 2. Comportamiento histórico del SPI en regiones de clima árido (A), semi-árido (B) y templado (C) del Estado de Chihuahua, representado en escalas de tiempo de tres, seis y doce meses (SPI-3, SPI-6 y SPI-12), desde 1970 a 2004.

Figure 2. Historical SPI behavior in arid climate (A), semi-arid (B) and temperate (C) regions of the State of Chihuahua, represented at three-, six-, and twelve-month time scales (SPE-3, SPI-6 and SPI-12) from 1970 to 2004.

Cuadro 2. Características de los eventos de sequía ocurridos en Chihuahua, de 1970 a 2004.
Table 2. Characteristics of drought events occurring in Chihuahua from 1979 to 2004.

Región climática	Escala de tiempo	Frecuencia	Duración media (meses)	Tiempo en sequía (%)	Máxima categoría de sequía
Árida	SPI-3	23	4	24	Excepcional
	SPI-6	18	6	24	Excepcional
	SPI-12	12	10	27	Excepcional
Semiárida	SPI-3	27	4	24	Extrema
	SPI-6	21	5	23	Extrema
	SPI-12	10	13	31	Extrema
Templada	SPI-3	25	4	23	Extrema
	SPI-6	16	7	25	Excepcional
	SPI-12	13	8	25	Extrema

Región de clima árido

Entre 24 y 27% del tiempo analizado en todas las escalas de tiempo, los valores del SPI fueron menores a -0.5 . Un aspecto importante analizado con mayor detenimiento en cada escala de tiempo fue la distribución en la serie histórica de la proporción del tiempo que se mantuvieron las condiciones de sequía. En la escala de tres meses se registraron 23 eventos de sequía con una duración media de cuatro meses. Los de mayor duración ocurrieron en la década de 1990, y el de mayor intensidad entre junio y noviembre de 1994 con la máxima categoría de sequía excepcional. En la escala de seis meses hubo 18 eventos de sequía con una duración media de seis meses. Destacaron por su duración dos de los eventos ocurridos durante la década de 1970: el primero empezó en mayo de 1975, persistió doce meses y alcanzó la categoría de sequía severa; el segundo inició en noviembre de 1979 y culminó en agosto de 1980, inicialmente se clasificó en la categoría de sequía incipiente pero alcanzó valores que lo situaron como sequía extrema. Durante y después de la década de 1990 hubo 11 eventos de sequía, entre los cuales destacaron por su intensidad y duración los ocurridos entre junio y diciembre de 1994 y el de octubre de 1999 a mayo del 2000; el primero se clasificó como sequía excepcional y el segundo como sequía severa. Para la escala de doce meses hubo doce eventos de sequía distribuidos en 27% del tiempo analizado. La duración media por evento fue 10 meses, y destacó por su intensidad y duración el que inició en junio de 1994, duró 25 meses con valores SPI de -1.96 que lo clasificaron como sequía excepcional (Cuadro 2).

Región de clima semiárido

En las tres escalas de tiempo de la región de clima semiárido, hubo al menos condiciones de sequía incipiente durante 24 y 31% del tiempo analizado; en la

important aspect analyzed in more detail at each time scale was the distribution of the proportion of time in the historical series that drought conditions remained. At the three-month scale, 23 drought events with a mean duration of four months were identified. Those of greater duration occurred in the 1990s, and that of greatest intensity between June and November 1994 with the maximum category of exceptional drought. At the six-month scale there were 18 drought events with a mean duration of six months. Outstanding for their duration were two of the events that occurred during the 1970s: the first initiated in May 1975, persisted twelve months and reached the category of severe drought; the second began in November 1979 and culminated in August 1980; initially it was classified in the category of incipient drought but reached values that placed it the category of extreme drought. During and after the 1990s, there were 11 drought events, among which those that occurred between June and December 1994 and that of October 1999 to may 2000 were outstanding for their intensity and duration. The first was classified as exceptional drought and the second as severe drought. For the twelve-month scale, twelve drought events distributed over 27% of the analyzed time were observed. The mean duration of the events was 10 months, and that which initiated in June 1994 was outstanding for its intensity and duration, lasting 25 months with SPI values of -1.96 which classified it as exceptional drought (Table 2).

Semi-arid climate region

At the three time scales of the semiarid region, conditions of at least incipient drought existed during 24 and 31% of the time analyzed; at the three-month scale 28 drought events were detected, with a mean duration of approximately four months (Table 2). Of all the events, 60% took place during the last 15 years; that of longest duration occurred at the end of the 1970s

escala de tres meses se detectaron 28 eventos de sequía, con una duración media aproximada de cuatro meses (Cuadro 2). Del total de eventos, 60% ocurrieron durante los últimos 15 años; el de mayor duración fue al término de la década de 1970 e inicio de 1980 y duró nueve meses; el de mayor intensidad fue de junio a noviembre de 1994, con una máxima categoría de sequía extrema. En la escala de seis meses hubo 21 eventos de sequía entre los cuales se distinguen por su intensidad, duración y recurrencia, los de mediados de la década de 1970 y finales de la de 1990. La duración media por evento fue cinco meses y la máxima categoría alcanzada fue sequía extrema de febrero a junio de 1974, agosto a noviembre de 1994, y en abril del 2000. En la escala de doce meses se identificaron los dos eventos de sequía más prolongados del historial analizado. El primero se inició en mayo de 1993, duró 38 meses, empezó como sequía moderada y evolucionó hasta sequía extrema durante los últimos cuatro meses de 1994. El segundo evento de sequía comenzó en octubre del 2001 como sequía incipiente, alcanzó sequía severa en agosto del 2003, y disminuyó gradualmente para culminar en junio de 2004. La duración de ambos eventos de sequía representa 17% del tiempo analizado.

Región de clima templado

Los eventos de sequía de mayor severidad registrados en la región de clima templado ocurrieron durante las décadas de 1970 y 1990 considerando las tres escalas de tiempo. En la década de 1970 se identificaron siete eventos de sequía en la serie de tres meses; destacó por su duración e intensidad el evento ocurrido entre octubre de 1973 y abril de 1974; se inició como incipiente y alcanzó la categoría de sequía excepcional en diciembre. En la década de 1990 la recurrencia de estos eventos aumentó a 11; se distingue el iniciado en octubre de 1999, que tuvo una duración de siete meses y su máxima categoría fue sequía extrema. En la escala de seis meses se identificaron 16 eventos de sequía, tres de los cuales se caracterizaron por su duración e intensidad: el primero, con intensidades de sequía incipiente hasta condición extrema duró 12 meses a partir de julio de 1995; el segundo ocurrió de octubre de 1999 a mayo del 2000, su duración fue menor pero su intensidad fue sequía excepcional; el tercero inició en octubre del 2001 con intensidades de sequía incipiente hasta llegar a sequía extrema en su última etapa. En la escala de tiempo de 12 meses se identificaron trece eventos de sequía; los de mayor duración e intensidad ocurrieron al término de la década de 1990. Destacan los eventos ocurridos de diciembre de 1998 a enero del 2001, y de junio de 2002 a septiembre de 2004; ambos manifestaron intensidades entre moderada y extrema.

and the early 1980s and lasted nine months. That of greatest intensity occurred from June to November 1994, with the maximum category of extreme drought. At the six-month scale there were 21 drought events, among which those occurring in the mid-1970s and late 1990s were outstanding for their intensity, duration and recurrence. The mean duration per event was five months and the maximum category reached was extreme drought from February to June 1974, August to November 1994, and April 2000. At the twelve-month scale, the two longest drought events in the history analyzed were identified. The first had its onset in May 1993 and lasted 38 months; initiating as moderate drought, it evolved to extreme drought during the first four months of 1994. The second drought event began in October 2001 as incipient drought, becoming severe in August 2003, and gradually diminishing until its culmination in 2004. The duration of the two events account for 17% of the time analyzed.

Temperate climate region

The most severe droughts recorded in the temperate climate region occurred during the 1970s and 1990s, at the three time scales. In the 1970s, seven drought events were identified in the three-month series. Outstanding for its duration and intensity was the event of October 1973 to April 1974; at its onset it was incipient, but reached the category of extreme drought in December. In the 1990s, the recurrence of these events increased to 11; the one started in October 1999 was notable; with a duration of seven months, its maximum category was that of extreme drought. At the six-month scale, 16 drought events were identified, three of which were characterized for their duration and intensity: the first lasted for 12 months as of July 1995 with intensities of incipient to extreme drought; the second occurred from October 1999 to May 2000; its duration was shorter but its intensity was that of exceptional drought; the third began in October 2001 with intensities from incipient to extreme drought at the end. At the 12-month scale, thirteen drought events were identified. Those of longer duration and intensity occurred in the late 1990s. Outstanding were the events that occurred from December 1998 to January 2001 and from June 2002 to September 2004, both manifesting intensities between moderate and extreme.

DISCUSSION

Coinciding with the results presented by Wu *et al* (2005), Edwards *et al.* (1997), and Komuscu (1999), the SPI values showed high sensitivity in the three-month series. This is due to the fact that each monthly

DISCUSIÓN

Los valores del SPI mostraron alta sensibilidad en las series de tres meses lo que coincide con los resultados presentados por Wu *et al.* (2005), Edwards y McKee. (1997) y Komuscu (1999). Esto se debe a que cada registro mensual de precipitación mostró un efecto significativo en la lluvia total acumulada durante cada periodo trimestral. En series de seis y doce meses, los valores del SPI se estabilizan y definen con mayor claridad el déficit de la lluvia. Esto se debe a que cada registro de precipitación ofrece un menor significado en la lluvia total acumulada del periodo correspondiente. Los eventos de sequía identificados en escalas de tres meses se caracterizaron por una gran frecuencia en cortos periodos de tiempo e intensidad variable; en series de seis y doce meses fueron menos recurrentes pero con mayor duración.

La proporción de tiempo en el que los valores del SPI fueron inferiores a -0.5 osciló entre 23 y 31%; esto es, de los 35 años evaluados, entre ocho y diez predominaron al menos condiciones de sequía incipiente en todas las regiones climáticas del Estado y en diversas épocas del año. Los eventos de sequía más destacados por su intensidad y duración en las tres escalas de tiempo analizadas, ocurrieron durante y al término de la década de 1990.

Según cifras oficiales, la agricultura de temporal parece ser una de las actividades económicas más severamente afectadas por la sequía; entre 1994 y 1995 se sembraron 1 221 878 ha de temporal, de la cual 37% se reportó como siniestrada por la sequía. Esta situación empeoró de 2000 a 2003 cuando la superficie agrícola sembrada fue 2 565 137 ha y se reportó 41% como siniestrada (SAGARPA, 2004). Otro efecto que parece estar relacionado con los eventos de sequía de corto plazo durante la década de 1990, fue el incremento de incendios forestales en la región boscosa del Estado. En 1996 se registraron 899 incendios forestales, los cuales afectaron 44 900 ha; esta situación se agrava de 1998 a 2000 cuando 3655 incendios afectaron 105 000 ha (CONAFOR, 2004). Para mediano y largo plazo, el efecto de los eventos de sequías de la década de 1990 e inicio del 2000, se reflejó en los niveles de almacenamiento en los embalses de mayor importancia de la cuenca del río Conchos. Las presas La Boquilla, Luis L. León y Francisco I. Madero en su conjunto tienen una máxima capacidad de almacenamiento de 5000 millones m^3 (CNA, 2003a); sin embargo de 2001 a 2003 el almacenamiento acumulado en dichas presas fue inferior a 10% de su máxima capacidad. Lo anterior ha favorecido a la sobre-explotación de los acuíferos de mayor importancia en el Estado, y por consiguiente, insuficiente abastecimiento de

record of precipitation showed a significant effect in the accumulated total rainfall during each tri-monthly period. In the series of six and twelve months, the SPI values more clearly establish and define the deficit in rainfall. This is because each record of precipitation is less meaningful in the accumulated total rainfall of the corresponding period. The drought events identified in the three-month scales are characterized by a high frequency in short periods of time and by variable intensity. In series of six and twelve months they were less recurrent but of greater duration.

The proportion of time in which the SPI values were below -0.5 oscillated between 23 and 31%; that is, of the 35 years assessed, in eight to ten years at least incipient drought conditions predominated in all of the climate regions of the State at diverse times of the year. The most outstanding events for their intensity and duration at the three scales of time analyzed occurred during and up to the end of the 1990s.

According to official data, dryland agriculture seems to be one of the economic activities most severely affected by drought; between 1994 and 1995, the rainfed area sowed was 1 221 878 h, of which 37% was reported as disaster area. This situation worsened from 2000 to 2003 when, of the 2 565 137 ha of cultivated area, 41% was reported to be disaster area (SAGARPA, 2004). Another effect seemingly related to the short drought events of the 1990s was the increase in forest fires in the State's region of forests. In 1996, 899 forest fires were recorded, affecting 44 900 ha; this situation became acute from 1998 to 2000 when 3 655 fires affected 105 000 ha (CONAFOR, 2004). For the medium and long terms, the effect of the drought events of the 1990s and early 2000 was reflected in the water levels of the most important reservoirs of the Rio Conchos watershed. The dams La Boquilla, Luis L. León and Francisco I Madero together have a maximum storage capacity of 5000 million m^3 (CNA, 2003a). However, from 2001 to 2003 accumulated stored water in these reservoirs was below 10% of their maximum capacity. This has provoked over-extraction of the major aquifers of the State and, therefore, insufficient water supply for agricultural, livestock, industrial and urban use (CNA, 2003a).

CONCLUSIONS

SPI allows assessment of the impacts associated with drought in function of a time scale and enables the establishment of relationships between drought and certain phenomena of different temporal magnitude. A three-month time scale would be sufficient to relate the effect of drought on the occurrence of forest fires and on dryland agriculture. A time scale of more than six

agua para uso agrícola, pecuario, industrial y urbano (CNA, 2003a).

CONCLUSIONES

El SPI permite evaluar los impactos asociados a la sequía en función de una escala de tiempo y permite establecer relaciones entre la sequía y ciertos fenómenos de distinta magnitud temporal. Una escala de tiempo de tres meses sería suficiente para relacionar el efecto de la sequía en la ocurrencia de incendios forestales y en la agricultura de temporal. Una escala de tiempo mayor a seis meses permitiría evaluar el efecto del déficit de la lluvia en los niveles de almacenamiento en presas y acuíferos.

La sequía es un fenómeno climático cuya recurrencia es inevitable e impredecible, y a medida que exista un amplio conocimiento sobre su duración, intensidad y distribución territorial será posible adoptar acciones para mitigar los impactos asociados al fenómeno.

LITERATURA CITADA

- Byun, H., and D. A. Wilhite. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *J. Climate* 12: 2747-2756.
- Chang T. J., and X. A. Kleopa. 1991. A proposed method for drought monitoring. *Water Res. Bull.* 27(2): 275-281.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 1996. Programa Hidráulico de Gran Visión del Estado de Chihuahua 1996-2020. Tomo I. 1ª Edición, Chihuahua, México. 482 p.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2003a. Estadísticas del Agua en México. 1ª Edición, México, D.F. 106 p.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2003b. Programa Hidráulico Regional 2002-2006 Región VI Río Bravo. 1ª Edición. México, D. F. 242 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2004. Estadísticas semanales de incendios forestales en Chihuahua 1990-2004. Gerencia Región VI Río Bravo. Chihuahua, Chih.
- Dracup, J. A., K. Lee, and E. Paulson. 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Res.* 16: 297-302.
- Edwards, D., and T. B. McKee. 1997. Characteristics of 20 century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report No. 97-2*. Department of Atmospheric Sciences, Fort Collins, Colorado, U.S.A. 155 p.
- García, E., 1973. Modificación del Sistema de Clasificación de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. México D. F. 247 p.
- Glantz, M., and R. W. Katz. 1977. When is a drought a drought?. *Nature* 267: 192-193.
- Guttman B. N. 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *J. Am. Water Res. Assoc.* 34(1): 113-121
- Guttman B. N. 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *J. Am. Water Res. Assoc.* 35(2): 311-322
- Hayes, M., M. D. Svoboda, and D. A. Wilhite. 1999. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 80 (3): 429-438.
- Komuscu, A. U. 1999. Using the SPI to analyze spatial and temporal drought patterns in Turkey. *Drought Network News* 11(1): 7-13.

months would enable the assessment of the effect of rain deficit on levels of water stored in reservoirs and aquifers.

Drought is a climatic phenomenon whose recurrence is unavoidable and unpredictable, but in the measure that knowledge of its duration, intensity and territorial distribution is broadened, it will be possible to adopt actions to mitigate the impacts associated with the phenomenon.

—End of the English version—



- Narasimhan, B., and R. Srinivasan. 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index and Evapotranspiration Deficit Index for agricultural drought monitoring. *Agric. For. Meteorol.* 133: 69-88.
- Quiring, M. S., and T. N. Papakyriakou. 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agric. For. Meteorol.* 118:49-62.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca). 2004. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. Versión 1.1, México, D. F.
- Steinemann, Anne. 2003. Drought indicators and triggers: A stochastic approach to evaluation. *Journal of the American water Resource association* 39(5): 1217-1233.
- Tadesse, T., D. A. Wilhite, S. K. Harms, M. J. Hayes, and S. Goddard. 2004. Drought monitoring using data mining techniques: A case study for Nebraska, USA. *Natural Hazards* 33(1): 137-159.
- U.S. Drought Monitor. 1999. Drought severity classification. Lincoln, Nebraska, U.S.A. <http://www.drought.unl.edu/dm/classify.htm>. consultado: 12 junio de 2005.
- Velasco, V. I. 1999. Severe droughts becoming recurrent more persistent in Mexico. *Drought Network News* 11(1): 3-6.
- Velasco, V. I., F. J. Aparicio, J. Valdés, y J. Velázquez, 2004. Evaluación de índices de sequía en las cuencas afluentes del Río Bravo/Grande. *Ing. Hidráulica Méx.* IX(3): 37-53.
- Wanielista, M. P., R. Kersten, R. Eaglin. 1997. *Hydrology*. Wiley and Sons. New York, U.S.A. 567 p.
- Wilhite, D. A. 2000. Drought as a natural hazard. *In: Drought: A Global Assessment*. Wilhite, D. A. (ed). Routledge Publishers, London, UK. pp: 3-18.
- Wilhite, D. A. 2002. Combating drought through preparedness. *Natural Resources Forum* 26: 275-285.
- Wilhite, D. A., and M. H. Glantz. 1985 Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water Int.* 10: 111-120.
- Wu, H., K. G. Hubbard, and D. A. Wilhite. 2004. An agricultural drought risk assessment model for corn and soybeans. *Int. J. Climatol.* 24: 723-741.
- Wu, H., M. J. Hayes, D. A. Wilhite, and M. D. Svoboda. 2005. The effect of the length of record on the Standardized Precipitation Index Calculation. *Int. J. Climatol.* 25: 505-520.
- WMO (World Meteorological Organization). 1975. Drought and Agriculture. WMO Technical Note Number 138. Report of CAG WorkingGroup on the Assessment of Drought. Geneva, Switzerland. 53 p.
- Young, K. C. 1992. A three-way model for interpolating for monthly precipitation values. *Monthly Weather Rev.* 120: 2561-2569.